

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire des fins d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de **Master en Génie Des Procédés**

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par : **Maman Assako Adama**

Simulation du traitement des eaux de puits par Nano-filtration et Osmose inverse : Eau destinée à la consommation humaine cas du Niger

Encadreur :

Dr. Abdelbaki Yousra

Dr. HADJI Moundir

Devant le **jury** composé de :

Président : Pr Bouras Omar

Examineur : Dr Asmaa Sakri

2022-2023

الملخص

تم إجراء اختبارات المحاكاة باستخدام برنامج الموجة لتطوير وحدة إنتاج مياه الشرب من مياه الآبار. للقيام بذلك، ركزنا بشكل أساسي على التناضح العكسي وترشيح النانو الذي ثبت أدائه في معالجة المياه التقليدية وغير التقليدية لإنتاج المياه للاستهلاك البشري أو الاستخدام الصناعي. أظهرت النتائج أن وحدة العلاج بالممر الالتفافي أكثر ملاءمة لحالة دراستنا.

الكلمات الرئيسية: المحاكاة، الترشيح النانوي، التناضح العكسي، الماء غير التقليدي، مياه الشرب، التكوين.

Abstract

Simulation tests by the wave software were carried out for the development of a drinking water production unit from well water. To do this, we focused primarily on reverse osmosis and nano-filtration whose performance has been proven for conventional and non-conventional water treatment, mainly for the production of water for human consumption or industrial use. The results obtained showed that a treatment unit with by-pass is more suitable for our study case.

Keywords: Simulation, Nano-filtration, Reverse osmosis, well water, drinking water, configuration.

Résumé

Des tests de simulation par le logiciel wave ont été menés, pour la mise au point d'une unité de production d'eau potable à partir d'une eau de puits. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés principalement à l'osmose inverse et la nano-filtration dont les performances ont été prouvées pour le traitement de l'eau conventionnelle et non-conventionnelle principalement pour la production d'eau propre à la consommation humaine ou à destination industrielle. Les résultats obtenus ont révélé qu'une unité de traitement avec by-pass est plus adéquate à notre cas d'étude.

Mots clés : Simulation, Nano-filtration, Osmose inverse, eau de puits, eau potable, configuration.

Hommage à mon très cher père

Cher papa,

Comme il est difficile pour moi, de rédiger ce discours, cet éloge, pour vous rendre hommage en exprimant, ma gratitude, ma peine et mon affection à votre égard. Vous êtes partis bien avant nous, bien trop tôt, et vous nous rappelez que cette vie n'est qu'éphémère et que nous allons tous partir un jour.

Perdre un parent, c'est perdre une partie de soi, un meilleur professeur qui nous appris tellement de chose, quelqu'un qui a toujours été là, pour le meilleur et pour le pire. Un parent parfait n'est pas sans défaut mais celui qui sait comment aimer, éduquer et être présent dans la vie son enfant.

Mon père était une personne extraordinaire, simple, intelligent, aimant, sensible et généreux toujours prêt à aider les autres. L'expression de vos sentiments n'était certainement pas votre point fort, mais vous avez su montrer à toute votre famille à quel point vous teniez à eux, vous vous êtes sacrifiés corps et âme pour qu'on ne manque de rien même étant malade vous ne vous êtes pas reposés et vous avez été un véritable pilier pour nous tous, l'homme de la situation, notre plus grande force et source d'inspiration, vous faites notre fierté à tous. Nous garderons toujours des souvenirs positifs de vous, de votre gentillesse, votre générosité, de votre grandeur d'âme.

Cela fait presque 3 mois que vous nous avez quitté, je me souviens encore de ce mardi matin la veille de ton décès, de la dernière fois ou l'on s'est parlé et de vos dernières paroles qui sont « **Qu'Allah t'assiste** » que je n'oublierai jamais ainsi que tous ces souvenirs magnifiques qu'on a pu partager qui sont comme un précieux trésor dans ma mémoire. Pour trouver consolation dans cœur je me suis mise dans la tête que vous êtes partis pour un voyage lointain et qu'on se reverra bientôt in sha Allah dans un endroit meilleur car il m'est pénible l'idée que vous soyez décédé, de ne plus vous voir ni vous parler, ni que vous me grondez quand je fais une bêtise et j'ai toujours du mal à l'accepter, j'ai toujours votre numéro enregistrer ainsi que nos derniers messages dans mon téléphone, je continue à vouloir vous appeler prendre de vos nouvelles.

Ces quelques lignes ne suffiront pas à exprimer tout ce que j'ai sur le cœur, toute ces douleurs que j'essaye d'oublier que je n'y arrive pas, mais je voulais quand même le faire car vous le méritez, vous avez fait de moi ce que je suis aujourd'hui. On n'est jamais préparé au

départ d'une personne que l'on a aimée pendant toute sa vie. Vous laissez un vide dans mon cœur et dans celui de toute la famille, sachez qu'il y'aura toujours une place spéciale pour vous dans nos cœurs et dans nos prières, vous nous manquez vraiment beaucoup. J'aurai tant aimé essayer de vous rendre la pareille même si je sais que je n'y arriverai jamais mais « tel est le décret d'Allah et Il fait ce qu'Il veut ».

Je pris Allah Le Tout-Puissant, qu'il vous pardonne, vous fasse miséricorde, vous accorde le salut et une demeure meilleure que celle que vous aviez, vous accueille avec les anges de la miséricorde, vous préserve du châtement de la tombe et de l'enfer, vous compte parmi ceux qui auront le plus haut degré du paradis, élevé votre rang parmi ceux que qu'Il a guidé, qu'Allah élargit votre tombe et l'illumine pour vous.

Que ne fut difficile à supporter l'épreuve de ta perte même si votre fin a été l'une des plus souhaité par chaque musulman.

Dédicace

Je dédie ce travail

À mes trésors inestimables, mon père et ma mère, pour tous leur sacrifice, leur présence dans ma vie, leur amour, leur soutien, leur tendresse et prières inconditionnel à mon égard tout au long de ma vie,

À tous mes frères et sœurs pour leurs encouragements permanents, leurs appuis et soutien moral,

À une personne très spéciale, Ibrahim qui m'a beaucoup soutenu de par ses précieux conseils et encouragements,

À toute ma famille et mes amis qui me sont chers,

Au deux dames merveilleuses, exceptionnelles et hors commun, que j'ai rencontré dans ma vie, à Mme Aichatou du Niger et Mme Amel de l'Algérie ainsi qu'à leurs familles respectives,

Sachez que vous êtes tous précieux pour moi, qu'Allah vous protège, vous bénisse et vous accorde le succès dans tout.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Allah AZZAWAJEL par la grâce de Qui j'ai pu arriver à terme de cette formation, et qui m'a donné des parents qui m'ont beaucoup aidé et soutenu sur ton mon cursus scolaire et toute ma vie.

J'adresse ma profonde gratitude, toute ma reconnaissance et remerciement :

A mes encadreurs Mme Abdelbaki Yousra et Mr Hadji Moundir pour leurs orientations, leurs précieux conseils et encouragement tout au long de la réalisation de ce travail.

A tous les membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur bienveillance attention.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude et mon profond respect à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis la maternelle jusqu'à la fin de celle-ci et toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

RESUME

HOMMAGE

DEDICACE

REMERCIEMENTS

TABLES DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....12

Chapitre 1 15

1.1 Problématique et objectif du mémoire..... 15

1.2 Situation géographique et hydrologique du Niger..... 16

1.2.1. Les ressources en eau au Niger 16

1.2.2. Les normes 17

1.3 Généralités sur les membranes 18

1.3.1. Définition et principe de fonctionnement d'une membrane 18

1.3.2. Système membranaire 19

1.3.3. Caractéristiques des membranes 20

1.4 Les techniques séparatives à membrane 21

1.4.1 Les différentes opérations de filtration membranaire 22

1.4.2 Comparaison des différentes techniques séparatives à membranes 25

1.5 Comparaison entre osmose inverse et nano-filtration 26

1.5.1 Similitude entre OI et NF 26

1.5.2 Prétraitement de l'OI et NF 27

1.5.3 En quoi OI/NF sont différents 27

1.6 Les configurations des membranes..... 27

1.6.1 Les modules spiralés 27

1.7	Les Avantages et inconvénients des procédés membranaires	28
1.7.1	Les avantages des techniques à membranes	28
1.7.2	Les inconvénients des techniques à membranes	29
1.8	Limites des procédés de filtration membranaire.....	29
1.8.1	Le colmatage	29
Chapitre 2		31
2.1	Présentation du logiciel WAVE	31
2.2	Les technologies de traitement d'eau du logiciel WAVE	32
2.3	Les équations de conception d'un système RO sur logiciel WAVE	33
2.4	Les Interfaces du logiciel WAVE.....	38
2.5	Simulation par WAVE.....	43
2.5.1	Système d'avertissement (warning system)	43
2.6	Les caractéristiques de l'eau à traiter (eau de puits du Niger).....	44
2.6.1	Les paramètres d'alimentations.....	44
2.6.2	La composition ionique	44
2.7	Sélection des membranes.....	46
2.7.1	Criblage des membranes OI et NF	47
2.7.2	Dimensionnement et caractéristiques des membranes	47
2.8	Tests de simulation	50
2.8.1	La reminéralisation.....	51
2.8.2	Configuration optimale	52
Chapitre 3		53
3.1	Introduction	53
3.2	Etude de l'effet du taux de conversion	53
3.2.1	Effet sur le TDS du perméat.....	53
3.2.2	Effet sur la pression d'alimentation	55
3.2.3	Effet sur l'énergie spécifique	56

3.3	Reminéralisation.....	58
3.3.1	Effet de la reminéralisation sur le TDS du perméat.....	58
3.4	Configuration optimale.....	60
3.4.1	Effet sur le TDS du perméat.....	61
3.4.2	Effet sur la pression d'alimentation	62
3.4.3	Effet sur l'énergie spécifique	63
3.5	Comparaison et choix de la membrane.....	64
	CONCLUSION GENERALE.....	65
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
	ANNEXE	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Carte des systèmes aquifères, république du Niger	17
Figure 1.2. Représentation schématique de la séparation par membrane sélective	19
Figure 1.3. Classification des procédés membranaires.	22
Figure 1.4. Schéma du principe de l'osmose inverse.	23
Figure 1.5. Les constituants retenus par nanofiltration et osmose inverse	26
Figure 1.6. Structure interne d'une membrane à spirale (d'après Degrémont – 1989).....	28
Figure 2.1. L'interface d'écran d'accueil du logiciel WAVE.	38
Figure 2.2. Le choix de la technologie, du débit et du type d'eau.	40
Figure 2.3. Les caractéristiques de l'eau d'alimentation.....	41
Figure 2.4. Le choix des membranes et configuration de l'unité.	42
Figure 2.5. Configuration basique pour la sélection des membranes RO.	47
Figure 2.6. Dimensionnement d'une membrane XLE-440	48
Figure 2.7. Dimensionnement d'une membrane XLE-4040	49
Figure 2.8. Dimensionnement d'une membrane NF270-440.....	49
Figure 2.9. Dimensionnement d'une membrane NF270-400/34i.....	49
Figure 2.10. Configuration du système avec la reminéralisation.	51
Figure 3.1. Variation du TDS en fonction du taux de conversion (configuration 1).	54
Figure 3.2. Variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion.	56
Figure 3.3. Variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion.	57
Figure 3.4. Evolution du TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes E1 et E2.	59
Figure 3.5. Evolution du TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes E3 et E4.	60
Figure 3.6. Variation du TDS en fonction des configurations pour les quatre membranes. ...	62
Figure 3.7. Variation de la pression d'alimentation en fonction des configurations pour les quatre membranes.	63
Figure 3.8. Variation de l'énergie spécifique en fonction des configurations pour les quatre membranes.	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Les normes selon L'OMS	18
Tableau 1.2. Comparaison des différentes techniques séparatives à membranes	25
Tableau 2.1. Les équations de conception pour projeter les performances du système d'osmose inverse : performances des éléments individuels.	34
Tableau 2.2. Les équations de conception pour projeter les performances du système OI: performances moyennes du système.	35
Tableau 2.3. Symboles et abréviations.....	37
Figure 2.4. Avertissement émis par le logiciel wave.	43
Tableau 2.5. Les paramètres du flux d'alimentation.....	44
Tableau 2.6. La composition ionique de flux d'alimentation	45
Tableau 2.7. Caractéristiques des membranes RO sélectionnées.	48
Tableau 2.8. Caractéristiques des membranes NF sélectionnées	48
Tableau 3.1. Variation du TDS en fonction du taux de conversion.....	54
Tableau 3.2. Résultat de la pression d'alimentation en fonction du taux de conversion.	55
Tableau 3.3. Energie spécifique en fonction du taux de conversion.....	57
Tableau 3.4. Variation de la TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes RO.	58
Tableau 3.5. Variation de la TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes NF.	59
Tableau 3.6. Variation du TDS en fonction des configurations 1, 2, et 3.....	61
Tableau 3.7. Variation de la pression d'alimentation en fonction des configurations 1, 2, et 3.	62
Tableau 3.8. Variation de l'énergie spécifique en fonction des configurations 1, 2, et 3.....	63
Tableau 3.9. Caractéristiques des membranes.	65
Tableau 3.10. Résultats des calculs des débits.....	66

NOTATIONS ET ABREVIATION

A°	Armstrong
°C	Degré Celsius
G	Gramme
H	Heure
J	Jour
kWh	Kilowatt heure
L	Litre
m ³	Mètre carré
m ²	Mètre cube
MF	Microfiltration
MO	Matière organique
MES	Matière en suspension
Mg	Milligramme
Mol	Molaire
NF	Nano-filtration
NTU	Unité de Turbidité Néphélométrique
Nm	Nanomètre
OMS	Organisation mondiale de la santé
OI ou RO	Osiose inverse
PH	Potentiel hydrogène
SDI	Indice de colmatage
TAC	Titre alcalimétrique complet
TSS	Total des solides en suspension
TDS	Total des solides dissous
UF	Ultrafiltration
µm	Micromètre

INTRODUCTION GENERALE

Le présent mémoire de master s'inscrit dans la cadre de la valorisation des eaux non conventionnelles. En effet, selon l'Organisation Mondiale de la Santé la population mondiale a triplé et la consommation d'eau a sextuplé. En parallèle, les ressources en eau douce sont limitées : l'accroissement prévisible de la population et le développement industriel font craindre une rupture des ressources en eau aux conséquences bien plus graves que celles qui résulteront de la fin des réserves pétrolières. Il y a des substituts au pétrole, pas à l'eau : Qualité de l'eau distribuée et quantité suffisante sont donc les mots clés à considérer pour le traitement des eaux. [1]

Introduites dans le traitement des eaux usées, les opérations de séparation par membranes (osmose inverse OI, nano-filtration NF, ultrafiltration UF) sont bien placées pour aider à résoudre ces problèmes. En fait, comme les membranes jouent le rôle de barrière physique, elles produisent avec une grande fiabilité une eau de qualité pour la consommation humaine et industrielle. [2]

De plus, ces techniques de traitement répondent aux exigences du développement durable, elles permettent de combler les déficits hydriques en augmentant les ressources en eau et ce tout en respectant l'environnement.

Dans le présent travail, une étude numérique sur l'utilisation des membranes pour la production d'eau potable a été menée. Des tests de simulation par le logiciel wave pour le dimensionnement de l'unité de production seront réalisés.

L'objectif est de mettre en diapason une configuration optimale pour une unité membranaire (Osmose inverse et Nano-filtration) pour la production d'eau potable avec pour TDS optimale (fixé) de 500 mg/L selon les normes règlementaires du Niger à partir d'une eau abondante (eau de puits). Les résultats obtenus seront présentés du point de vue efficacité et coût.

Dans un premier temps, l'effet du taux de conversion sur les différents paramètres du système à savoir le TDS du perméat, la pression de l'alimentation et l'énergie spécifique ont été étudiées. À cet effet, une série de simulation a été réalisée. Par la suite, l'effet du by-pass pour la reminéralisation sera souligné.

Dans la troisième partie de ce travail, une étude qui porte sur le choix de la configuration optimale sera présentée.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre est un rappel bibliographique sur les procédés membranaires, les différents systèmes, leurs applications et leurs principes de mise en œuvre.

Le deuxième chapitre présente le logiciel wave utilisé pour la simulation, les différentes séries de simulation réalisées et les critères de présélection des membranes.

Le chapitre 3 est dédié aux résultats obtenus. Les observations et les performances des membranes sélectionnées ont été interprétées.

Enfin, une conclusion générale sur les systèmes membranaires étudiés résumant les principaux résultats auxquels nous avons abouti est présentée, elle comporte des suggestions par rapport à des travaux qui pourraient être menés pour approfondir et éclaircir davantage certains aspects de la présente étude.

Chapitre 1

Etude bibliographique

Le premier chapitre de ce mémoire s'attache en premier lieu à présenter la problématique, l'objectif et la situation géographique et hydrologique du Niger.

Les différents aspects des membranes, à savoir leurs caractéristiques, leurs classifications, leurs principes de mise en œuvre, les différentes techniques séparatives à membrane et les configurations des modules membranaires feront l'objet de la troisième section.

1.1 Problématique et objectif du mémoire

La mise à jour des normes de qualité de l'eau potable et la limitation des ressources en eau à consommation humaine au Niger pousse les municipalités à améliorer leurs procédés conventionnels de traitement de l'eau.

Les opérations de séparation par membranes (osmose inverse OI, nano-filtration NF, ultrafiltration UF) sont bien placées pour aider à résoudre le problème d'approvisionnement en eau. En effet, les procédés membranaires ouvrent de nouvelles possibilités dans l'exploitation de sources d'eau et permettent de produire avec une grande fiabilité une eau de qualité pour la consommation humaine et l'industrie.

L'objectif principal de ce mémoire est d'adapter une unité membranaire (Osmose inverse et Nano-filtration) pour la production d'eau potable selon les normes réglementaires du Niger à partir d'une eau abondante (eau de puits) avec un TDS fixé à 500mg/L. La configuration, le dimensionnement, la sélection du type de membrane avec l'étude de l'effet des paramètres opératoires sur l'énergie spécifique, la pression d'alimentation et la TDS (total des solides dissous) feront également l'objet de ce présent mémoire.

1.2 Situation géographique et hydrologique du Niger

Le Niger, le plus grand pays d'Afrique occidentale est un pays enclavé (environ 80% de sa superficie est dans le désert du Sahara). C'est un pays principalement aride, avec un relief principalement doux et des précipitations faibles et irrégulières. La plupart des fleuves sont éphémères à l'exception du fleuve du Niger.

Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau des populations. Cette ressource est vitale, compte tenu de l'aridité du pays et sa vocation agropastorale et minière.

1.2.1. Les ressources en eau au Niger

Le Niger est un pays sahélien aux ressources en eau fragiles. La forte croissance démographique (taux annuel de 3,9%), le développement de certaines pratiques agricoles (agriculture irriguée, utilisation de produits phytosanitaires), ainsi que les activités industrielles et minières poussent à exploiter d'autres ressources et à implémenter de nouvelles technologies de traitement d'eau non conventionnelle.

Les ressources en eau au Niger sont :

1.2.1.1 Les eaux de surface

Les ressources en eau de surface du Niger sont globalement très importantes. Le quasi-totalité des écoulements provient du fleuve Niger et du lac Tchad. Toutefois, les zones pourvues en eaux de surface sont seulement les régions de l'Ader-Doutchi-Maggia, de Maradi et la vallée de la Komadougou présentant un écoulement réduit, le reste du territoire, c'est-à-dire la majeure partie du Niger, est démunie.

Bien que les fleuves et marées ne soient pas de qualité suffisante pour la consommation humaine (nécessite un traitement) ils représentent des sources d'approvisionnement principales pour les populations riveraines et le cheptel et peuvent être utilisées dans l'agriculture.

1.2.1.2 Les eaux souterraines

Le Niger dispose d'importantes réserves d'eau souterraine (figure 1.1) malgré la sévérité du climat. Cependant, l'exploitation de ces aquifères reste à ce jour insignifiante et pourtant il n'y a pas de contraintes pour un projet des forages manuels.

Les grands systèmes aquifères au Niger sont :

- Les aquifères alluviaux, en particulier celui du Goulbi de Maradi, ceux des vallées de l’Aïr et du kory Teloua, des korys de la zone de l’Ader -Doutchi - Maggia, des dallols Bosso, Maouri et Foga, de la vallée de la Komadoukou, des Koramas.
- Les aquifères discontinus du socle, notamment ceux du Liptako et du Damagaram – Mounio

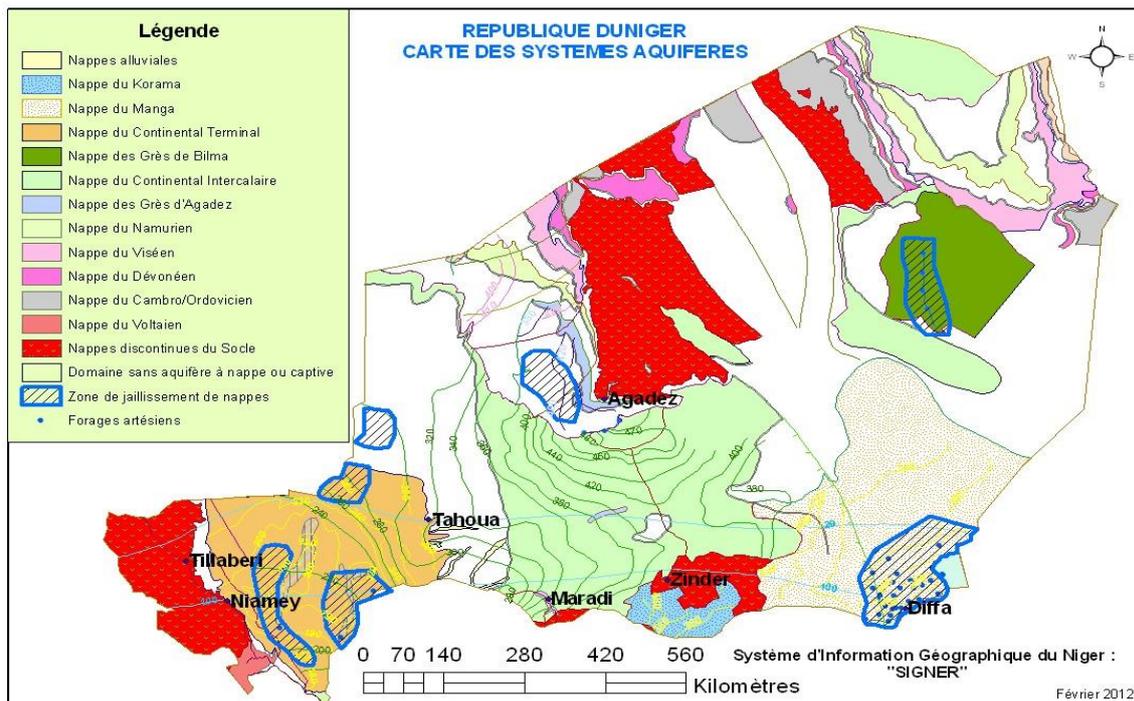


Figure 1.1. Carte des systèmes aquifères, république du Niger [3].

Compte tenu de la situation hydrologique du Niger, et dans le but de l’approvisionnement en eau de qualité potable nous avons opté pour un traitement d’eau souterraine (eau de puits) par procédés membranaires.

1.2.2. Les normes

Les normes pour une eau potable selon L’OMS sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1.1. Les normes selon L’OMS [4]

Les paramètres	Normes OMS
Température	Non fixée
PH	6.5-9.5
Conductivité	-
TDS (mg/L)	1000
Turbidité (NTU)	5
MO (mg/L)	5
MES (mg/L)	500
Cl₂ (mg/L)	S : 0.8-1.3 R : 0.1-0.3
TAC (°F)	50

1.3 Généralités sur les membranes

1.3.1. Définition et principe de fonctionnement d’une membrane

De façon générale, la membrane est une barrière physique composée de trous microscopiques appelés « pores » pouvant laisser passer l’eau, mais empêchant certains contaminants, en fonction de leur grosseur, de la traverser sous l’action d’une force motrice de transfert [5] (Figure1.2). Les critères de séparation des particules, des molécules ou encore des ions peuvent être d’ordre [6] :

- Stérique (dimension et forme),
- Chimique (nature),
- D’état physique,
- Ou encore dépendre de la charge électrique.

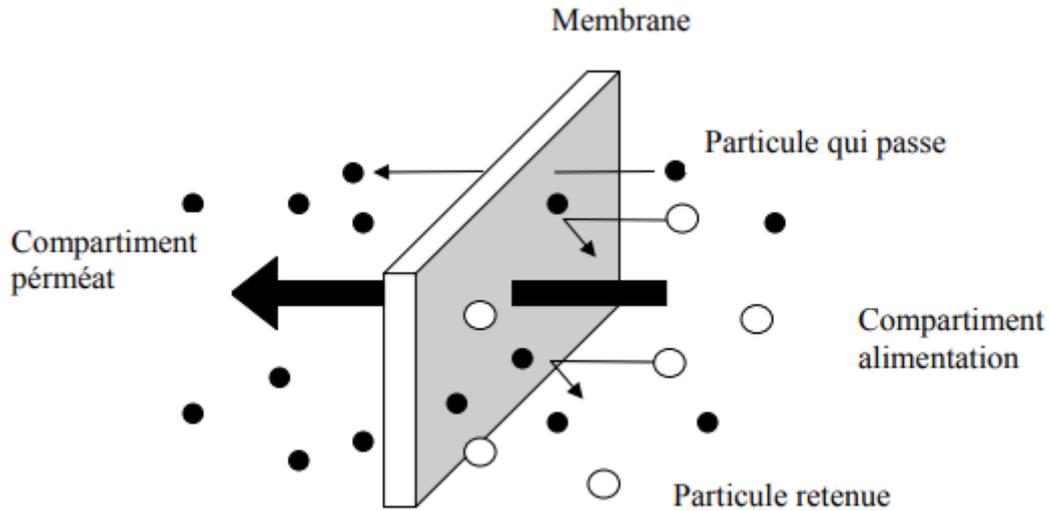


Figure 1.2. Représentation schématique de la séparation par membrane sélective [6].

La filtration sur membrane est un procédé de séparation physique. Cette opération, qui se déroule en phase liquide, a pour objet de purifier, concentrer ou fractionner des espèces dissoutes ou en suspension dans un solvant par passage au travers d'une membrane. À l'issue de cette opération, nous obtenons d'une part le retentât, également appelé concentrât, qui est composé des molécules et/ou des particules retenues par la membrane, et d'autre part le perméat [7].

Les membranes incluent une grande variété de matériaux et de structure qui forment autant de possibilités de configuration et de classification [8].

1.3.2. Système membranaire

Un système membranaire comprend [9] :

- Un système de prétraitement,
- Des pompes,
- Un système d'agitation (pour les systèmes à membranes immergées),
- Un ensemble de modules,
- Un poste unitaire chimique de nettoyage,
- Un post-traitement chimique au besoin.

Chaque système à un rôle bien précis :

- Le prétraitement vise à prévenir le colmatage prématuré des membranes et / ou des canaux d'écoulement tangentiel. Les pompes servent à bâtir la pression transmembranaire.
- Les pompes ou le système d'agitation permettent la circulation de l'eau à traiter dans les modules ou entre les modules.
- Le post traitement chimique permet d'ajuster, ou de réajuster, la composition chimique de l'eau traitée.

1.3.3. Caractéristiques des membranes

La détermination des caractéristiques d'une membrane a pour objectif d'aider au choix de celle-ci pour une application donnée, mais aussi d'acquérir une meilleure compréhension de l'évolution de ses performances en cours d'utilisation. Les méthodes utilisées nous permettent d'accéder à des grandeurs macroscopiques ou microscopiques, caractéristiques de la structure membranaire et de la chimie du matériau. Certaines de ces techniques sont propres aux procédés membranaires ou de séparation, d'autres font appel au domaine des polymères ou sont beaucoup plus générales.

Lors du choix d'une membrane, les caractéristiques structurales et de transfert (perméabilité hydraulique et courbe de sélectivité) sont les plus importantes car elles nous renseignent sur les performances de la membrane pour une séparation choisie : débit de perméat que nous pouvons espérer et taille des molécules qui sont susceptibles d'être retenues par la membrane. L'objectif de l'utilisateur d'un procédé membranaire est double : assurer une productivité (perméation) maximale pour minimiser les coûts de fonctionnement tout en ayant une efficacité (sélectivité) répondant aux contraintes fixées. La perméation et la sélectivité du procédé sont donc à la base de l'optimisation des procédés membranaires [10].

Interviennent également, dans le choix des membranes, les propriétés physico-chimiques et chimiques de surface (charge, caractère hydrophile-hydrophobe, composition chimique) qui permettent, dans une certaine mesure, de prédire les phénomènes de colmatage et les interactions entre les différents types de molécules à la surface de la membrane. De plus, elles peuvent avoir un rôle dans les mécanismes de transport [7].

1.4 Les techniques séparatives à membrane

La principale caractéristique des techniques de séparation membranaires est de mettre en œuvre des systèmes polyphasés constitués par [9] :

- La phase concentrât reliée à l'alimentation contenant le fluide à traiter (une solution à dépolluer, une eau à dessaler...);
- La phase perméat contenant le fluide traité ;
- La membrane.

Ces systèmes en fonctionnement sont hors d'état d'équilibre et vont tendre de manière spontanée vers un nouvel état d'équilibre. Cette évolution implique obligatoirement un transfert de matière et d'énergie au niveau de la surface de contact entre les deux phases, c'est à dire au niveau de l'interface, sous l'effet des contraintes imposées au système.

Dans cette optique, il est d'usage de classifier les opérations de séparation par membrane selon la contrainte ou la force motrice permettant d'opérer la séparation. On peut distinguer ainsi les procédés basés sur [7] :

- Un gradient de concentration (pervaporation, dialyse)
- Un gradient de potentiel électrique (électrodialyse (ED)).
- Un gradient de pression : dans le cas de l'osmose inverse, de la nano-filtration et de l'ultrafiltration, la force motrice est une différence de pression, ces opérations sont dites baro-membranaires. Les membranes utilisées sont dites **permsélectives** (membranes semi-perméables), ce qui signifie qu'elles favorisent le transfert, du concentrât vers le perméat, de certaines molécules ou particules par rapport à d'autres. Les diamètres de pores de ces membranes diminuent progressivement lorsque l'on passe de l'ultrafiltration à la nano-filtration, puis à l'osmose inverse. Il faut toutefois noter que, dans ce dernier cas, la membrane utilisée n'est pas une membrane poreuse mais une membrane dense sans porosité apparente et dont la sélectivité résulte d'un mécanisme de solubilisation-diffusion.

Ces procédés membranaires (qui se distinguent par la taille et le type des espèces qu'ils peuvent séparer) sont utilisés pour séparer et/ou concentrer des molécules ou des espèces ioniques en solution et/ou séparer des particules ou microorganismes en suspension dans un liquide. Ils sont donc bien adaptés au domaine de traitement des eaux [8].

Nous nous attacherons ici à présenter ces systèmes mettant en œuvre un gradient de pression, communément appelé pression transmembranaire. Ces opérations sont regroupées sous le terme générique de filtration membranaire [5].

1.4.1 Les différentes opérations de filtration membranaire

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. Actuellement, il y a quatre principaux procédés membranaires utilisés pour la production de l'eau potable. Ainsi, la Figure (1.3) présente les opérations à mettre en œuvre en fonction des composés à retenir, et les pressions qui y sont associées [5].

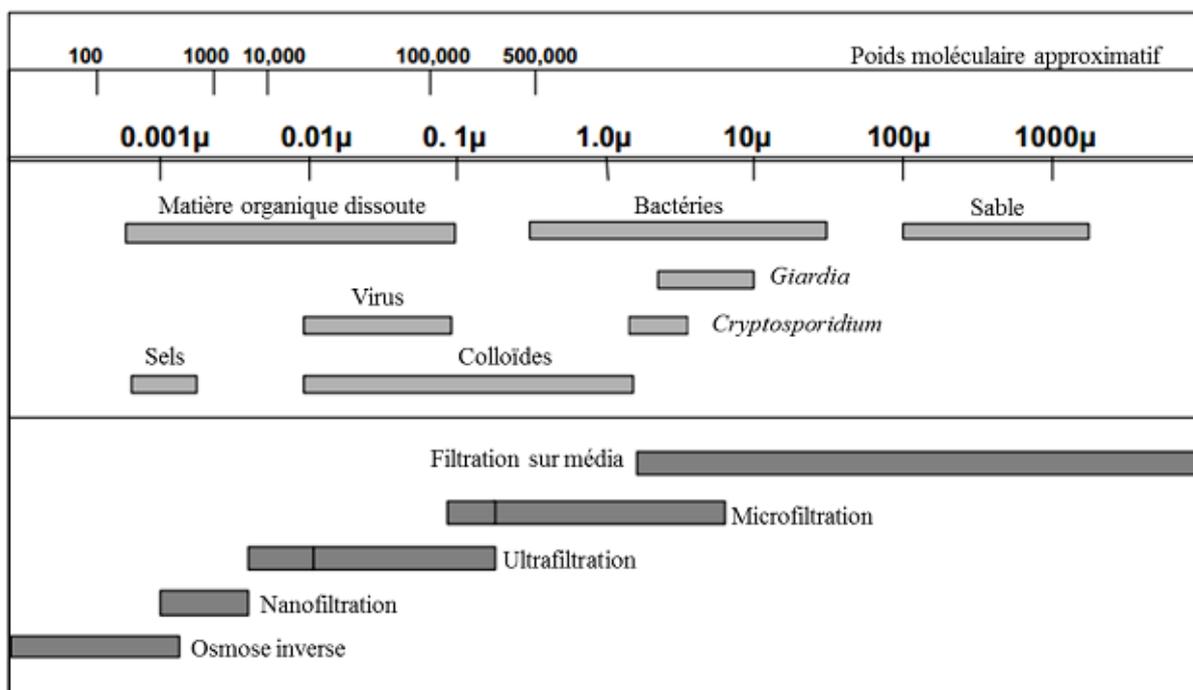


Figure 1.3. Classification des procédés membranaires [5].

1.4.1.1 L'osmose inverse (OI)

L'osmose inverse est un procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression. Il désigne le phénomène de diffusion des molécules de solvant (l'eau de façon générale) à travers une membrane semi-perméable qui sépare deux liquides de concentrations en soluté différentes. Le passage de solvant d'un compartiment à l'autre va créer une différence de pression hydrostatique qui va compenser exactement la différence de pression osmotique. Le phénomène d'osmose nécessite la présence de deux compartiments séparés par une membrane

semi-perméable (figure 1.4), c'est-à-dire perméable uniquement à l'eau (ou au solvant de façon plus générale) et imperméable aux solutés. Lorsque les deux solutions ne contiennent pas le même nombre de particules dissoutes par unité de volume, on observe un mouvement d'eau qui va tenter de compenser cette différence de concentration en diluant le compartiment le plus concentré.

Les membranes d'OI sont celles qui ont les structures les plus denses de toutes les membranes utilisées actuellement dans le domaine de l'eau potable [6].

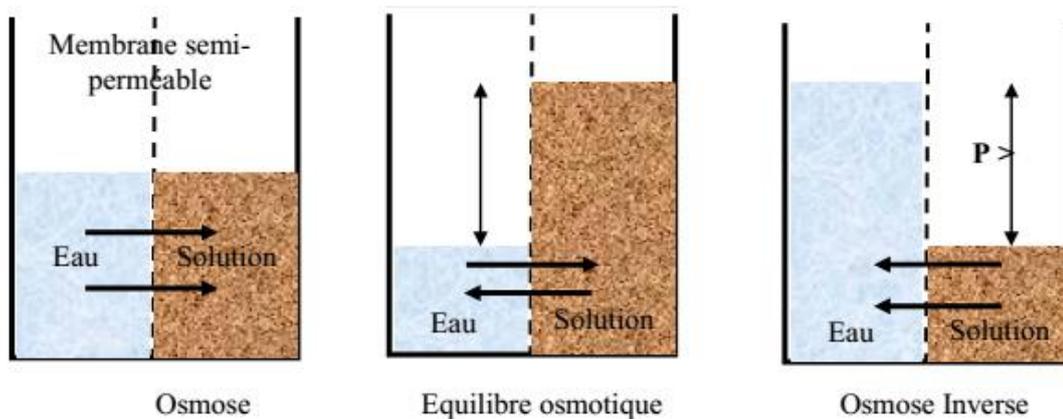


Figure 1.4. Schéma du principe de l'osmose inverse [11].

Les membranes d'OI sont celles qui ont les structures les plus denses de toutes les membranes utilisées actuellement dans le domaine de l'eau potable [6]. Cette technique est utilisée dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et production de l'eau ultra pure (industries électronique, pharmaceutique ...).

1.4.1.2 La nano-filtration (NF)

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration, elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10 Å) d'où l'appellation "nano-filtration". Les mécanismes de transfert sont intermédiaires entre ceux de l'osmose inverse et ceux de l'ultrafiltration [9].

En plus de permettre un enlèvement des particules et des macromolécules comme en UF, les membranes de NF sont conçues pour assurer un enlèvement poussé des ions multivalents (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Mn^{+2} , Fe^{+2}). Une conséquence de la rétention des ions multivalents est une augmentation de la pression osmotique qui peut être significative par rapport à la pression d'opération. Par contre, Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés

de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane [12].

1.4.1.3 L'ultrafiltration (UF)

L'ultrafiltration (UF) est un procédé de séparation soluté / solvant. La taille des molécules ou des groupes de molécules retenus par membrane d'ultrafiltration va de 0,001 à 0,1 μm [13]. Les constituants arrêtés peuvent être des bactéries, des macromolécules synthétiques ou naturelles, des agrégats moléculaires ou des particules issues de divers procédés.

L'ultrafiltration utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes).

Étant donné la taille des pores des membranes d'UF, certaines membranes d'UF (dans le domaine qui est le plus proche de la NF) sont capables d'enlever aussi les virus et possiblement une partie de précurseurs des trihalométhanes (THM) et une partie de la couleur quoique cela ne soit pas très documenté dans la littérature scientifique [6].

Le plus souvent, l'UF est utilisée comme un outil de prévention. Dans les applications de traitement des eaux usées, l'UF est la technologie de prétraitement de choix avant l'osmose inverse en raison de la nature hautement comatante de l'eau à traiter.

Il faut noter également que, parmi les technologies membranaires disponibles, l'ultrafiltration offre des avantages conséquents par rapport à la microfiltration (MF) : les membranes d'UF, travaillant à flux identique à celui de la MF, montrent en effet une meilleure rétention des virus et des matières organiques, ces dernières étant d'ailleurs souvent responsables du colmatage des membranes de nano-filtration ou d'osmose inverse fonctionnant en aval [6].

1.4.1.4 La microfiltration (MF)

La MF est le plus ancien de tous les procédés membranaires, étant utilisé et commercialisé pour la première fois par Sartorius Werke GmbH en Allemagne en 1929. L'utilisation d'un tel procédé a été nécessaire pour assurer une eau potable sûre du point de vue bactériologique [14].

Les membranes de MF utilisées dans le domaine de l'eau potable sont capables de retenir des particules plus grandes que 0,1µm. Ces rétentions des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexations, précipitation ou floculation. L'utilisation principale de la MF reste la clarification c'est-à-dire l'enlèvement des particules en suspension.

1.4.2 Comparaison des différentes techniques séparatives à membranes

Le tableau (1.2) permet de faire une comparaison entre les différentes filières de filtration membranaire en mettant en évidence leurs principales caractéristiques.

Tableau 1.2. Comparaison des différentes techniques séparatives à membranes [11].

	Osmose inverse	Nano-filtration	Ultrafiltration	Microfiltration
Diamètre des pores (nm)	< 0,5	1	1 à 100	10 ² à 10 ⁴
Espèces retenues	Sels	Petites molécules	Macromolécules, colloïdes	Particules, colloïdes
Mécanisme de transfert	Solubilisation – diffusion	Solubilisation – diffusion + capillaire	Capillaire	Capillaire
Rôle de la pression osmotique	Importante	Moyenne	Faible	Négligeable
Pression appliquée (en 10⁵ Pa ou bar)	30 à 80	10 à 40	2 à 10	0,2 à 2
Débit-volume spécifique (L.h¹ . m⁻²)	10 à 60	50 à 100	50 à 500	150 à 1500
Procédés concurrents	Évaporation Électrodialyse Échange d'ions	Échange d'ions Chromatographie	Précipitation chimique Chromatographie sur gel Dialyse	Centrifugation Filtration sur diatomées

D'apparence très similaire, les membranes de NF et d'OI sont toutes deux faites de multiples pellicules de polymère de polyamide semi-perméable enroulées sur un tube de plastique perforé. Pour différencier ces deux technologies il faut s'attarder à la grosseur des pores de chaque membrane. Les membranes de nano-filtration ont des pores d'environ 1 nm et utilise des pressions d'opération entre 10 à 40 bar pour pousser l'eau à travers les membranes. Dû à la grosseur de ses pores, la nano-filtration (NF) est recommandée pour

traiter des eaux de surface et des eaux souterraines ayant un total de matières dissoutes bas. Les membranes de nano-filtration enlèvent efficacement les virus, les bactéries et les solides en suspension ne laissant que l'eau et les ions. Les membranes d'osmose inverse ont, quant à elles, des pores plus petits, d'environ 0.1 nm et nécessitent des pressions d'opération plus élevées, soit entre 30 à 80 bars rendant ce procédé extrêmement efficace. Avec des pores si petits et des pressions d'opération si élevées, certaines membranes d'OI peuvent rejeter tout ce qui se trouve dans l'eau, à l'exception de l'eau elle-même (figure 1.5), produisant ainsi une eau presque pure. Certaines applications nécessitent une reminéralisation afin d'éviter la corrosion des équipements de filtration suivant l'osmose inverse.

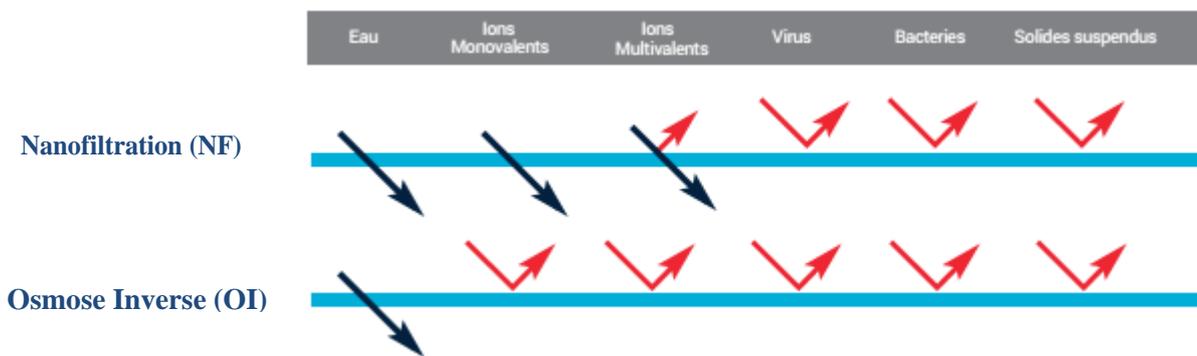


Figure 1.5. Les constituants retenus par nanofiltration et osmose inverse [15].

La sélection de la technologie de filtration membranaire appropriée est grandement influencée par la source d'eau brute, l'application, la qualité d'eau nécessaire et parfois par les coûts associés aux opérations et à l'entretien du système.

1.5 Comparaison entre osmose inverse et nano-filtration

L'OI et NF sont des alternatives aux technologies de traitement conventionnelles. Ces techniques sont devenues plus efficaces et abordables ces dernières années, elles sont de plus en plus adoptées comme des alternatives plus compactes, efficaces et respectueuses de l'environnement aux chaînes de traitement conventionnelles [16].

1.5.1 Similitude entre OI et NF

L'OI et NF sont des technologies de filtration membranaire dans lesquelles une pression est appliquée à un flux liquide, le faisant passer à travers une membrane semi-perméable afin d'éliminer les solides dissous. De cette façon, OI/NF ressemble étroitement à d'autres formes de filtration membranaire, y compris la microfiltration (MF) et l'ultrafiltration

(UF), tout en étant capable d'éliminer des molécules encore plus petites, telles que les matières organiques dissoutes, les pesticides et les produits chimiques agricoles [16].

1.5.2 Prétraitement de l'OI et NF

Avec les pores les plus petits de toutes les membranes de filtration, les membranes OI et NF peuvent s'encrasser rapidement si les particules les plus grosses ne sont pas éliminées par les technologies de filtration en amont, telles que MF/UF. Le prétraitement des flux de processus pour éliminer ces particules problématiques peut également réduire la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir une pression adéquate dans un système OI/NF. Lorsque les flux de processus sont suffisamment prétraités, les membranes OI/NF peuvent avoir une longue durée de vie avec peu d'entretien [16].

1.5.3 En quoi OI/NF sont différents

- Ils peuvent être distingués en fonction de la taille des particules que chacun est capable d'éliminer.
- La technique membranaire par nano-filtration est une technique sélective qui cible principalement les ions divalents [16].

1.6 **Les configurations des membranes**

Il existe plusieurs types de configuration (géométries) et de manières dont la membrane est montée et orientée par rapport à l'écoulement de l'eau. Cette configuration est cruciale pour déterminer la performance globale du processus. Les modules membranaires couramment utilisés sont : le module plan, le module tubulaire, le module spiralé et le module à fibres creuses [16]. À partir de ces configurations de base, des modules dérivés sont mis sur le marché, comme les modules vibrants ou les modules en fibres creuses immergées [9].

Les modules les plus utilisés actuellement dans le domaine de l'eau potable sont les modules à fibres creuses (UF et MF) et les modules spiralés (NF et OI) [6].

1.6.1 Les modules spiralés

Les feuilles de membranes planes sont empilées et enroulées autour d'un collecteur de perméat (figure 1.6). Cette configuration se rencontre principalement dans le dessalement de l'eau. Leur compacité est importante (de l'ordre de $900 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$) mais pour les eaux turbides, un prétraitement est nécessaire pour éviter tout encrassement. Ce type de modules est utilisé uniquement en NF et OI [5].

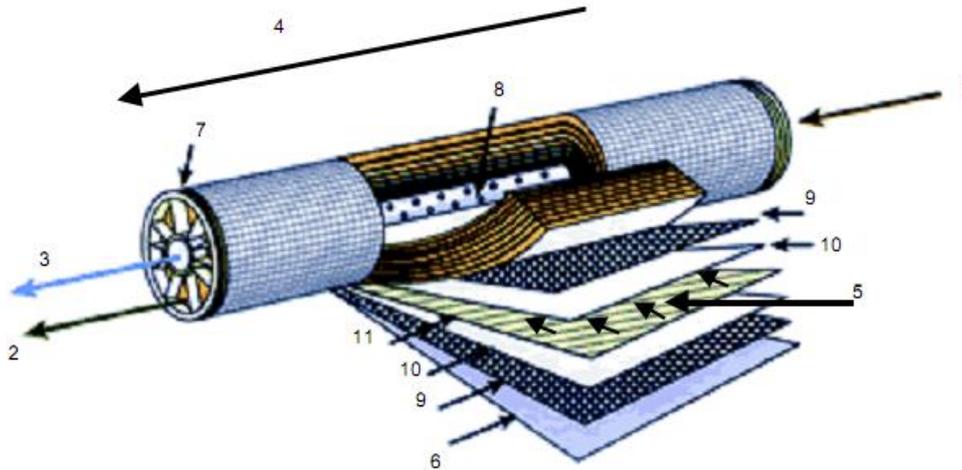


Figure 1.6. Structure interne d'une membrane à spirale (d'après Degrémont – 1989) [10].

1.7 Les Avantages et inconvénients des procédés membranaires

1.7.1 Les avantages des techniques à membranes

Les avantages des techniques à membranes se résument comme suit [11] :

– Elles opèrent à température ambiante en général, d'où l'absence de dénaturation des molécules fragiles telles que les protéines et le respect des qualités organoleptiques grâce à l'absence de choc thermique.

– La séparation est fondée sur des critères physiques (diamètres de pores) et ne fait pas intervenir de réactifs chimiques comme extractant (solvants, acides, bases...), réactifs qui sont, en général, une source importante de pollution.

Ainsi, dans le cas de la déminéralisation de l'eau, l'osmose inverse présente un avantage par rapport à l'échange d'ions qui produit des quantités importantes d'effluents.

– Elles ne font pas intervenir de changement de phase, il n'y a donc pas d'enthalpie à fournir, ce qui permet, par rapport à l'évaporation, d'être plus économe en énergie.

– Les procédés peuvent fonctionner en continu et sont simples et faciles à automatiser, du moins en principe.

– Une eau produite de qualité constante en termes d'élimination des particules et des microbes, indépendamment de la qualité de l'eau d'alimentation.

– Les installations sont compactes.

– De plus, ces procédés membranaires sont des techniques de séparation peu consommatrices d'énergie : de 1 à quelques dizaines de kWh/m³ de produit traité, suivant la taille des composés qui doivent être séparés. Leur consommation énergétique est faible (quelques kWh/m³ de perméat) par rapport à des procédés thermiques (de 100 à 900 kWh/m³ de produit traité pour un évaporateur, avec ou sans effets multiples).

1.7.2 Les inconvénients des techniques à membranes

Les principaux inconvénients des techniques à membranes sont :

– Le colmatage des membranes, qui se traduit, en général, par une baisse de la perméabilité et une modification de la sélectivité qui n'est pas toujours souhaitable.

– Sélectivité imparfaite des membranes : elle n'est jamais égale à 100 % sauf dans certains cas en microfiltration. De plus, en ultrafiltration industrielle, la séparation ne se fait dans de bonnes conditions que pour des molécules ayant un rapport de masses moléculaires sur seuil de coupure supérieur ou égal à 10.

– Durée de vie des membranes limitée, soit par perte de résistance mécanique, soit par suite d'une mauvaise tenue aux réactifs utilisés pour le nettoyage.

Les procédés de filtration membranaire permettent d'assurer certaines fonctions dans les procédés de séparation et ont ainsi trouvé une place dans l'éventail des solutions techniques qui s'offre à un ingénieur qui conçoit et optimise des installations de séparation. Le développement de ce procédé qui met en œuvre des phénomènes complexes exige de la maîtrise pour garantir des performances élevées en termes de perméabilité et de sélectivité. Par ailleurs, il est nécessaire d'avoir toujours à l'esprit que l'on profite d'autant mieux des avantages des procédés membranaires que ces procédés sont couplés à d'autres procédés.

1.8 **Limites des procédés de filtration membranaire**

1.8.1 Le colmatage

Le frein principal au développement des procédés membranaires réside dans l'altération des capacités de production des membranes : le colmatage, qui découle de l'accumulation de matière à la surface des membranes.

Quand un système fonctionne à pression transmembranaire constante, le colmatage se traduit par une diminution du flux de perméation dans le temps. Lors d'opérations menées à

flux constant, comme le sont le plus souvent les opérations de traitement de l'eau, la conséquence directe est une augmentation de pression.

Quel que soit le mode opératoire utilisé, d'autres conséquences découlent de cette accumulation de matière, qu'il s'agisse d'une diminution de la durée de vie des membranes du fait de lavages plus fréquents, des dépenses supplémentaires d'énergie liées à l'augmentation de la résistance au transfert ou encore des pertes en eaux occasionnées lors des séquences de décolmatage [5].

Ainsi, le colmatage, au sens large du terme, constitue la principale limitation des opérations de filtration. A ce titre, ce sujet a fait l'objet de nombreux travaux de recherche visant à identifier les mécanismes, les modéliser et amener des éléments pour pouvoir les limiter. [5]. De nombreuses stratégies sont développées face à ce problème, l'une consiste à rechercher le meilleur compromis membrane/fluide (adsorption minimisée, taille des pores adaptée à la taille des solutés retenus), une autre à ajuster les conditions opératoires de manière à réduire le colmatage en régime établi, et une troisième stratégie peut consister à perturber périodiquement le système de manière à éviter le développement du colmatage. Enfin il est nécessaire de procéder périodiquement à des nettoyages chimiques [11].

Chapitre 2

Méthodologie

Le traitement des eaux souterraines (puits) dans les zones arides tel que le Niger, est une alternative propre au développement durable et économique. L'enjeu principal est l'approvisionnement en eau potable et par conséquent une sécurité hydrique d'une grande partie du pays. Les techniques de traitement membranaire permettent de servir les objectifs d'une stratégie de sécurité hydrique, cependant la faisabilité et le succès d'un tel procédé est fortement lié à un compromis technico-économique. L'objectif principal de ce mémoire est la réalisation d'une série de simulation systématique de traitement de l'eau de puits du Niger par la technique d'osmose inverse et la nano-filtration, afin d'obtenir une eau de qualité a consommation. Le logiciel utilisé pour la réalisation de cette simulation est le logiciel "WAVE : *Water Application Value Engine*" de l'industrie DUPONT *Water Solutions*.

Notre travail consiste dans un premier temps à sélectionner (criblage) les membranes RO et NF les plus efficaces pour la production d'eau souhaitée ; par la suite ; nous nous sommes focalisés sur la configuration optimale pour l'osmose inverse et la nano-filtration. Le but ultime étant la comparaison de la faisabilité de production d'eau de qualité entre l'osmose inverse et la nano-filtration à partir de l'eau de puits.

2.1 Présentation du logiciel WAVE

WAVE " Water Application Value Engine" produit par DUPONT Water Solutions (lancé par Dow Water et Process Solutions), est un logiciel de conception multi-technologies qui permet de réduire le temps nécessaire pour concevoir des systèmes de traitement d'eau, augmenter la productivité et optimiser les performances des systèmes. Ce nouveau logiciel permet de définir, réinitialiser et calculer les conceptions d'installations en quelques clics. Wave estime les performances des technologies d'ultrafiltration, d'osmose inverse et d'échange d'ions dans les systèmes de traitement d'eau, individuellement ou dans diverses combinaisons multi-technologiques. Ce nouvel outil gratuit permettra aux ingénieurs du monde entier de concevoir des solutions différenciées et optimisées plus rapidement et précisément. Le logiciel calcule par exemple des algorithmes améliorés et homogènes et des données harmonisées, ainsi qu'une estimation des coûts d'élimination des produits chimiques,

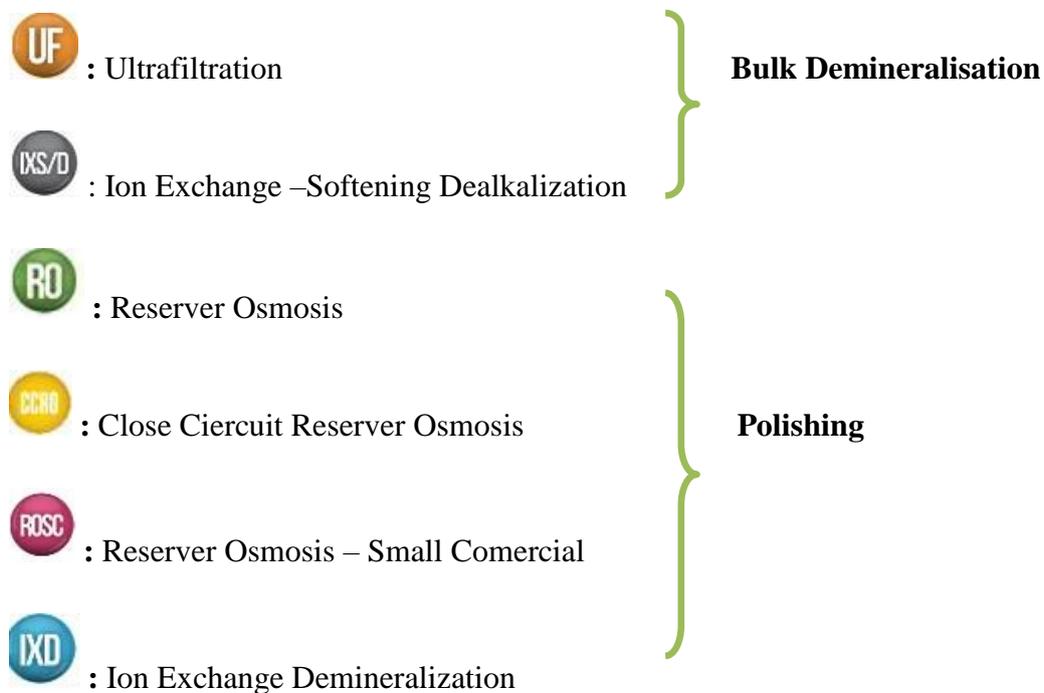
de l'électricité, de l'eau d'alimentation et des eaux usées pour permettre aux clients d'adopter des solutions plus durables et moins coûteuses. De plus, le logiciel fournit des informations techniques détaillées comme les volumes et les flux de bilan massique réels qui reflètent les changements de densité dus à la température, la composition de l'eau et la compressibilité de l'eau. Version actualisée de l'ancien logiciel de Dow, ce logiciel optimisé comprend le logiciel Rosa et permet de regrouper plusieurs technologies dans une interface commune.

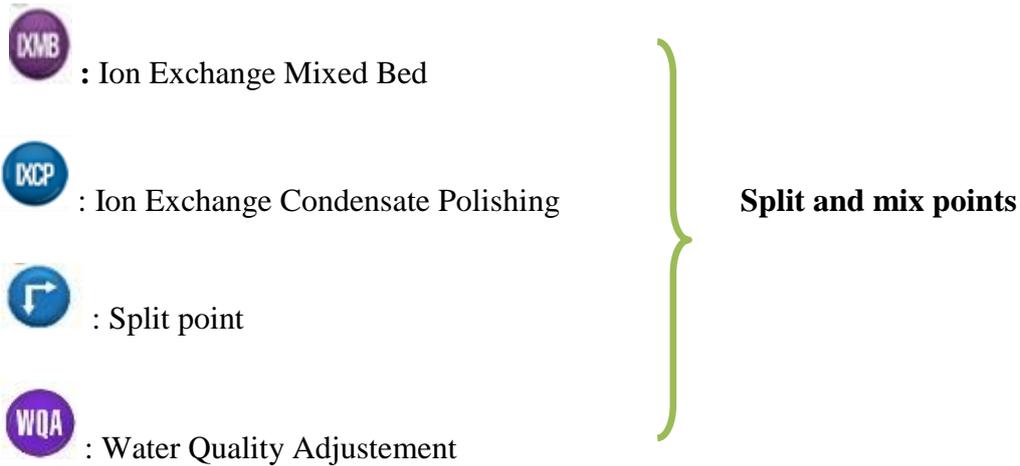
Parmi les avantages de ce logiciel :

- L'utilisation de trois technologies principales en combinaison ainsi que des technologies connexes.
- L'utilisation d'algorithmes améliorés et efficaces.
- Interface simple et prise en main rapide des processus de traitement.
- Présence de base de données pour tous les produits et processus.

2.2 Les technologies de traitement d'eau du logiciel WAVE

Les technologies de traitement d'eau par le logiciel wave sont résumées comme suit :





2.3 Les équations de conception d'un système RO sur logiciel WAVE

Les performances d'un système RO sont définies par sa pression d'alimentation (ou débit de perméat, si la pression d'alimentation n'est pas précisée) et son passage de sel. Dans ses termes les plus simples, le flux de perméat Q à travers une membrane RO est directement proportionnel à la surface mouillée S multipliée par la pression motrice nette ($\Delta P - \Delta \pi$). La constante de proportionnalité est le coefficient de perméabilité membranaire (A).

L'équation familière de la perméation de l'eau s'écrit sous la forme :

$$Q = (A) (S) (\Delta P - \Delta \pi) \quad \text{Eq.1}$$

Le passage du sel se fait par diffusion, le flux de sel N_a est donc proportionnel à la différence de concentration en sel entre les deux côtés de la membrane. La constante de proportionnalité est le coefficient de diffusion du sel, noté B .

$$N_a = B (C_{FC} - C_p) \quad \text{Eq.2}$$

Avec:

C_{fc} = concentration moyenne du concentrât d'alimentation

C_p = concentration du perméat

Le tableau 2.1 et 2.2 regroupent les différentes équations de conception d'un système RO sur logiciel WAVE

Tableau 2.1. Les équations de conception pour projeter les performances du système d'osmose inverse : performances des éléments individuels.

Objet/Equations	Eq
Flux de perméat :	$Q_i = A_i \bar{\pi}_i S_E(TCF)(FF) \left(P_{fi} - \frac{\Delta P_{fci}}{2} - P_{pi} - \bar{\pi} + \pi_{pi} \right)$ 3
Pression osmotique moyenne coté concentrât :	$\bar{\pi} = \pi_i \left(\frac{\bar{C}_{fc}}{C_f} \right) \bar{p}_f$ 4
Pression osmotique moyenne coté perméat :	$\bar{\pi} = \pi_i (1 - R_i)$ 5
Rapport : moyenne arithmétique côté concentrât pour alimenter la concentration pour l'élément :	$\frac{C_{fci}}{C_{fi}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C_{ci}}{C_{fi}} \right)$ 6
Rapport : concentrât pour alimenter la concentration pour l'élément i :	$\frac{C_{ci}}{C_{fi}} = \frac{1 - Y_i(1 - R_i)}{(1 - Y_i)}$ 7
Pression osmotique de l'eau d'alimentation :	$\pi_f = 1.12(273 + T) \sum m_i$ 8
Facteur de correction de température pour membrane RO et NF :	$TCF = EXP \left[2640 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{298+T} \right) \right]; T \geq 25^\circ\text{C}$ 9
	$TCF = EXP \left[3020 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{298+T} \right) \right]; T \geq 25^\circ\text{C}$ 10

Facteur de polarisation de concentration pour les éléments de 8 pouces :

$$pf_i = EXP[0.7Y_i] \quad 11$$

Récupération du système :

$$Y = 1 - [(1 - Y_1)(1 - Y_2)(1 - Y_n)] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i) \quad 12$$

Concentration du perméat :

$$C_{pj} = B(C_{fcj})(pf_i)(TCF) \frac{S_E}{Q_i} \quad 13$$

Tableau 2.2. Les équations de conception pour projeter les performances du système OI: performances moyennes du système.

Objet/Equations

Eq

Débit total de perméat :

$$Q = N_E S_E \bar{A} \bar{\pi} (TCF) (FF) \left[P_f - \frac{\Delta P_{fc}}{2} P_p - \pi_f \right] \left[\frac{C_{fc}}{C_f} p_f - (\bar{1} - \bar{R}) \right] \quad 14$$

Rapport : concentration moyenne entre le côté concentrât et la charge du système :

$$\frac{C_{fc}}{C_f} = \frac{-\bar{R} \ln(1 - Y/Y_L)}{Y - (1 - Y_L) \ln(1 - Y/Y_L)} + (1 - \bar{R}) \quad 15$$

Limitation de la récupération du système :

$$Y_L = 1 - \frac{\pi_f(\bar{p}_f)(\bar{R})}{p_f - \Delta P_{fc} - P_P} \quad 16$$

Rapport approximatif log moyen de la concentration côté concentrât sur alimentation pour le système :

$$\frac{C_{fc}}{C_f} = - \frac{\ln(1 - Y)}{Y} \quad 17$$

Récupération moyenne des éléments :

$$Y_i = 1 - (1 - Y)^{1/n} \quad 18$$

Facteur de polarisation moyen : $\overline{pf} = EXP[0.7\overline{Y}_i]$ 19

Pression osmotique moyenne côté concentrât :

$$\overline{\pi} = \pi_i \left(\frac{C_{fc}}{C_f} \right) \overline{pf} \quad 20$$

Chute de pression moyenne du système côté concentrât pour les éléments de 8 pouces,
2 étapes :

$$\overline{\Delta P_{fc}} = 0.04 \overline{q_{fc}^2} \quad 21$$

$$\Delta P_{fc} = \left[\frac{0.1(Q/1440)}{YNV_2} \right] \left(\frac{1}{NVR} + 1 - Y \right) \quad 22$$

$$\Delta P_{fc} = 0.01 n \overline{q_{fc}^{1.7}} \quad 23$$

Élément individuel de 8 pouces ou chute de pression côté concentrât
à un étage :

$$\overline{A}(\pi) = 0.125; \pi \leq 25 \quad 24$$

$$\overline{A}(\overline{\pi}) = 0.125 - 0.011 \left(\frac{\overline{\pi} - 25}{35} \right); 25 \leq \overline{\pi} \leq 200 \quad 25$$

$$\overline{A}(\overline{\pi}) = 0.070 - 0.0001(\overline{\pi} - 200); 200 \leq \overline{\pi} \leq 400 \quad 26$$

Perméabilité de la membrane en fonction de la pression osmotique moyenne côté
concentrât

$$C_p = BC_{fc} \overline{pf} (TCF) \left(\frac{N_{ESE}}{Q} \right) \quad 27$$

Le tableau 2.3 présente la définition des différents symboles et abréviations du logiciel.

Tableau 2.3. Symboles et abréviations.

Q_i : flux de perméat de l'élément	$\sum j$: Somme de toutes les espèces ioniques
$A_i \pi_i$: perméabilité de la membrane à 25°C pour l'élément i , fonction de la pression osmotique moyenne côté concentré (gfd/psi)	Y : récupération du système (exprimée en fraction) = débit de perméat/débit d'alimentation
S_E : surface de membrane par élément	$\prod_{i=1}^n$: multiplication de n éléments dans une série
TCF : facteur de correction de température pour la perméabilité de la membrane	N_E : nombre d'éléments dans le système
FF : facteur d'encrassement de la membrane	Q : débit de perméat du système
P_{fi} : pression d'alimentation de l'élément i	n : nombre d'éléments dans le système
ΔP_{fci} : chute de pression côté concentré pour l'élément i (psi)	\bar{Q}_i : débit de perméat moyen de l'élément (gpd) = Q/N_E
P_{pi} : pression de perméat de l'élément	\bar{A}_π : perméabilité moyenne de la membrane à 25°C : fonction de la pression osmotique moyenne côté concentré
$\bar{\pi}_i$: pression osmotique côté concentré de récupération (psi)	\bar{C}_{fc} : concentration moyenne côté concentré pour le système (ppm)
π_{fi} : pression osmotique de l'élément i	\bar{R} : rejet fractionnel moyen de sel pour le système
π_{pi} : pression osmotique côté perméat de l'élément i	$\bar{\pi}$: pression osmotique moyenne côté concentré pour le système (psi)
P_{fi} : facteur de polarisation pour l'élément i	$\Delta \bar{P}_{fc}$: chute de pression moyenne du système côté concentré (psi)
R_i : fraction de rejet de sel pour l'élément i = $\frac{\text{debit concentrat} - \text{debit perméat}}{\text{debit concentrat}}$	Y_L : limitation (maximum), récupération du système (exprimée en fraction)
C_{fci} : concentration moyenne côté concentré pour élément i (ppm)	\bar{Y}_i : récupération moyenne des éléments (exprimée en fraction)
C_{fi} : concentration d'alimentation pour l'élément i (ppm)	\bar{p}_f : facteur de polarisation de la concentration moyenne
C_{ci} : concentration de concentré pour	\bar{q}_{fc} : débit arithmétique moyen côté concentré

l'élément i (ppm)	(gpm)[(1/2)(débit d'alimentation +débit du concentrât)]
Y_i : fraction de récupération pour l'élément i	N_V : nombre de récipients sous pression à six éléments dans le système ($\approx NE/6$)
π_f : pression osmotique de l'eau d'alimentation traitée (psi)	N_{V1} : nombre d'appareils sous pression dans le premier étage d'un système à 2 étages ($\approx 1/3 N_V$)
T : température de l'eau d'alimentation (°C)	N_{V2} : nombre d'appareils sous pression dans le deuxième étages d'un système à 2 étages ($\approx N_V/3$)
m_j : concentration molaire de la j ème espèce ionique	N_{VR} : rapport d'étage ($=N_{V1}/N_{V2}$)

2.4 Les Interfaces du logiciel WAVE

Commencez par lancer le logiciel WAVE. Vous devriez voir quelque chose de similaire à la figure 2.1.

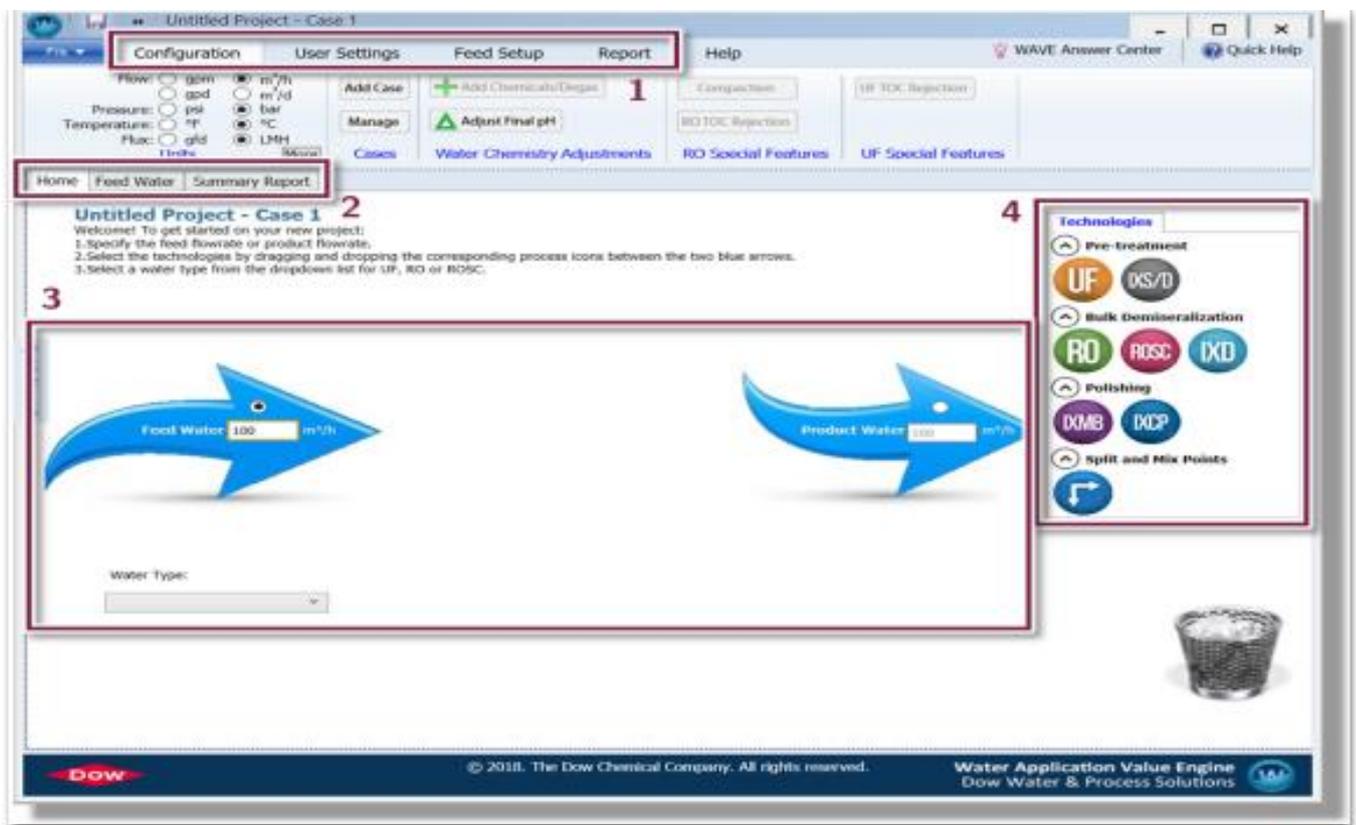


Figure 2.1. L'interface d'écran d'accueil du logiciel WAVE.

Afin de créer et d'exécuter une simulation WAVE, vous devez connaître quatre sections principales de fonctionnalités :

1. Les onglets de la barre de menus : en haut de l'écran, vous pouvez ajuster une variété de paramètres et de préférences de simulation.
2. Les onglets des paramètres du projet : sous la barre de menu, ces onglets vous permettent d'ajuster les paramètres par rapport à votre projet en cours et de visualiser les résultats de la simulation.
3. La feuille de production du projet : lorsque l'ongle d'accueil est sélectionné, la feuille de travail du projet s'affiche. Contrairement à des programmes tels qu'Aspen ou Pipe-Flo, la feuille de production de Wave est un schéma fonctionnel. Il n'existe que pour indiquer quelles technologies de traitement seront utilisées et dans quel ordre elles seront utilisées. Les spécifications de fonctionnement exact de ces « blocs » peuvent être ajustées en temps voulu.
4. Les technologies de traitement : les processus qui peuvent être modélisés par WAVE sont situés à droite de la feuille de travail du projet. Ces technologies peuvent être ajoutées en les glissant-déposant entre les flèches Feed Water et Product Water. Ils peuvent être réorganisés de la même manière ou supprimés de la même manière.

Le logiciel Wave est simple à la manipulation, il ne nécessite pas beaucoup de paramètres d'entrée (input) et permet de générer des résultats très fiables.

Connaissant la qualité de l'eau à traiter, tel que le débit (soit le débit d'entrée à la membrane, ou le débit de sortie), la composition ionique, la nature de l'eau, la température, le pH et enfin la turbidité (ce qui fait que cet outil informatique soit performant et précis) : on peut procéder à l'utilisation du logiciel. Cependant, on peut soigneusement choisir la nature de l'eau à traiter c'est-à-dire : une eau de puits, un perméat, une eau adoucie, des eaux municipales, des eaux de surface, des eaux de mer ou des rejets. De plus, le Wave possède une base de données actualisée sur les membranes (RO, NF et UF), ce qui permet d'effectuer une simulation sur une large gamme de membrane avec des caractéristiques variées et de ce fait, choisir la membrane la plus adéquate selon les objectifs et les besoins.

Les figures 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4 illustrent respectivement l'interface du logiciel pour le choix de la technologie, l'introduction des caractéristiques de l'eau à traitée et enfin la configuration de l'unité.

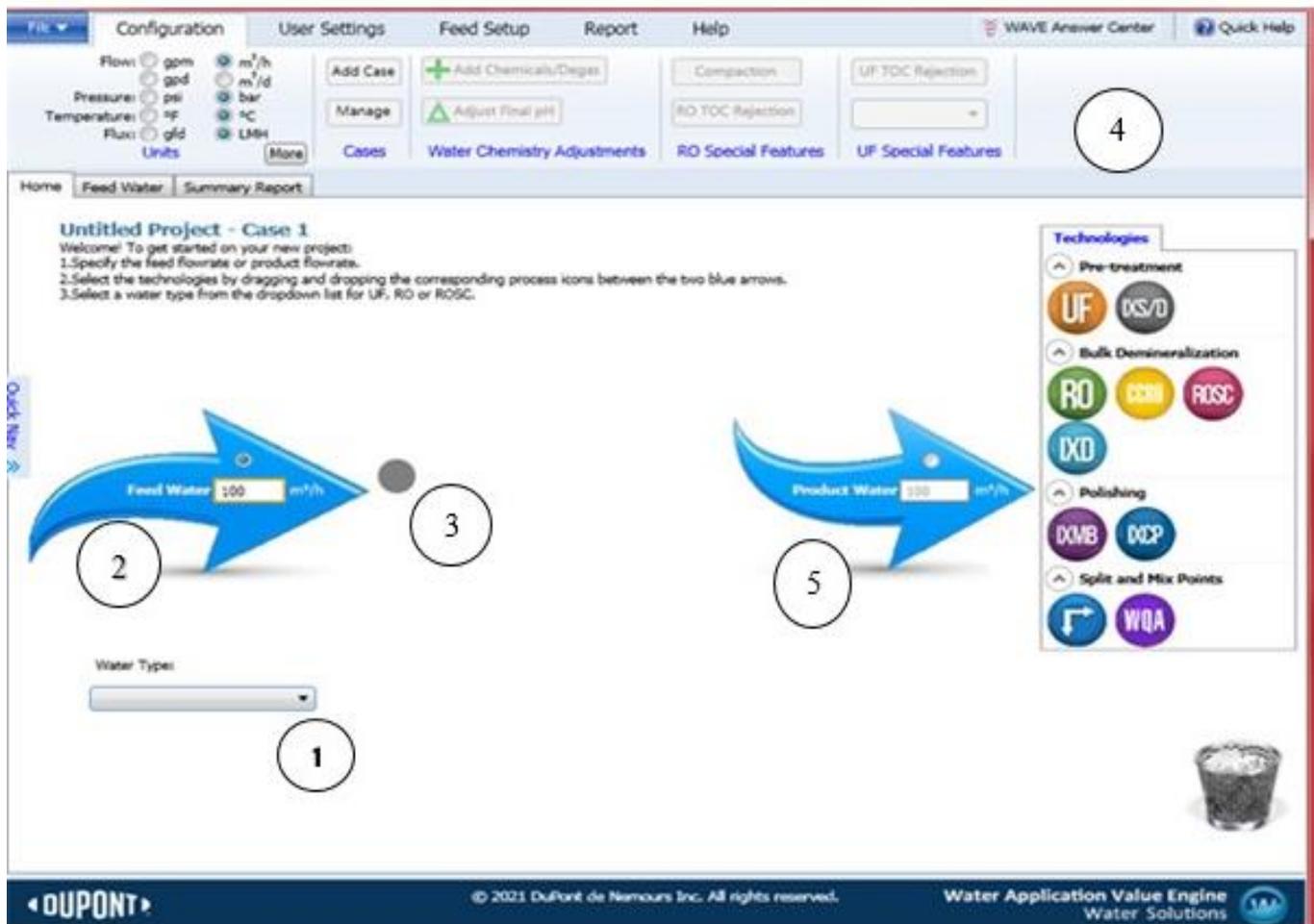


Figure 2.2. Le choix de la technologie, du débit et du type d'eau.

1. Type d'eau
2. Débit d'entrée
3. Zone d'insertion du type de traitement
4. Panneau de configuration
5. Débit de sortie

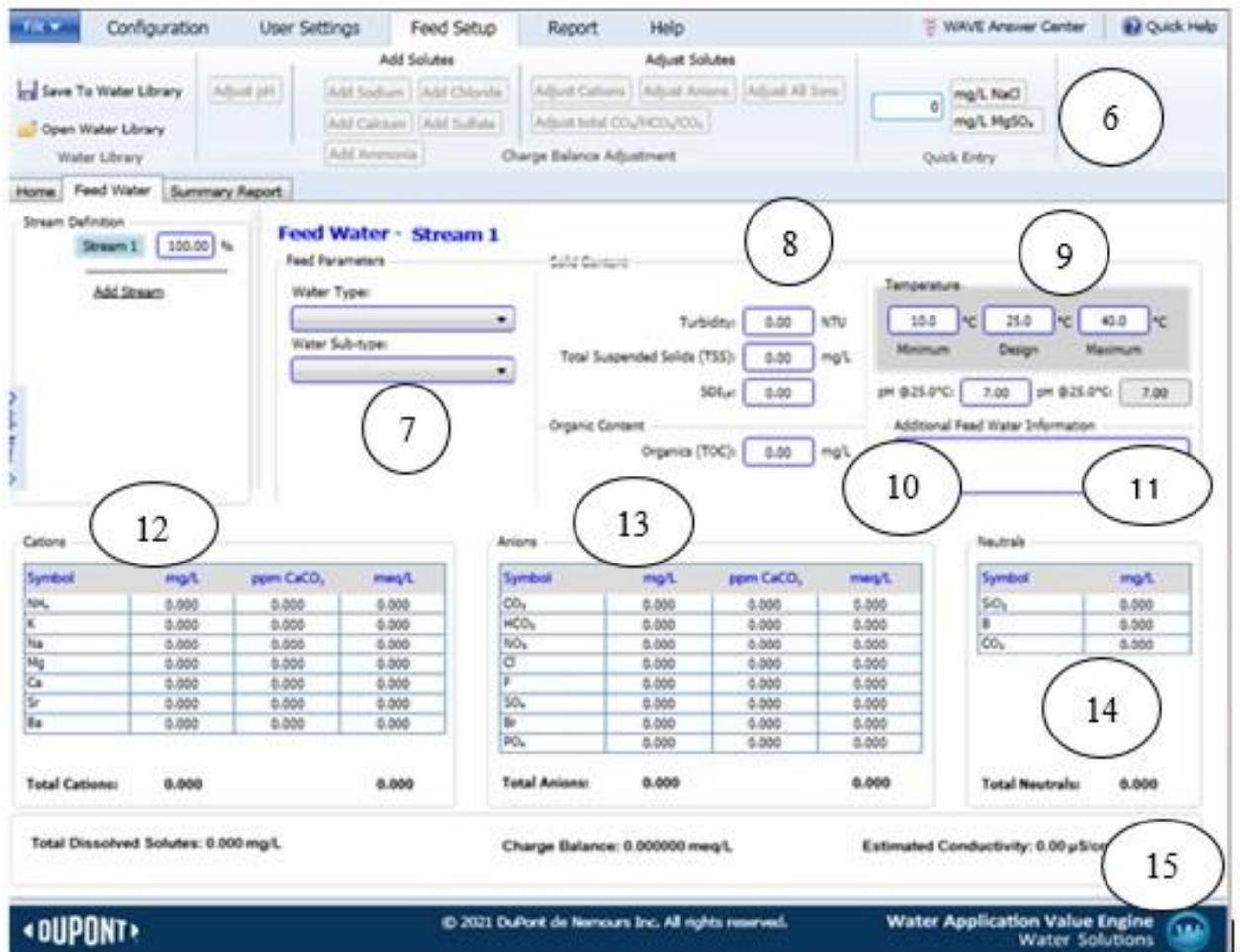


Figure 2.3. Les caractéristiques de l'eau d'alimentation.

6. Paramètres d'ajustements de l'équilibre de l'eau
7. Type d'eau
8. Caractéristiques de l'eau (TSS, Turbidité et SDI)
9. Températures
10. TOC de l'eau
11. PH de la solution
12. Concentrations des cations
13. Concentrations des anions
14. Concentrations des ions neutres
15. Conductivité et balance de l'eau.

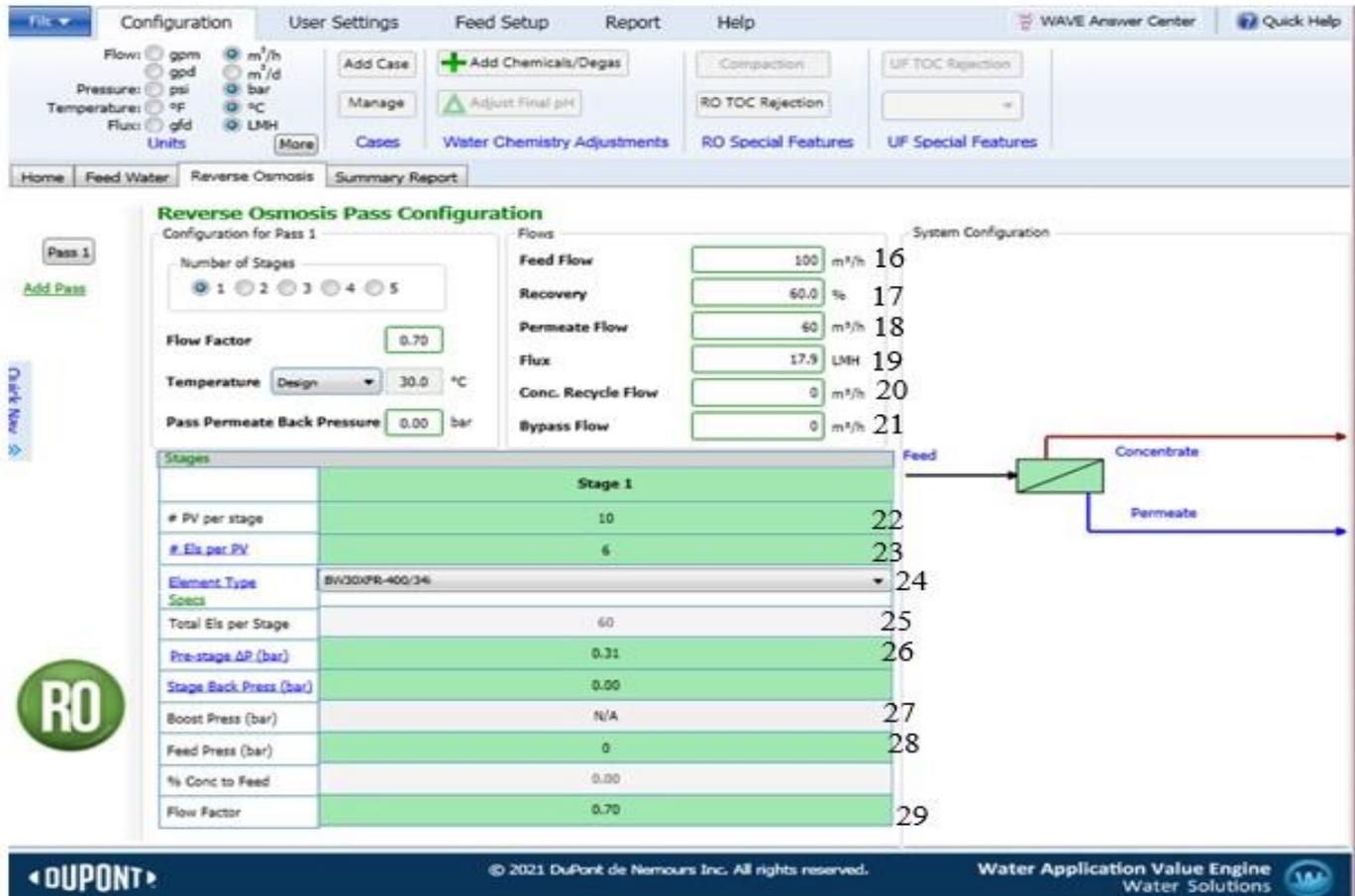


Figure 2.4. Le choix des membranes et configuration de l'unité.

- 16. Débit d'alimentation
- 17. Débit de perméat
- 18. Conc. Recycle Flow : débit de concentrât recycler
- 19. Nombre de module
- 20. Type de la membrane
- 21. Perte de pression par étage
- 22. Pression d'alimentation
- 23. Taux de conversion
- 24. Flux : débit de perméat LMH
- 25. Débit de reminéralisation
- 26. Nombre de membrane par module
- 27. Nombre total des membranes
- 28. Pression de perméat
- 29. Facteur de flux

2.5 Simulation par WAVE

Les étapes de simulation par le logiciel wave peuvent être résumées comme suit :

Etape 1 : choisir la technologie de traitement.

Etape 2 : spécifier le type d'eau à traiter.

Etape 3 : faire entrer les paramètres du flux d'alimentation et la composition ionique

Etape 4 : dimensionnement. Vous pouvez au cours de cette étape spécifier des paramètres tels que le flux de perméat, le nombre d'étages...

Etape 5 : lancement de calcul.

Une fois que la simulation converge, un rapport sur les performances du système est affiché. Il comprend, les débits dans chaque flux, les pressions, les récupérations, les concentrations d'ions calculées et les résultats de chaque étape ou passe.

2.5.1 Système d'avertissement (warning system)

WAVE émet des avertissements lorsqu'un ou plusieurs paramètres calculés sont en dehors des spécifications recommandées (figure 2.5). On peut avoir deux types d'avertissement :

- Avertissements de conception, par exemple les débits.
- Avertissements associés au dépassement de la limite de solubilité, dans certains cas, les concentrations d'ions peuvent dépasser les limites de solubilité de l'espèce.

RO Design Warnings

Design Warning		Limit	Value	Pass	Stage	Element	Product
Permeate Flow Rate > Maximum Limit	(m ³ /h)	1.58	1.87	1	1	1	XLE-440
Permeate Flow Rate > Maximum Limit	(m ³ /h)	1.58	1.74	1	*1	2	XLE-440
Permeate Flow Rate > Maximum Limit	(m ³ /h)	1.58	1.61	1	1	3	XLE-440
Element Recovery > Maximum Limit	(%)	19.0	20.7	1	1	5	XLE-440
Element Recovery > Maximum Limit	(%)	19.0	23.0	1	1	6	XLE-440

Tableau 2.4. Avertissement émis par le logiciel wave.

2.6 Les caractéristiques de l'eau à traiter (eau de puits du Niger) [2]

2.6.1 Les paramètres d'alimentations

Les paramètres d'alimentation représentent les données nécessaires à la faisabilité de la simulation. Le tableau 2.4 regroupe les spécifications du flux d'alimentation.

Tableau 2.5. Les paramètres du flux d'alimentation

Paramètre	Valeur
La turbidité NTU	0.65
Matières en suspension totales (TSS) mg/l	0.00
L'indice de colmatage	1
Carbone organique total mg/l	0.00
La température maximum °C	40
La température minimum °C	10
La température de design °C	25
PH	7.04

2.6.2 La composition ionique

Propre à chaque commune la composition chimique de l'eau varie. Le tableau 2.5 rassemble la compositions ionique de l'eau à traiter.

Tableau 2.6. La composition ionique de flux d'alimentation (avant et après ajustement)

Les données entrées **avant l'ajustement** avec le logiciel

Alimentation		Concentration (mg/l)
Cations	K ⁺	1.2
	Ca ²⁺	1.2
	Na ⁺	347.688
	Mg ²⁺	0.24
Anions	CO ₃ ²⁻	0.414
	HCO ³⁻	380.00
	Cl ⁻	347.688
	F ⁻	6.45
	SO ₄ ³⁻	110.000
Neutres	CO ₂	47.266
Total anions		854.572
Total cations		350.528
Total neutres		47.266
TDS		1205.102

Des données du tableau ci-dessous nous donne les résultats obtenus **après l'ajustement** de tous les ions sur le logiciel

Alimentation		Concentration (mg/l)
Cations	K ⁺	1.307
	Ca ²⁺	1.307
	Na ⁺	393.541
	Mg ²⁺	0.523
Anions	CO ₃ ²⁻	0.383
	HCO ³⁻	330.487
	Cl ⁻	331.810
	F ⁻	5.877
	SO ₄ ³⁻	101.005
Neutres	CO ₂	36.746
Total anions		773.234
Total cations		396.678
Total neutres		36.746
TDS		1169.915

2.7 Sélection des membranes

La sélection de la membrane consiste à déterminer la membrane la plus efficace en termes de réduction de la salinité totale d'une eau définie.

Les principaux critères de sélection des membranes sont :

- ❖ Une énergie spécifique la plus faible,
- ❖ Nombre de stage (numéro de membrane) le plus faible,
- ❖ Un taux de conversion élevé,
- ❖ Une pression d'alimentation la plus faible.

Dans ce travail, on a eu recours à deux types de séparation à savoir l'osmose inverse et la nano-filtration dans le but de produire une eau potable de qualité avec un TDS du perméat de 500 mg/l

2.7.1 Criblage des membranes OI et NF

Dans un premier temps, 27 membranes de l'osmose inverse ont été présélectionnées (voir annexe 1) au préalable sur la base d'une configuration basique (un seul passe et un seul étage) avec un débit d'alimentation de 1000m³/h (figure 2.6) et d'une TDS de départ de 1169.915 mg/l. Les taux de conversion diffèrent dans chacun des cas.

Il est important de noter que les membranes présélectionnées dans le cas de l'eau de puits, pour l'osmose inverse sont : les Eco Pro, les Eco Platinum, les XLE et les BW.

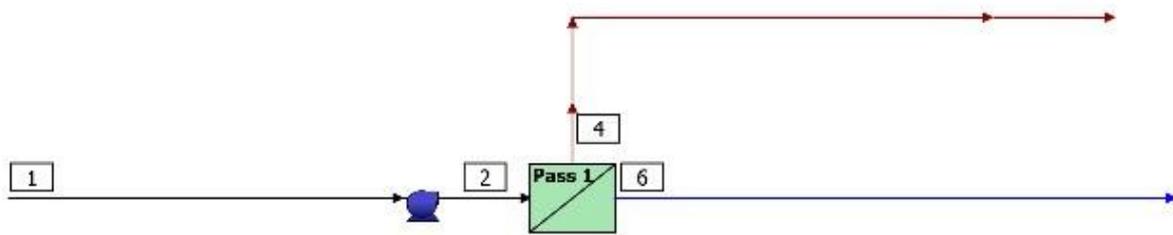


Figure 2.5. Configuration basique pour la sélection des membranes RO.

1. Eau brute
2. L'eau sous pression d'alimentation
3. Retentat
4. Perméat.

D'autre part, dans le cas de la nano-filtration, 12 membranes ont été présélectionnées (voir annexe 1) dans les mêmes conditions citées dans la partie (2.5.1). Les membranes présélectionnées sont : les NF90, NF200 et NF270.

Selon les critères précités 4 membranes ont été choisi :

- 2 membranes de l'osmose inverse la **XLE-4040** et la **XLE-440**
- 2 membranes de la nano-filtration la **NF270-440** et la **NF270-400/34i**

Les caractéristiques ainsi que les dimensions de chaque membrane sont décrit dans la section suivante.

2.7.2 Dimensionnement et caractéristiques des membranes

Le tableau 2.6 et 2.7 résumant respectivement les caractéristiques des membranes RO et NF sélectionnées pour l'étude.

Tableau 2.7. Caractéristiques des membranes RO sélectionnées.

Caractéristiques								
	S active (m ²)	Q (m ³ /j)	T max (°C)	P max (bar)	Turbidité max	SDI	PH	Rejet (%)
XLE-440	40.9	53	45.0	41	1 NTU	5	2-11	99.0
XLE-4040	8.1	9.8	45.0	41	1 NTU	5	2-11	99.0

Tableau 2.8. Caractéristiques des membranes NF sélectionnées

Caractéristiques								
	S active (m ²)	Q (m ³ /j)	T max (°C)	P max (bar)	Turbidité max	SDI	PH	Rejet (%)
NF270-440	40.9	51.7	45.0	41	1 NTU	5	3-10	97.0
NF270-440/34i	37.2	47	45.0	41	1 NTU	5	3-10	97.0

→ Les membranes RO de type XLE-440 et XLE-4040 :

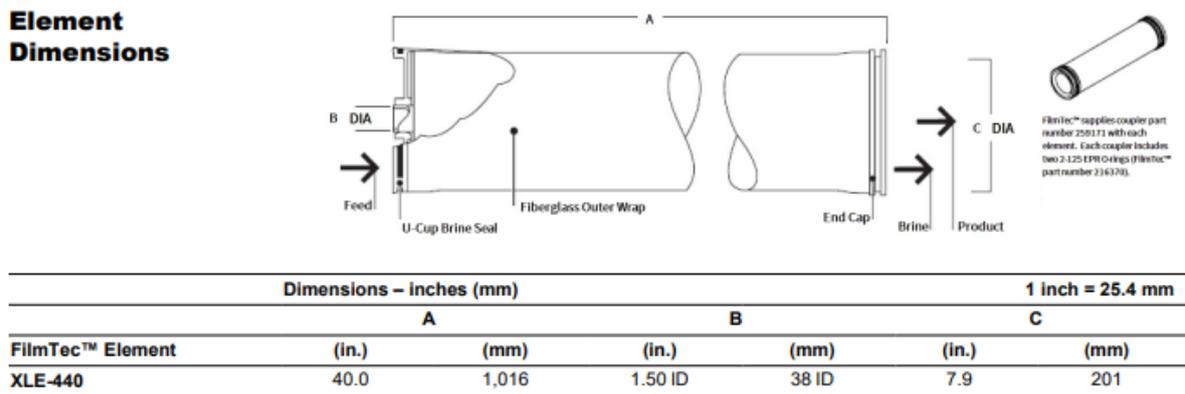
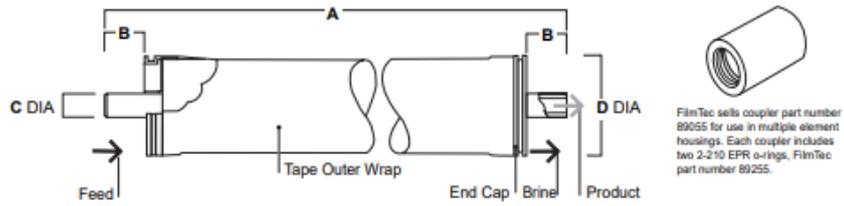


Figure 2.6. Dimensionnement d'une membrane XLE-440 [17].



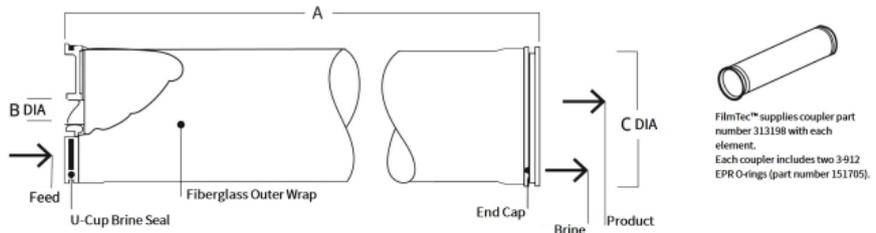
FilmTec sells coupler part number 89055 for use in multiple element housings. Each coupler includes two 2-210 EPR O-rings. FilmTec part number 89255.

Product	Dimensions - Inches (mm)			
	A	B	C	D
XLE-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)

Figure 2.7. Dimensionnement d'une membrane XLE-4040 [18].

→ Les membranes NF de type NF270-440 et NF270-440/34i :

Element Dimensions

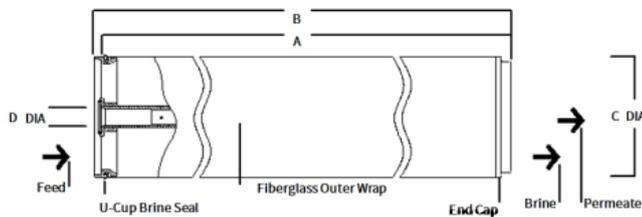


FilmTec™ supplies coupler part number 313198 with each element. Each coupler includes two 3#12 EPR O-rings (part number 151705).

FilmTec™ Element	Dimensions - inches (mm)				1 inch = 25.4 mm	
	A		B		C	
	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)
NF270-440	40.0	1,016	1.125 ID	29 ID	7.9	201

Figure 2.8. Dimensionnement d'une membrane NF270-440 [19].

Element Dimensions



FilmTec™ Element	Dimensions - inches (mm)							
	A		B		C		D	
	(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

Figure 2.9. Dimensionnement d'une membrane NF270-400/34i [20].

Les membranes sélectionnées présentent une large gamme de surface active allant de 8.1 à 40.9 m² correspondant à des débits variant de 9.8 à 53 m³/j, la température maximale de fonctionnement, la pression maximale, la SDI ainsi que la turbidité sont identiques pour toutes les membranes mais la gamme de PH diffère selon les types de techniques 2-11 pour l'osmose inverse et de 3-10 pour la nano-filtration.

Etant données que les membranes diffèrent en terme de surface active et de débits d'alimentations, il est nécessaire d'ajuster le nombre de membranes pour atteindre un débit de 1000m³/h Il est important de noter que pour chaque simulation effectuée, le nombre d'éléments (membranes) est de 6 pour chaque tube de pressions.

Le nombre d'élément est calculé en divisant le nombre de débit total sur le débit maximal que peut fournir une membrane, de même le nombre de PV (Pressur vessel) correspond au nombre d'élément divisé par 6, sachant qu'un tube de pression contient 6 éléments.

$$\text{Nombre d'element} = \frac{Q_{total}}{Q_{element}}$$

$$\text{Nombre de PV} = \frac{\text{nombre d'element}}{6}$$

Q_{total} = Débit total d'alimentation

$Q_{element}$ = Débit d'élément

PV = Nombre de tube de pression

2.8 Tests de simulation

Dans une première étape, des tests de simulations ont été réalisés afin de déterminer l'effet du taux de conversion sur la TDS, la pression d'alimentation et l'énergie spécifique. Par la suite nous avons étudié l'effet de reminéralisation, sur la TDS.

La deuxième étape consiste à déterminer la configuration optimale. Une comparaison des différentes membranes sélectionnées a été établie en considérant le cout et l'énergie spécifique.

Pour cela, trois séries de simulation ont été réalisées :

- Première série de simulation : les mêmes paramétrés d'entrée, avec un taux de conversion qui varie de 10 à 60%.
- Deuxième série de simulation : la reminéralisation, on garde les mêmes paramètres d'entrée, avec un taux de conversion de 60% pour la NF et 55% pour la RO tout en faisant évaluer la fraction du by-pass jusqu'à obtenir un TDS optimale de 500 mg/l.
- Troisième série de simulation : la détermination de la configuration optimale.

2.8.1 La reminéralisation

La reminéralisation (figure 2.11) permet d'augmenter la valeur du TDS. Pour ce faire, on garde les mêmes paramètres d'entrée tout en faisant évaluer la fraction du by-pass (de 10 à 50%) jusqu'à obtenir un TDS optimale de 500 mg/l.

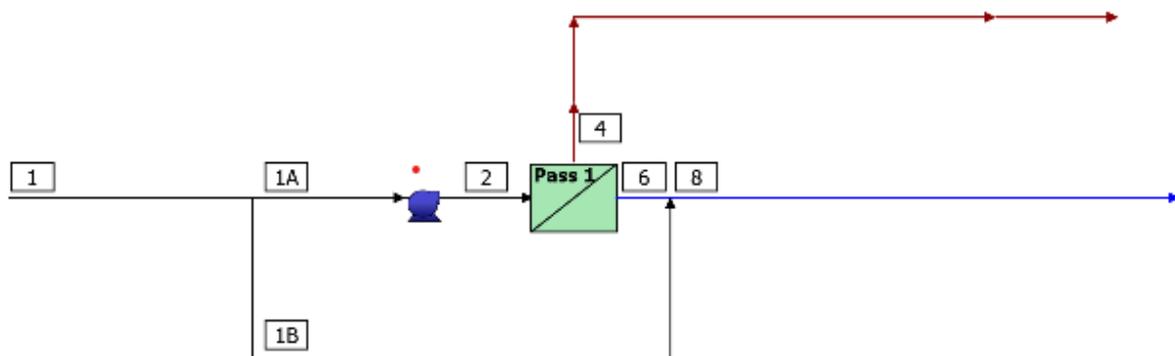


Figure 2.10. Configuration du système avec la reminéralisation.

- 1. Alimentation brute au système RO
- 2. Alimentation nette pour passer 1
- 1A. Alimentation au passage 1 après by-pass
- 1B. Reminéralisation de l'alimentation du passage 1 au perméat du passage 1
- 4. Concentrât
- 8. Production
- 6. Perméat

2.8.2 Configuration optimale

Afin de sélectionner la configuration optimale nous avons considéré deux paramètres, le nombre d'étage et by-pass. Pour ce faire :

- On fixe, le taux de conversion à 70% tout en faisant varier le nombre d'étage prenant en compte l'énergie spécifique, le nombre d'élément, le débit de sortie et l'apparition d'un warning system
- On fait une reminéralisation avec une fraction de 30% pour l'osmose inverse et 10% pour la nano-filtration pour atteindre la TDS souhaité (500mg/l).

On note les trois configurations suivantes :

Configuration 1 (1 étage),

Configuration 2 (2 étages),

Et configuration 3(2 étages avec un by-pass)

Dans ce qui suit, les membranes sélectionnées ont été nommes de la manière suivante :

E1 : XLE-440

E2 : XLE-4040

E3 : NF270-440

E4 : NF270-400/34i

Chapitre 3

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Afin de mieux choisir la configuration optimale pour les membranes sélectionnées, une série de simulation a été menée. L'analyse des résultats et leur conformité à l'objectif fixé nous permettra de tirer des conclusions concernant le type de membrane le plus adéquat. Et dans cette optique, une étude comparative a été menée.

3.2 Etude de l'effet du taux de conversion

Le taux de conversion est un paramètre de suivi des performances des membranes. Des tests ont été réalisés pour les différents types de membranes afin de vérifier l'effet de ce dernier sur les paramètres du système.

Dans cette partie d'étude, nous avons utilisé une configuration basique (un seul pass et un seul étage) comme dans l'étape de présélection des membranes.

Le taux de conversion varie de 10 à 60%. Au-delà de 60% le logiciel affiche un warning system qui indique que le débit du perméat est supérieur à la limite maximale c'est-à-dire que les pressions d'alimentation appliquées sur les membranes deviennent supérieures à la limite des membranes sélectionnées.

À noter que, dans le cas de la membrane XLE-440 on remarque un warning system à 60% du taux de conversion.

3.2.1 Effet sur le TDS du perméat

Les résultats de l'effet de la variation du taux de conversion sur le TDS du perméat sont présentés dans le tableau 3.1.

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.1, on constate que pour toutes les membranes sélectionnées le TDS diminue avec l'augmentation du taux de conversion.

Tableau 3.1. Variation du TDS en fonction du taux de conversion.

Taux de conversion (%)	TDS (mg/l)			
	E1	E2	E3	E4
10	131.7	143.9	601.7	599.5
20	85.87	90.74	472.6	473.5
30	65.10	68.78	400.3	403.5
40	55.08	58.27	358.9	364.1
50	50.15	53.14	336.4	344.0
60	48.48	51.84	328.4	338.8

Les résultats du tableau sont représentés dans la figure 3.1.

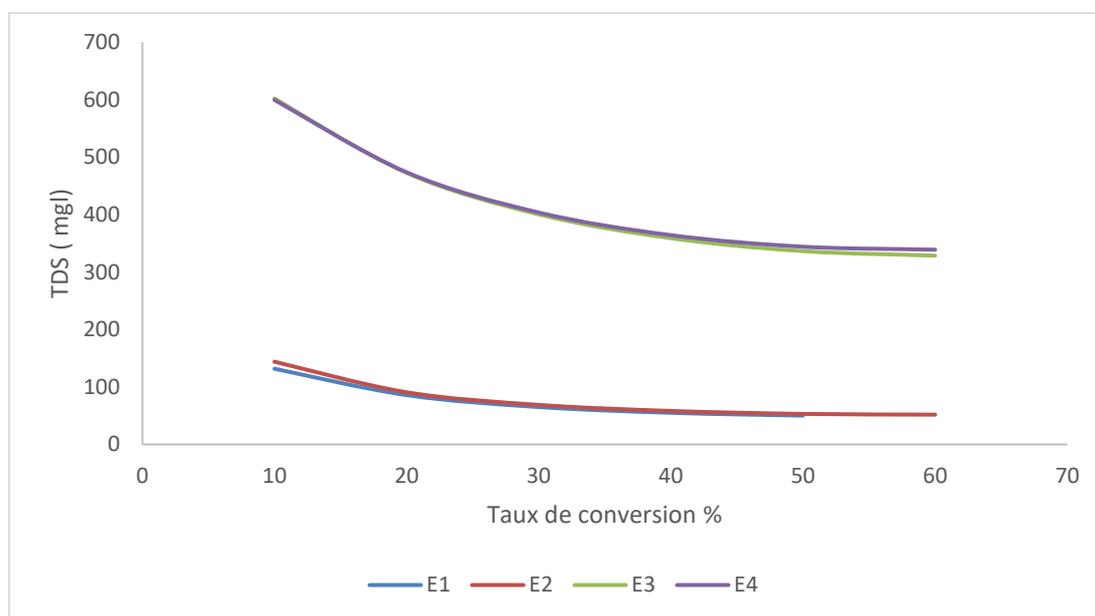


Figure 3.1. Variation du TDS en fonction du taux de conversion (configuration 1).

Il apparait d'après la figure 3.1 que l'augmentation du taux de conversion de 10 à 60 % induit une diminution du TDS de 144 mg/l à 48 mg/l et 602 mg/l à 328 mg/l respectivement pour les membranes OR et NF. On observe également que les courbes de variation sont

similaires pour les membranes E1, E2 et E3, E4 et que la variation du TDS est plus importante lorsque le taux de conversion varie entre 10 et 30%.

Il est important de noter que la technique d'osmose inverse est plus sensible à la variation de la salinité totale en fonction de taux de conversion par rapport à d'autres filières de traitement d'eau. [21].

3.2.2 Effet sur la pression d'alimentation

La variation du taux de conversion entraîne une variation de la pression d'alimentation. L'effet de la variation du taux de conversion sur la pression d'alimentation est présenté dans le tableau 3.2 et la figure 3.2.

Tableau 3.2. Résultat de la pression d'alimentation en fonction du taux de conversion.

Taux de conversion %	La pression d'alimentation (bar)			
	E1	E2	E3	E4
10	3	2.7	1.6	1.6
20	4	3.5	2.2	2.2
30	4.8	4.3	2.8	2.7
40	5.7	5.1	3.4	3.3
50	6.7	5.9	4.1	3.9
60	7.8	6.8	4.9	4.6

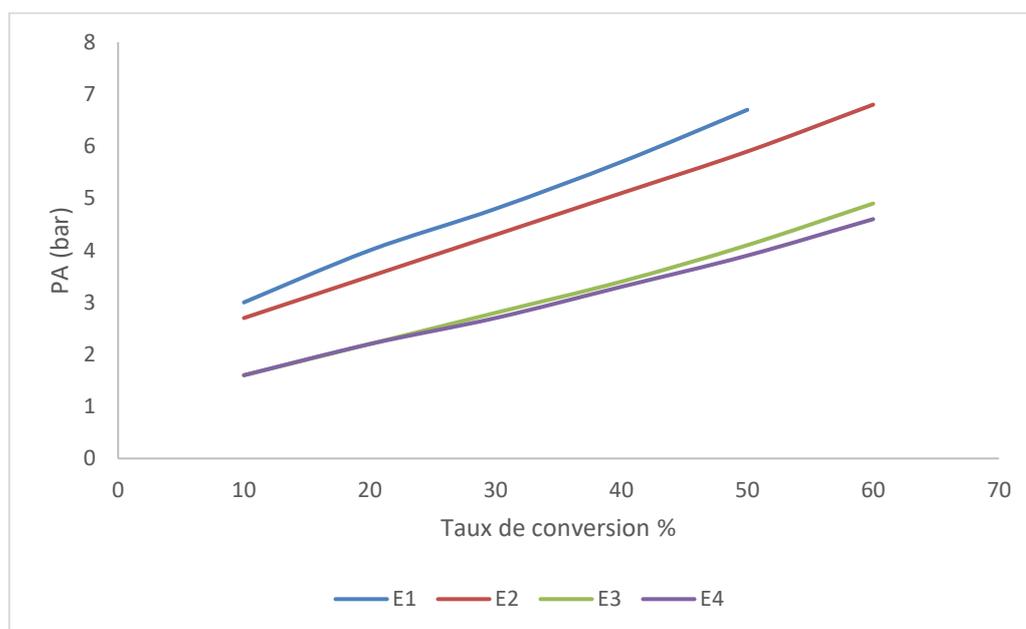


Figure 3.2. Variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion.

La figure 3.2 montre que pour les quatre membranes l'augmentation du taux de conversion implique une augmentation de la pression d'alimentation. La pression varie approximativement de 1 à 8 bars lorsque le taux de conversion augmente de 10 à 60%. Cette variation signifie que la pression osmotique est contre balancée par des pressions transmembranaires supérieures et de ce fait des pressions d'alimentations supérieures.

Il est à noter que dans cet intervalle de conversion, la variation entre la pression et le taux de conversion semble quasiment linéaire.

3.2.3 Effet sur l'énergie spécifique

La consommation de l'énergie spécifique est un paramètre important qui permet d'évaluer l'efficacité des procédés pour le traitement des eaux. La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs. Dans notre cas d'étude, l'énergie spécifique calculée, dépend de la section principale de l'unité de c'est-à-dire la pompe d'alimentation et les trains des membranes RO.

L'énergie spécifique est calculée à partir de la relation suivante :

$$SEC = \frac{1-R}{R} (\Delta P) + (P_f - P_0)$$

Avec :

R : le taux de conversion

P_f : la pression d'alimentation (à la sortie de la pompe)

P_0 : pression du perméat

ΔP : la différence de pression le long des tubes de pression

Sachant que le facteur de conversion est :

$$1 \text{ kWh/m}^3 = 3.6.10^6 \text{ Pascal}$$

Le tableau 3.3 regroupe les résultats obtenus avec les différentes membranes.

Tableau 3.3. Energie spécifique en fonction du taux de conversion.

Taux de conversion %	l'énergie spécifique kWh/m ³			
	E1	E2	E3	E4
10	1.05	0.94	0.55	0.55
20	0.69	0.61	0.38	0.38
30	0.56	0.49	0.32	0.32
40	0.50	0.44	0.30	0.29
50	0.47	0.41	0.29	0.27
60	0.45	0.39	0.28	0.27

Les résultats obtenus montrent la technique membranaire par nano-filtration demande moins d'énergie par rapport à celle de l'osmose inverse. La variation de cette dernière en fonction du taux de conversion est plus implorante dans le cas de l'osmose inverse.

La figure 3.3 illustre la variation de l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion pour les deux techniques membranaires NF et OI.

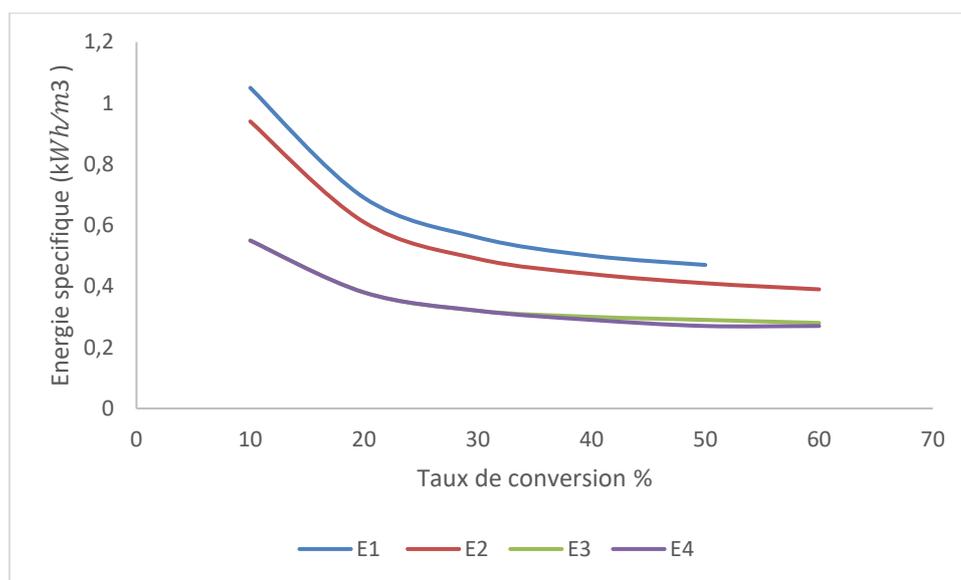


Figure 3.3. Variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion.

À partir de la figure 3.3 on observe une diminution progressive de l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion. Cette diminution est plus implorante dans l'intervalle de conversion de 10 à 25%.

Il apparait également pour la nano-filtration la variation est similaire.

3.3 Reminéralisation

À partir des résultats obtenus (section 3.2.1), on observe que pour un taux de conversion supérieur à 10% la TDS est inférieur à 500mg/l. Nous avons donc ajouté un By-pass pour augmenter la valeur de la TDS.

Dans cette partie d'étude, le taux de conversion est fixé à 60% pour la NF à 55% pour la RO.

3.3.1 Effet de la reminéralisation sur le TDS du perméat

3.3.1.1 Cas des membranes RO

Le tableau 3.4 résume les résultats de la variation de la TDS en fonction des fractions du By-pass des membranes RO.

Tableau 3.4. Variation de la TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes RO.

Fraction by-pass (%)	Le TDS (mg/l)	
	XLE-440	XLE-4040
10	241.2	244.3
20	406.4	408.9
30	550.2	552.1
40	675.6	677.6
50	786.5	788.3

La figure 3.4 présente la variation de la salinité totale en fonction de la fraction du by-pass pour la technique membranaire RO (membrane E1 et E2). En premier lieu, on observe une augmentation du TDS en fonction des fractions du by-pass, cette augmentation est du même ordre pour les deux types de membrane. Les résultats obtenus par cette simulation montrent que la reminéralisation de l'eau traitée par osmose inverse permet d'atteindre le TDS souhaité.

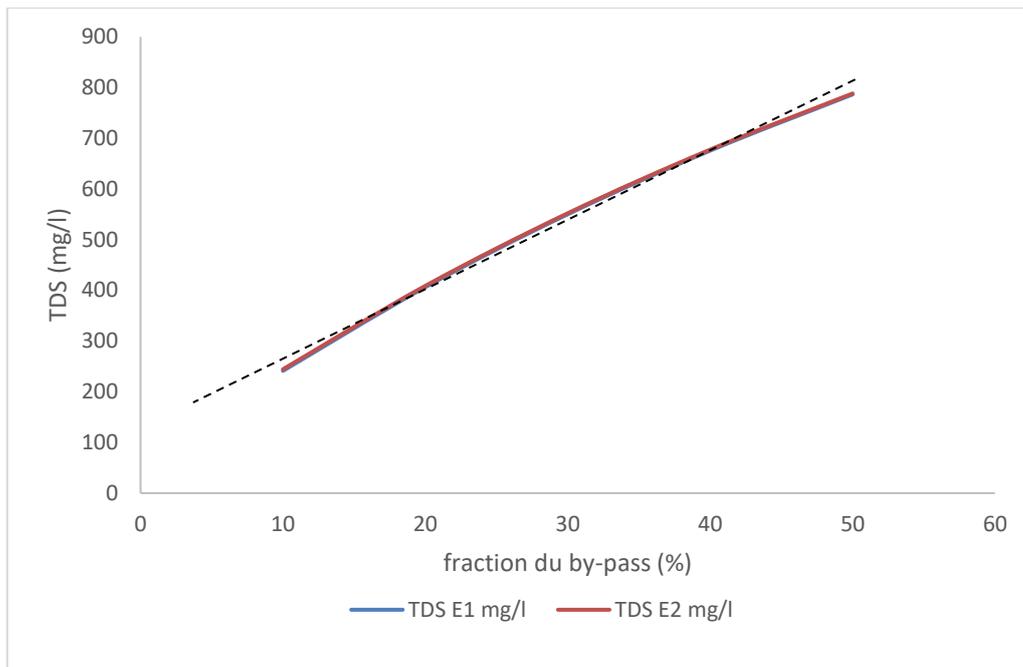


Figure 3.4. Evolution du TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes E1 et E2.

La variation du TDS en fonction des fractions du by-pass montre une évolution linéaire pour les deux types de membrane. On peut donc, déterminer la fraction optimale pour un TDS de 500mg/l (voir annexe 2).

→ Pour un TDS de 500 mg/l on a une fraction optimale du by-pass de 28% pour XLE-440.

→ Pour un TDS de 500 mg/l on a une fraction optimale du by-pass de 28% pour XLE-4040.

3.3.1.2 Les membranes de la nano-filtration

Les résultats de la variation de la TDS en fonction des fractions du By-pass des membranes NF sont regroupés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Variation de la TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes NF.

Fraction by-pass (%)	Le TDS (mg/l)	
	NF270-440	NF270-400/34i
10	478.6	488.2
20	608.8	616.7
30	723.4	729.5
40	823.9	828.5
50	911.9	915.2

Comme dans le cas des membranes RO, on remarque une augmentation du TDS en fonction des fractions du by-pass.

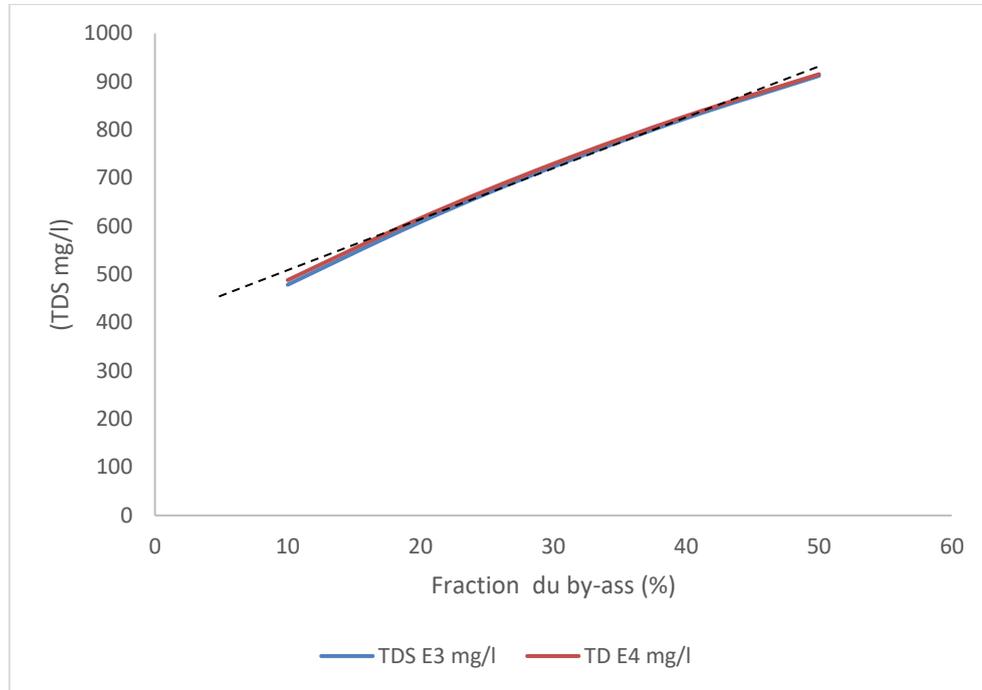


Figure 3.5. Evolution du TDS en fonction des fractions du by-pass des membranes E3 et E4.

La figure 3.5 montre la variation du TDS en fonction de la fraction du by-pass pour les membranes NF (noté E3 et E4). On remarque clairement une augmentation linéaire du TDS sous l'effet de l'ajout du by-pass. Cette augmentation est comparable pour les deux types de membrane. Les résultats sont donc en accord avec ceux obtenus en utilisant des membranes RO et confirme que pour atteindre le TDS souhaité l'ajout du by-pass est indispensable.

→ Pour un TDS de 500 mg/l la fraction optimale du by-pass est de 11% pour la NF270-440 et de 10% pour la NF270-400/34i.

3.4 Configuration optimale

Dans le but d'avoir un taux de conversion plus élevé, et pour déterminer la meilleure configuration de l'unité, deux autres configurations ont été mises en place :

- Configuration 2 (2 étages),
- Et configuration 3 (2 étages avec un by-pass).

Dans cette partie de travail, nous avons pris en considération l'effet de la configuration de l'unité sur le TDS, la pression d'alimentation et l'énergie spécifique dans le but de déterminer la configuration la plus efficace pour chacune des membranes sélectionnées.

À noter que le taux de conversion dans cette partie d'étude est fixé à 70%.

3.4.1 Effet sur le TDS du perméat

Les résultats de la variation de la TDS pour chaque configuration sont affichés sur le tableau 3.6.

Tableau 3.6. Variation du TDS en fonction des configurations 1, 2, et 3.

Configurations	TDS (mg/l)			
	E1	E2	E3	E4
1	50.15	52.99	334.5	350.2
2	69.65	73.88	415.1	428.3
3	503.6	507	547.1	539.6

La figure 3.6 montre la variation du TDS en fonction des différentes configurations. Toutes les membranes montrent une augmentation du TDS par rapport à la configuration basique (configuration 1, avec un seul étage).

Comme on peut le voir, l'additionnement d'un 2eme étage a permis d'accroître les valeurs de la TDS. Cette augmentation est plus importante dans le cas des membranes NF. De plus, l'ajout du by-pass (configuration 3) favorise un meilleur TDS. Pour les quatre membranes utilisées la valeur fixée a été atteinte (500mg/l).

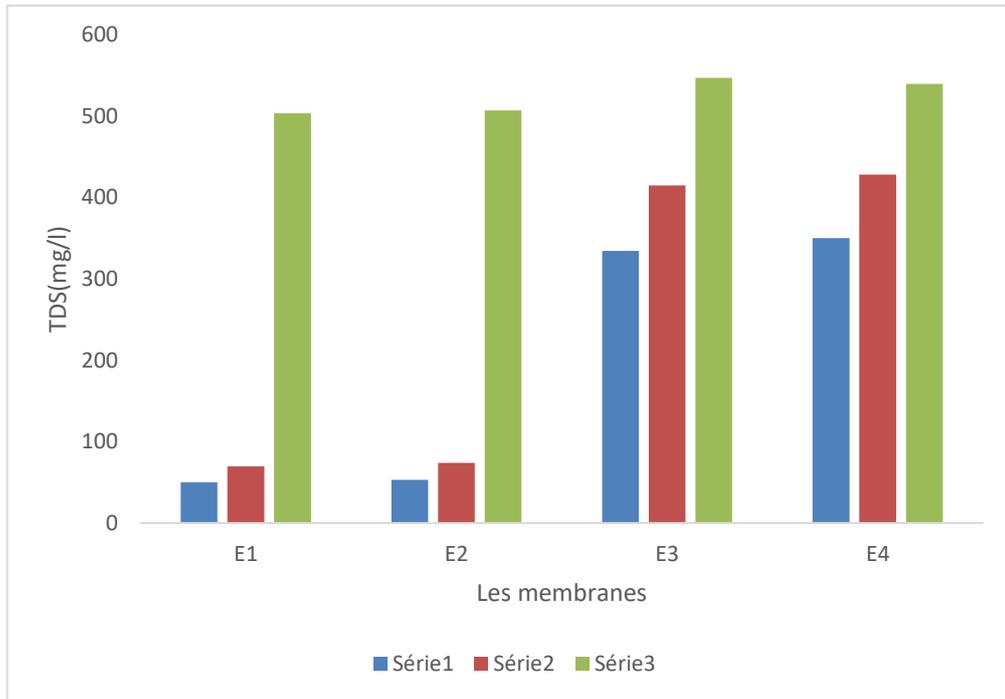


Figure 3.6. Variation du TDS en fonction des configurations pour les quatre membranes.

3.4.2 Effet sur la pression d'alimentation

Le tableau 3.7 affiche les valeurs de la pression d'alimentation pour les différentes configurations.

Tableau 3.7. Variation de la pression d'alimentation en fonction des configurations 1, 2, et 3.

Configurations	Pression d'alimentation (bar)			
	E1	E2	E3	E4
1	9	7.8	5.7	5.7
2	7.4	6.5	4.4	4.8
3	5.5	5	4	3.8

Dans tous les cas, on remarque une diminution considérable de la pression d'alimentation avec le nombre d'étage et l'ajout du by-pass. Il convient de mentionner qu'une faible pression d'alimentation mène à un procédé plus efficace.

L'effet de la configuration sur la pression d'alimentation est présenté sur forme d'histogramme sur la figure 3.7.

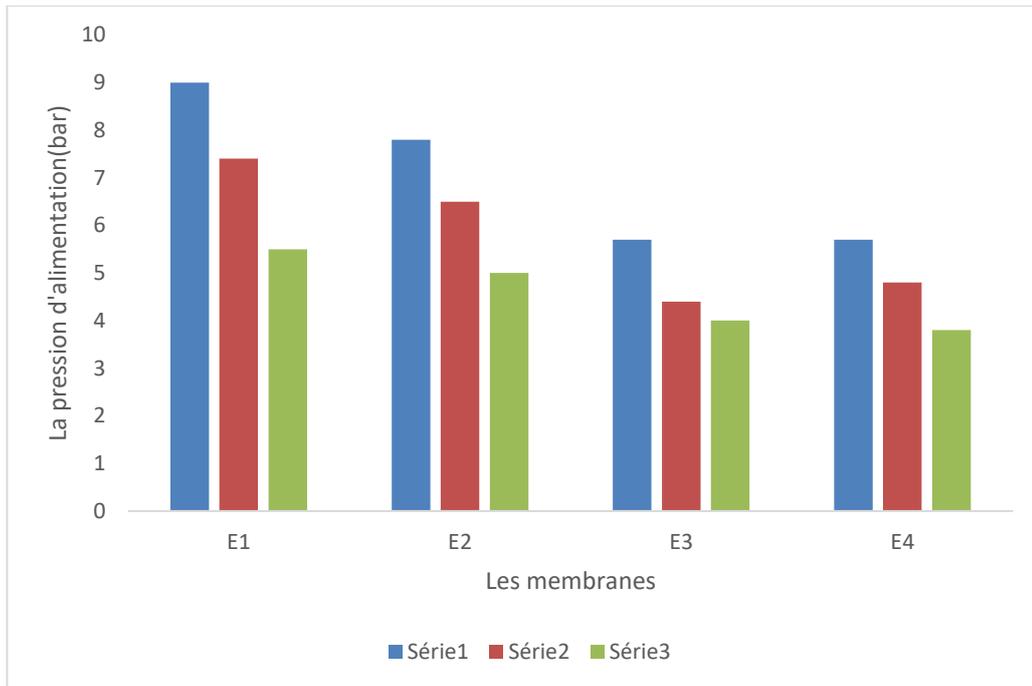


Figure 3.7. Variation de la pression d'alimentation en fonction des configurations pour les quatre membranes.

Clairement, la pression d'alimentation dépend fortement de la configuration de l'unité. Cette dernière est en diminution en comparaison avec la configuration de base.

3.4.3 Effet sur l'énergie spécifique

Afin de mieux choisir la configuration optimale et de se situer en termes d'efficacité et coût, nous avons suivi la variation de l'énergie spécifique pour les trois configurations. Le tableau 3.8 regroupe les résultats obtenus.

Tableau 3.8. Variation de l'énergie spécifique en fonction des configurations 1, 2, et 3.

Configurations	Energie spécifique (kWh/m ³)			
	E1	E2	E3	E4
1	0.45	0.39	0.28	0.28
2	0.37	0.32	0.22	0.24
3	0.17	0.15	0.17	0.16

Les résultats du Tableau 3.8 suggèrent que l'augmentation du nombre d'étage permet de diminuer l'énergie spécifique de l'unité. Cette diminution est plus importante avec l'ajout du by-pass.

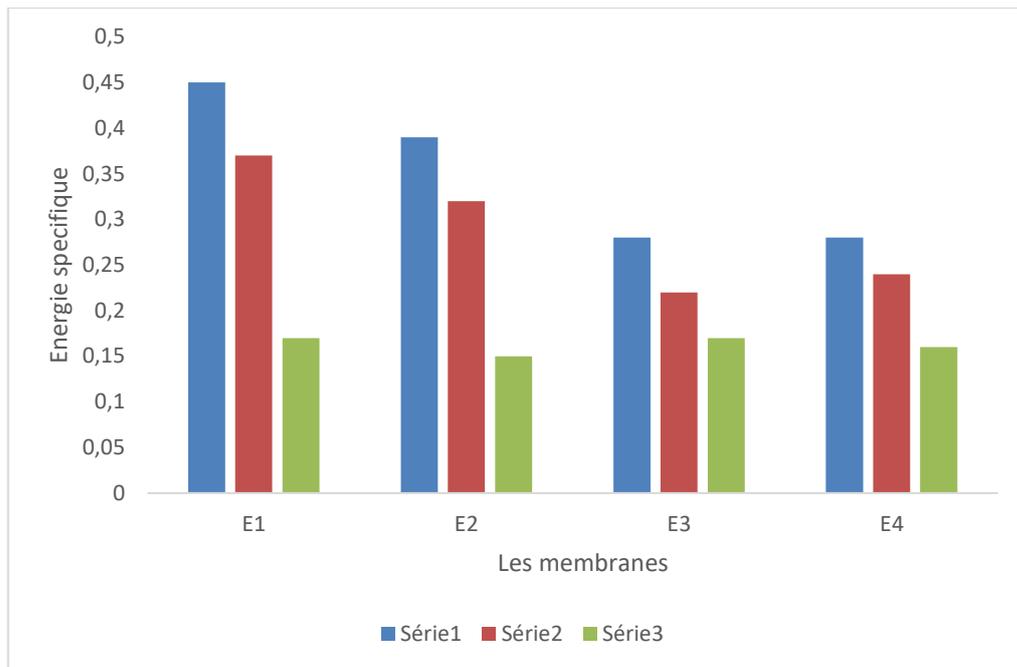


Figure 3.8. Variation de l'énergie spécifique en fonction des configurations pour les quatre membranes.

Selon la figure 3.8, on remarque quasiment la même tendance de variation de l'énergie spécifique en fonction des trois configurations. Cependant, l'énergie spécifique dans le cas de RO est sensiblement supérieure à celle de la NF.

D'autre part, la configuration 3 mène à l'énergie spécifique la plus basse est ce qui est bien en terme de coût.

À partir des résultats obtenus dans cette partie d'étude, il est clair que la configuration 3 est la mieux adapté pour les deux types de membranes. Cette configuration présente un TDS de 500mg/l, une pression d'alimentation et une énergie spécifique la plus basse avec un taux de conversion élevé (70%).

Dans ce qui suit, une étude comparative a été menée dans le but de choisir l'unité membranaire optimale pour la production de notre eau souhaitée.

3.5 Comparaison et choix de la membrane

Pour la sélection de la membrane la plus adéquate et efficace pour notre cas étude, on a été mené à faire une étude comparative entre la RO et la NF, en se basant sur la consommation de l'énergie spécifique et le coût total en considérant la configuration 3.

Les principaux paramètres de comparaison sont résumés dans le tableau 3.9

Tableau 3.9. Caractéristiques des membranes.

Membranes	Energie spécifique (kWh/m³)	Prix de l'unité(\$)	Nombre d'élément	Prix total (\$)
E1	0.17	814.83	684	557343.72
E2	0.15	235.00	3672	862920.00
E3	0.17	1046.03	702	734313.06
E4	0.16	999,91	768	767930.88

À partir du tableau 3.9 on remarque que les spécifications varient d'une membrane à une autre. En termes d'énergie spécifique, on note des valeurs adjacentes pour les deux types de membrane. Cette dernière va de 0.15 à 0.17 kWh/m³. En outre, le nombre d'élément présente une grande variation ce qui influe sur le coût de l'unité. Il est donc important de trouver la meilleure corrélation entre consommation énergétique et le coût total.

En ce qui concerne le coût, on remarque que les membranes E1 et E3 présentent le plus faible coût.

Ces résultats nous amènent à faire une première sélection est de choisir les membranes suivantes :

- E1 (XLE-440) de la RO
- E3 (NF270-440) de la NF

Cependant, il est a noté que le coût de la nano-filtration semble être plus élevé que celui de la RO selon le tableau 3.9.

Le tableau 3.10 affiche les valeurs du débit pour la configuration optimale.

Tableau 3.10. Résultats des calculs des débits

Membranes	Débit d'alimentation * (m ³ /h)	Débit de perméat (m ³ /h)	Débit de concentrât (m ³ /h)
E1	699.8	490.1	209.9
E2	699.8	490.0	210.0
E3	899.9	630.0	270.0
E4	899.9	629.9	270.0

Débit d'alimentation * : by-pass

Selon le tableau 3.10 on constate que le débit du perméat est plus élevé dans le cas des membranes NF en relation avec le débit de d'alimentation.

À ce stade, il est difficile de se prononcer sur le choix d'une seule membrane, les membranes E1 et E3 semblent être la meilleure option pour notre cas d'étude.

CONCLUSION GENERALE

Les procédés de séparation membranaires sont promis à un bel avenir dans le domaine de traitement et de la valorisation des eaux non-conventionnelles. À cet effet, différentes techniques ont été développés.

L'étude bibliographique a révélé que la technique d'osmose inverse et nano-filtration sont les mieux adaptés au traitement des eaux.

Le présent mémoire a eu pour objectif principal la mise au point d'une unité de production d'eau potable à partir d'une eau de puits (cas du Niger) en mettant l'accent sur la configuration optimale prenant en compte le taux de conversion, la consommation d'énergie et le coût.

À la lumière des résultats obtenus, nous avons pu établir qu'une modulation des paramètres de la membrane permet de concevoir une unité de production particulièrement efficace dans la production d'eau potable.

Dans un premier temps, en utilisant une configuration basique (un seul passe et une seule étape) nous avons vérifié l'effet du taux de conversion sur les paramètres du système. Il a été démontré que l'augmentation du taux de conversion mène à une augmentation de la pression d'alimentation et une diminution de l'énergie spécifique et du TDS.

L'étude a été étendue à une deuxième série de simulation. Au cours de cette expérience, nous avons démontré que l'ajout d'un by-pass permet d'atteindre le TDS souhaité (500mg/l). De même, il a été conclu que la fraction optimale du by-pass pour une configuration basique est de 28% pour les membranes RO et varie entre 10 et 11% pour les membranes NF. Toutefois, pour ces deux séries de simulation le taux de conversion n'a pas dépassé 60%. Par conséquent, deux autres configurations ont été mises en place.

En troisième lieu, une suite de simulation a été établie dans le but de déterminer la configuration optimale en prenant en compte les critères de sélections des membranes : un taux de conversion le plus élevé, une pression d'alimentation la plus basse, une énergie spécifique la plus faible et un coût réduit.

L'ensemble des résultats obtenus nous a permis de définir la meilleure configuration à savoir la configuration 3 pour notre unité de production.

Toutefois qu'en est-il de la valorisation des autres ressources d'eau et l'adaptation de nouvelles technologies dans le domaine de traitement des eaux ? À ce sujet l'état de l'art rapporte que les ressources en eau sont limitées et peu exploitable.

Notre recherche nous permet d'entrevoir de nouvelles perspectives qui peuvent s'énoncer comme suit :

- i) Développement d'une unité de production avec un meilleur rendement
- ii) Utilisation de nouvelles ressources d'eau
- iii) Implantation des procédés hybrides membranaires pour la production d'eau potable.

Références bibliographiques

- [1] BERLND J et CATHERINE J. :« les procédés membranaires pour le traitement de l'eau ». Document technique, France, décembre 2002. <http://www.fndae.fr>.
- [2]<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/procedes-de-traitement-des-eaux-potables-industrielles-et-urbaines-42318210/filtration-membranaire-oi-nf-uf-mf-j2794/>
- [3] https://www.pseau.org/outils/ouvrages/unicef_cartographie_forage_manuel_niger_fr.pdf
- [4]. Selon la SEEN (Société d'Exploitation des Eaux du Niger) au Niger
- [5] Y. Bessiere, Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtré critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage, thèse de l'Université Paul Sabatier-Toulouse III, (2005).
- [6] A.P. Tamas, Etude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface, Mémoire de l'Université Laval du Québec, (Octobre 2004).
- [7] C. Causserand, Filtration membranaire (OI, NF, UF) - Caractérisation des membranes, Techniques de l'ingénieur, Référence J2792, (Juin 2006).
- [8] C. Mesli, Prétraitement de l'eau de mer par ultrafiltration, Mémoire USDB, (2010).
- [9] J.M. Berland, C. Juery, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Document technique FNDAE (fonds national pour le développement des adductions d'eau), n°14, (Décembre 2002).
- [10] P.Aimar, P. Bacchin, Maurel A., Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT) - Aspects théoriques : perméabilité et sélectivité, Techniques de l'ingénieur, Référence J2790, (Août 2010).
- [11] T. Mare, P.Byrne, Les systèmes innovants de dessalement d'eau de mer,(2013)
- [12] T. Mare, P.Byrne, Les systèmes innovants de dessalement d'eau de mer,(2013)
- [13] Zaamouche, R., Modélisation basée sur le concept hydrodynamique de la couche formée sur la surface d'une membrane d'ultrafiltration, thèse de l'Université de Batna.
- [14] G. Belfort, R.H. Davis, A.L. Zydney, The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration, Journal of Membrane Science, 96 (1994) 1-58.
- [15] A. Samcotech, Fundamental Guide to Reverse Osmosis and Nanofiltration Membrane Systems MAY 16, (2017).
- [16] A. Samcotech, Fundamental Guide to Reverse Osmosis and Nanofiltration Membrane Systems MAY 16, (2017).
- [17] DuPont-FilmTec-XLE-440-L.pdf
- [18] DuPont-FilmTec-XLE-4040-L.pdf

[19] NF-FilmTec-NF270-440-PDS-45-D02827-en.pdf

[20] NF-FilmTec-NF270-400-34i-PDS-45-D01699-en.pdf

[21] <https://hmf.enseeiht.fr/>

ANNEXE 1

Tableau 1. Les membranes RO et NF présélectionnées.

Membrane	Taux de conversion	Energie spécifique KWh/m³	Pression d'alimentation (bar)	TDS (mg/l)	Nombre d'élément
Eco Pro-400	60%	0.46	7.9	16.68	552
Eco Pro-400i	60%	0.45	7.7	16.71	552
Eco Platinum-440	55%	0.46	8.1	13.54	456
Eco Platinum-440i	55%	0.50	7.9	13.56	456
Eco Pro-440	60%	0.49	8.4	16.32	504
Eco Pro-440i	60%	0.47	8.2	16.56	
XLE-440	55%	0.46	7.2	48.96	456
XLE-B-440(france potable only)	55%	0.46	7.2	48.96	456
XLE-440i	55%	0.46	7.3	48.90	456
XLE-4040	60%	0.39	6.8	51.46	2448
XLE-2540	60%	0.40	6.9	50.87	7500
BW30HRLE-440	60%	0.49	8.4	25.74	504
BW30HRLE-440i	60%	0.47	8.2	25.79	504
BW30XFR-400/34	60%	0.64	11.1	11.49	558
BW30XFR-400/34i	60%	0.63	10.9	11.50	558
BW30FR-400/34	60%	0.66	11.4	14.63	600
China					
BW30FR-400/34i	60%	0.66	11.3	14.64	600
China					
BW30HR-440	60%	0.69	11.8	10.42	498
BW30HR-440i	60%	0.67	11.6	10.43	498
BW30XFRLE- 400/34	60%	0.46	7.9	26.76	552
BW30XFRLE- 400/34i	60%	0.45	7.7	26.80	552
BW30-365	60%	0.65	11.2	15.58	666
BW30-400	60%	0.68	11.7	14.78	600
BW30-400/34	60%	0.66	11.4	14.63	600
BW30-400/34i	60%	0.64	11.2	14.65	600
BW30-4040	60%	0.67	11.5	14.84	2640
BW30-2540	55%	0.80	12.7	12.58	6318
NF90B-400 (france potable)	65%	0.29	5.4	125.8	636
NF90-400/34i	65%	0.28	5.2	120.9	636

NF90-4040	60%	0.28	4.9	127.1	3156
NF90-2540	65%	0.28	5.3	128.0	9234
NF90-400/34	60%	0.37	6.4	130.4	636
NF200-4040	45%	0.27	3.5	318.4	4704
NF200-2540	45%	0.27	3.5	325.5	14118
NF270-400/34	60%	0.28	4.8	338.1	510
NF270-400/34i	60%	0.27	4.6	338.8	510
NF270-440	60%	0.28	4.9	328.5	468
NF270-4040	55%	0.28	4.5	337.5	2526
NF270-2540	60%	0.27	4.7	338.7	7500

ANNEXE 2

→ Membranes RO

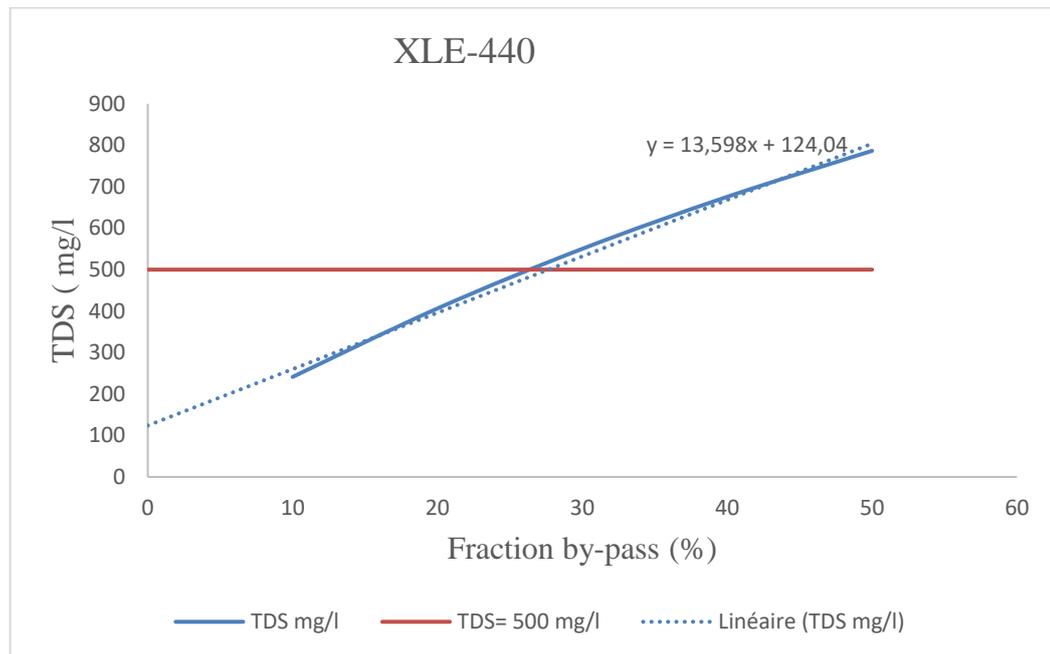


Figure1. TDS en fonction des fractions du by-pass membrane E1.

Suivant le graphe tracé, on remarque une presque linéarité ce qui nous amène à avoir une droite d'équation qui nous permet de déterminer la fraction optimale pour un TDS de 500mg/l.

✚ Calcul pour déterminer la fraction optimale du by-pass pour un TDS de 500 mg/l :

$$y = 13.598x + 124.04 \quad \text{Équation de la droite}$$

⇓

$$500 = 13.598x + 124.04 \Rightarrow x = \frac{500-124.04}{13.598} = 27.65\% = 28\%$$

✚ Pour un TDS de 500 mg/l on a une fraction optimale du by-pass de 28% pour XLE-440.

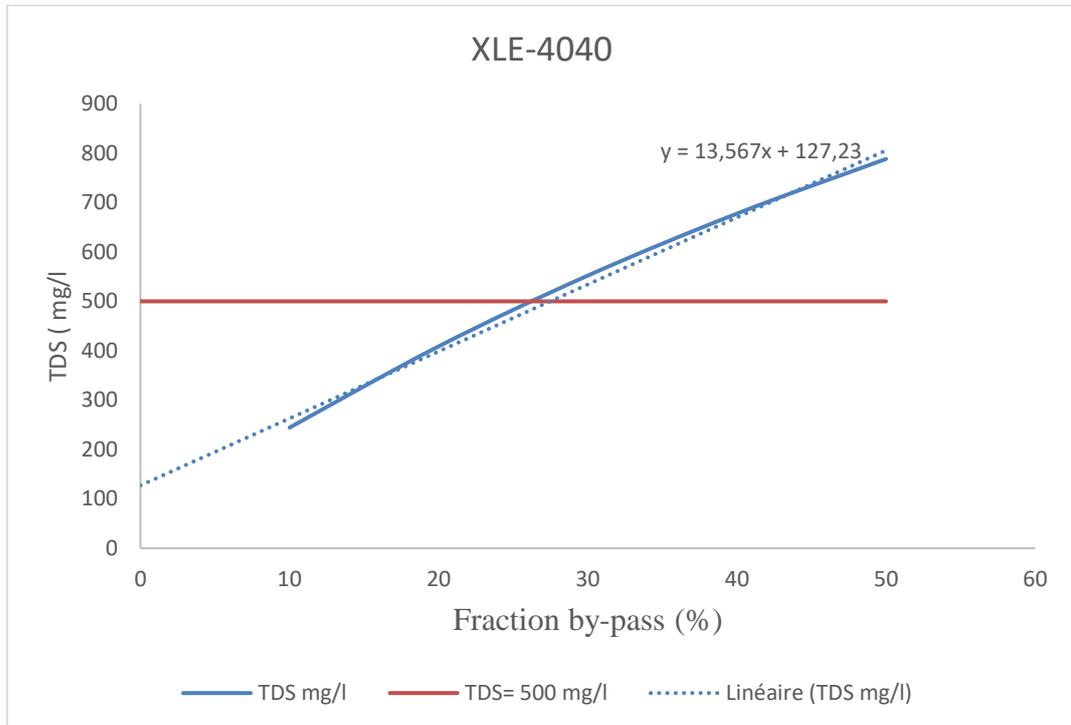


Figure 2. TDS en fonction des fractions du by-pass membrane E2.

✚ Calcul pour déterminer la fraction optimale du by-pass pour un TDS de 500 mg/l :

$$y = 13.567x + 127.23 \quad \text{Équation de la droite}$$

↓

$$500 = 13.567x + 127.23 \Rightarrow x = \frac{500-127.23}{13.567} = 27.48\% = 28\%$$

✚ Pour un TDS de 500 mg/l on a une fraction optimale du by-pass de 28% pour XLE-4040.

→ **Membranes NF**

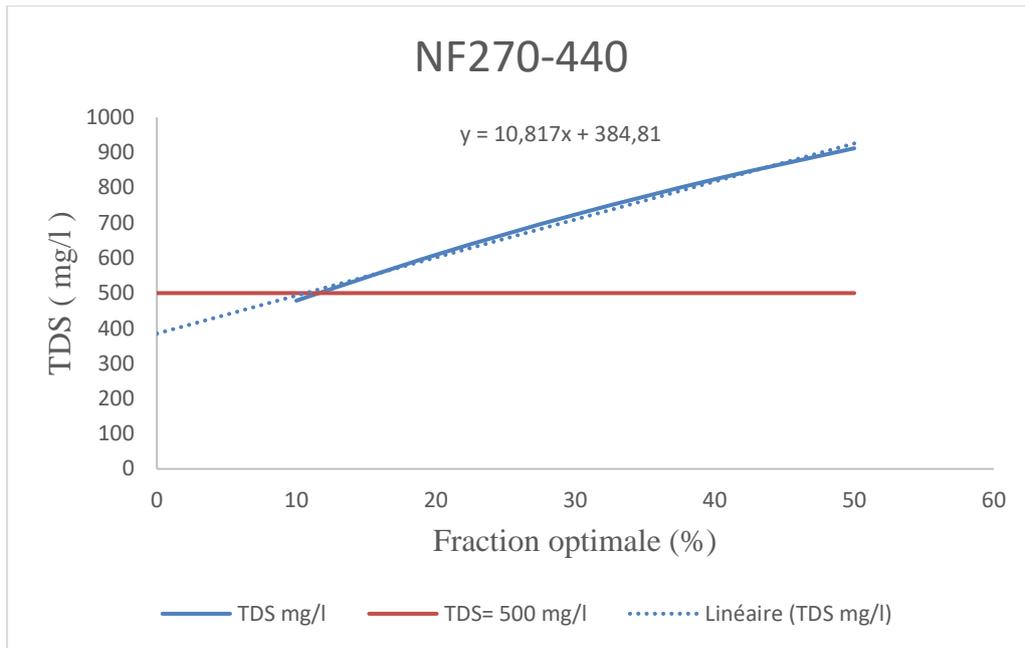


Figure 3. TDS en fonction des fractions du by-pass membrane E3.

✚ Calcul pour déterminer la fraction optimale du by-pass pour un TDS de 500 mg/l :

$$y = 10.817x + 384.81 \quad \text{Équation de la droite}$$

↓

$$500 = 10.817x + 384.81 \Rightarrow x = \frac{500 - 384.81}{10.817} = 10.65\% = 11\%$$

✚ Pour un TDS de 500 mg/l on a une fraction optimale du by-pass de 11% pour NF270-440.

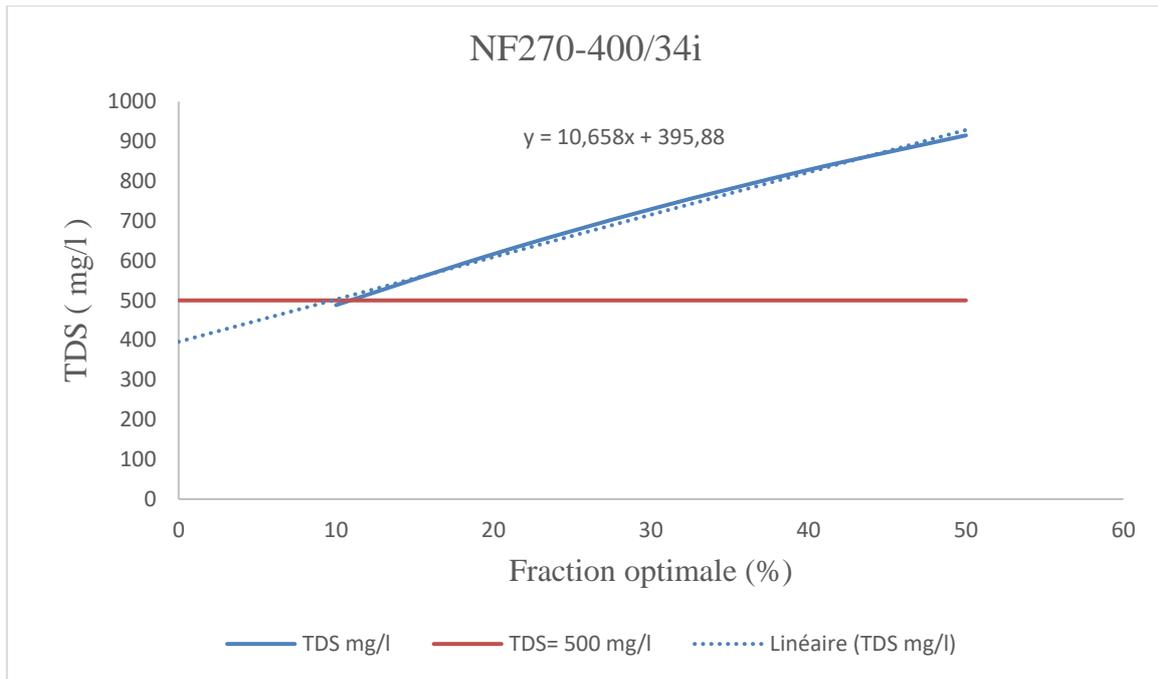


Figure 4. TDS en fonction des fractions du by-pass membrane E4.

✚ Calcul pour déterminer la fraction optimale du by-pass pour un TDS de 500 mg/l :

$$y = 10.658x + 395.88 \quad \text{Équation de la droite}$$

↓

$$500 = 10.658x + 395.88 \Rightarrow x = \frac{500 - 395.88}{10.658} = 9.77\% = 10\%$$

✚ Pour un TDS de 500 mg/l on a une fraction optimale du by-pass de 10% pour NF270-400/34i.