

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de l'hydraulique

Laboratoire de Recherches des Sciences de l'Eau

Mémoire de projet fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**Traitement par nanofiltration des eaux d'injection
de Lias : application à la récupération assistée des
hydrocarbures dans le gisement de TFT**

MERABET Melissa / BELABED Meroua

Proposé par

Mr Abdel Hafid TOUIL CRD

Sous la direction de

Mme	Jazia ARRAR	Professeur	ENP
Mr	Abdel Hafid TOUIL	Docteur	CRD

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2020

Composition du Jury :

Présidente	Mme Saadia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteur	Mme Jazia ARRAR	Professeur	ENP
Examineur	Mr Salim BENZIADA	MAA	ENP
Examineur	Mme Meriem CHETIBI	Docteur	ENP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département de l'hydraulique

Laboratoire de Recherches des Sciences de l'Eau

Mémoire de projet fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**Traitement par nanofiltration des eaux d'injection
de Lias : application à la récupération assistée des
hydrocarbures dans le gisement de TFT**

MERABET Melissa / BELABED Meroua

Proposé par

Mr Abdel Hafid TOUIL CRD

Sous la direction de

Mme	Jazia ARRAR	Professeur	ENP
Mr	Abdel Hafid TOUIL	Docteur	CRD

Présenté et soutenu publiquement le 08/07/2020

Composition du Jury :

Présidente	Mme Saadia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteur	Mme Jazia ARRAR	Professeur	ENP
Examineur	Mr Salim BENZIADA	MAA	ENP
Examineur	Mme Meriem CHETIBI	Docteur	ENP

Avant-propos

Ce document présente un mémoire d'un projet de fin d'étude, pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Hydraulique de l'école nationale polytechnique d'Alger. Le travail porte sur traitement membranaire par nanofiltration d'une eau souterraine pour la récupération assistée des hydrocarbures, ainsi que l'impact des paramètres de température, pression et pH sur la qualité d'eau produite.

En effet depuis un certain temps, la filtration sélective présente un réel avancement dans les technologies de traitement, c'est devenu donc un nouvel argument de vente chez les fournisseurs de membranes, ce qui est le cas de la membrane choisie dans le cadre de ce travail.

L'étude que nous avons réalisée est une contribution dans le domaine du traitement d'eau liée à la récupération des hydrocarbures. Elle porte sur la proposition des solutions pour lever certains obstacles rencontrés, en particulier ceux liés à la qualité de l'eau.

Au bout du compte, les difficultés n'ont pas manqué, nul travail ne peut être réalisé aisément, ces difficultés concernent particulièrement le manque de pratiques vu les conditions sanitaires qu'a vécu le monde cette année, donc il ne nous a pas été possible d'effectuer tous les essais nécessaires au laboratoire. Cette dernière situation nous a obligé à nous contenter de quelques réunions à distance que nous avons pu avoir avec nos encadreurs.

Dédicace

Dédicace

Maman, tu es la première personne à qui je vais dédier ce travail, tu peux être fière de ta fille maintenant, j'ai parcouru le chemin d'un nénuphar pour arriver ici, mais sans toi, sans ton soutien, ton amour et ta bienveillance je ne serai jamais ici. La gratitude que je t'envoie ne peut pas être exprimé dans un paragraphe, ni un livre même, c'est haut de là des mots maman, je t'aime très fort.

Papa, je te dédie ce travail à toi grand homme, toi qui as toujours été un amoureux de la science, voilà que ta fille est devenue ingénieur. Merci papa, tu m'as accompagné pendant tout mon parcours, tu es le papa qui ne dit jamais « non » à ses enfants qu'on il s'agit d'études, tu es notre ange gardien, je t'aime aussi papa.

Thinhinan, tu es ma grande sœur, comme une deuxième maman, tu as toujours été là pour m'entendre, comprendre mes soucis, m'aider et jouer le rôle de la grande sœur, tu as très bien réussi ton rôle, je te dédie ce travail en guise de gratitude pour ce que tu es pour moi, pour nous tous. Je t'aime sœur.

Thanina, tu es loin de nous certes, mais tu es toujours présente dans nos esprits, et nos cœurs, papa l'a dit d'ailleurs « on dirait que tu vis avec nous, t'es toujours présente, ta voix envahi la maison comme si tu étais là ». Construit ton avenir sœur, tache à faire ce que tu aimes, tu vas surement gagner, ce travail t'es dédié aussi, fait en sorte de le montrer à tes futurs enfants d'accord ? Je t'aime sœur.

Katia, notre petite bien aimée, tu viens de commencer, long est le chemin qui te restes, mais aie confiance en tes capacités, focalise-toi sur ton objectif, et n'écoute personne quand il s'agit de ton avenir, je te dédie ce travail sœur, je t'aime.

Aghiles-Ryan, petit frère, t'es encore jeune, l'avenir est large devant toi, je te dédie ce travail juste pour savoir que le travail qui te reste est encore grand, non pour te décourager mais pour te motiver, je t'aime aussi.

Meroua, tu es plus qu'un simple binôme pour moi, tu es une sœur et une amie, 3 ans depuis que je te connais, mais on dirait que ça fait des âges depuis notre rencontre, tu es l'incarnation de la gentillesse, je rends grâce à dieu de t'avoir mis sur mon chemin, je te dédie ce travail qu'on a fait ensemble avec amour, on a su nous entendre, et on est arrivé là grâce à ça. Je t'aime très fort.

Melissa

Dédicace

Dédicace

À qui sans eux je ne suis pas ce que je suis...

A celui qui m'a toujours aimé, protégé et encouragé : MON PÈRE....

Papa tu as toujours été mon repère dans la vie et voilà aujourd'hui, après presque un demi-siècle et grâce à tes conseils, ton aide et ta confiance en moi, que je sors de la même école que toi, ce travail représente le fruit de tout tes sacrifices pour mon avenir. Merci papa pour tout ce que tu m'as appris et pour tout ce que tu m'as donné.

À celle à qui je dois tout ce que je suis aujourd'hui : MA MÈRE...

Maman, mon doux rayon de bonheur, tu m'as tout donné, sans rien demander. Aucune dédicace ne pourra exprimer mon amour ni ma gratitude pour les sacrifices que tu as fait pour moi.

À celle qui m'enseigne les jours de son sourire : MA SŒUR...

On dit souvent que la grande sœur est une deuxième maman, toi tu étais plus que ça pour moi avec ton si grand cœur ma douce. Je tiens à te remercier pour ton amour et ta générosité et te dire que même si tu es partie loin de moi, ta place restera toujours dans mon cœur.

À mes sources de joie et de bonheur : MES FRÈRES...

Yasser, Hamza et Nazim, Aucun langage ne saura exprimer mon amour et fierté de vous avoir comme frères, je vous souhaite tout le bonheur et la réussite dans votre vie.

À la plus tendre des femmes : MA BELLE SŒUR...

Afefe, cela fait six ans que tu partages la vie avec nous et je ne peux que te dire que tu étais une deuxième sœur pour moi, merci d'être là.

À ceux qui nous ont illuminé la vie : MA NIÈCE Djana et MON NEVEU Yanis...

Vous étiez le plus beau cadeau qui nous a été offert, vous êtes encore petit pour lire cette dédicace mais il viendra le jour où vous aurez à écrire la vôtre, le chemin est long devant vous mais sachez que les portes de la réussite sont ouvertes à ceux qui savent les pousser, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de sucée.

À celle qui m'a partagé la joie et le malheur : LA MEILLEURE DES BINÔMES...

Je ne saurai te dire à quel point je suis heureuse de t'avoir comme binôme durant ces trois dernières années, à quel point je suis fière de ce qu'on a pu accomplir à deux et voilà aujourd'hui qu'on est sur le point de fermer un chapitre ensemble et commencer une nouvelle aventure. Je te dédie ce travail Melissa qui sans toi ne pouvait être achevé.

À celle qui me comprend sans rien dire : MA MOITIE...

Tu as toujours été pour moi une sœur, ça ne sera jamais possible d'imaginer ma vie sans toi. Merci à la seule et unique Laytmes.

Meroua

Remerciements

Remerciements

À Mme Saadia BENMAMAR et Mme Jazia ARRAR,

Nous tenons à vous exprimer toute notre reconnaissance et gratitude de nous avoir encadrées, orientées, aidées et conseillées, et surtout pour le précieux temps que vous nous avez accordé et d'être là, toujours, quand on a eu besoin de vous.

À Monsieur Abdel Hafid TOUIL,

Nous tenons à vous remercier, pour tout le savoir que vous nous avez transmis, pour tous les outils techniques et méthodologiques indispensables que vous nous avez apporté pour pouvoir faire ce projet.

À vous les membres du jury,

Merci à vous, un par un, d'être présent, ici et aujourd'hui, pour évaluer notre humble travail, c'est un honneur pour nous.

A tous nos enseignants,

Merci pour vos enseignements, merci d'avoir su nourrir nos réflexions et nos connaissances pour atteindre cette profonde satisfaction intellectuelle, merci mille merci.

À tous les coopérateurs,

Nous vous remercions infiniment, vous qui avez collaboré pour la réalisation de ce travail, de près ou de loin, à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidés nos réflexions au droit chemin.

À Monsieur Nezar BIDI,

Nous tenons à vous remercier particulièrement d'un merci assez spécial, et cela de nous être d'un très grand renfort pour pouvoir décrocher cette opportunité.

À vous qui lisez ce mémoire,

Merci pour l'intérêt que vous lui portez, merci pour votre choix.

Merci au bon dieu, sans sa grâce rien de ça ne serait réalisable.

Belabed Meroua & Merabet Melissa

Résumé

ملخص

تم إجراء دراسة حول أفضل تقنية لمعالجة المياه بين التناضح العكسي والترشيح النانوية لتقليل الكبريتات والمغنيسيوم والكالسيوم، مما يسبب مشاكل تتسبب في أضرار لا رجعة فيها لبئر الحقن. للقيام بذلك، تم اختبار فعالية غشاءين NF 270-4040 وBW270-4040 مقابل الاحتفاظ بهذه الجسيمات بواسطة برنامج Wave ومقارنتها بالنتائج التجريبية. ثم تم تحديد تأثير ظروف التشغيل المختلفة لدراسة تكوينات الأغشية المختلفة الممكنة للوصول إلى إنتاج 50 م³ في يوم.

الكلمات الدالة: التناضح العكسي، والترشيح النانوي، التناضح العكسي

Abstract

A study has been conducted on the best water treatment technique between reverse osmosis and nanofiltration in order to reduce sulfate, magnesium and calcium which cause problems causing irreversible damage to the injection well. To do this, the efficiency of two membranes (NF270-4040 and BW270-4040) vis-à-vis the retention of these particles was tested by Wave software and compared to the experimental results. Then, the influence of the different operating conditions was identified to finally study the different membrane configurations possible to achieve a production of 50m³ / day.

Keywords : Nanofiltration, reverse osmoses, membrane configuration.

Résumé

Une étude a été menée sur la meilleure technique de traitement d'eau entre l'osmose inverse et la nanofiltration afin de réduire le sulfate, le magnésium et le calcium qui engendrent des problèmes causant des dégâts irréversibles au puit d'injection. Pour ce faire, l'efficacité de deux membranes (NF270 4040 et BW30-4040) vis-à-vis la rétention de ces particules a été testée par le logiciel Wave et comparée aux résultats expérimentaux. Ensuite, l'influence des différentes conditions opératoires a été identifiée pour finalement, étudier les différentes configurations membranaires possible pour atteindre une production de 50m³/jour.

Mots clés : Nanofiltration, Osmose inverse, configuration membranaire

Tables des matières

Liste des tableaux
Liste des figures
Liste des symboles
Listes des éléments chimiques
Définitions

Introduction générale..... 17

1 Généralités sur les traitements d'eau et les puits d'injection..... 21

1.1 Introduction..... 21

1.2 Production de pétrole avec injection d'eau..... 21

1.3 Risques liés à l'injection de l'eau..... 22

1.3.1 Corrosion..... 22

1.3.2 Bouchage de puits / entartrage 23

1.3.2.1 Source de formation des dépôts..... 23

1.3.2.2 Les types de dépôts minéraux 23

1.3.2.3 Les conséquences de l'entartrage 23

1.3.3 Incompatibilité des eaux 24

1.4 Traitement des eaux 24

1.5 Dégrillage et tamisage 25

1.6 Chloration 25

1.7 Clarification 25

1.7.1 La coagulation 25

1.7.2 La floculation 26

1.7.3 La décantation 26

1.7.4 Filtration..... 27

1.7.4.1 Filtration à sable 27

1.7.4.2 Adsorption sur charbon..... 27

1.7.4.3 Résine à échange d'ion 28

1.8 Prévention de l'entartrage..... 28

1.9 Dé-chloration 29

1.10 Conclusion 29

2 Les techniques membranaires 31

2.1 Introduction..... 31

2.2 Généralités sur les procédés membranaires 31

2.2.1 Historique 31

2.2.2 Définitions de la membrane 32

2.3 Classification des membranes..... 32

2.3.1 Membranes Minérales..... 32

2.3.2 Membranes Organiques 32

Table des matières

2.3.3	Membranes Composites.....	33
2.3.4	Membranes échangeuses d'ions.....	33
2.4	Grandeurs caractéristiques de la filtration membranaire.....	33
2.5	Différents procédés de séparation membranaire.....	34
2.5.1	Microfiltration (MF).....	34
2.5.2	Ultrafiltration (UF).....	35
2.5.3	Nanofiltration (NF).....	35
2.5.4	Osmose inverse (OI).....	36
2.6	Les modules.....	36
2.6.1	Module plan.....	37
2.6.2	Module tubulaire.....	37
2.6.3	Module spiralé.....	38
2.6.4	Modules fibre creuse.....	38
2.7	Mise en œuvre des membranes.....	39
2.7.1	Filtration frontale.....	39
2.7.2	Filtration tangentielle.....	39
2.8	Configuration du système membranaire.....	39
2.8.1	Système mono-étage.....	40
2.8.2	Système di- étages en série rejet.....	40
2.8.3	Système di-étage en série production.....	40
2.8.4	Système di- étages hybrides rejet- production.....	41
2.9	Conclusion.....	41
3	Présentation du cas d'étude et choix de la technique de séparation.....	44
3.1	Introduction.....	44
3.2	Présentation de la zone d'étude.....	44
3.3	Situation géographique.....	45
3.3.1	Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS).....	45
3.3.2	Définitions des aquifères de la zone d'étude.....	45
3.3.2.1	Complexe terminal.....	45
3.3.2.2	Continental Intercalaire.....	46
3.3.2.3	Aquifères jurassiques.....	46
3.3.2.4	Aquifères du Dévonien et Cambro-Ordovicien.....	46
3.4	Description du pilote.....	47
3.4.1	Membranes utilisées.....	48
3.5	Eau d'injection.....	49
3.6	Choix de la technique de séparation.....	50
3.6.1	Objectif du traitement.....	50
3.6.1.1	Risques liés à la qualité d'eau d'injection.....	51
3.6.1.2	Risques liés aux produits chimiques injectés.....	51
3.6.2	Effet de la concentration des particules de l'eau d'injection.....	51
3.6.3	Effet du débit d'injection.....	52
3.6.4	Présentation des résultats de simulation et comparaison entre la nanofiltration et l'osmose inverse.....	52
3.6.4.1	Présentation du logiciel Wave DOW.....	52

Table des matières

3.6.4.2	Simulation avec le logiciel	52
3.6.4.3	Simulation et comparaison des résultats	55
3.7	Conclusion	56
4	Étude de l'influence des conditions opératoires sur la nanofiltration et comparaison avec les résultats expérimentaux	58
4.1	Introduction.....	58
4.2	Influence des conditions opératoires sur le flux de nanofiltration	58
4.2.1	Influence de la température de l'eau sur le débit et la qualité d'eau du perméat ...	59
4.2.2	Influence de la pression opératoire sur le débit et la qualité d'eau du perméat.....	61
4.2.3	Influence du débit d'eau d'alimentation sur la qualité d'eau du perméat	62
4.3	Validation des résultats de simulation.....	63
4.3.1	Présentation des résultats d'analyse des échantillons	63
4.3.2	Comparaison des résultats de simulation et les résultats expérimentaux	63
4.3.3	Rétention de Ca^{2+} , Mg^{2+} et SO_4^{2-}	64
4.4	Optimisation de la configuration membranaire	65
4.4.1	Influence du débit d'alimentation.....	66
4.4.2	Configurations proposées.....	69
4.4.2.1	Configuration à trois étages.....	69
4.4.2.2	Configuration à un seul étage.....	71
4.5	Conclusion	73
	Conclusion générale	75
	Références bibliographiques.....	76

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Facteurs de la corrosion.	22
Tableau 3-1 : Caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère Dévonien.	46
Tableau 3-2 : Caractéristiques des membranes utilisées.	49
Tableau 3-3 : Composition chimique de l'eau de TFT.	50
Tableau 3-4 : Résultats de simulation du traitement par nanofiltration et osmose inverse	55
Tableau 4-1 : Conditions opératoires fixées pour évaluer les performances du système de nanofiltration.	59
Tableau 4-2 : Concentration des particules dans l'eau filtrée pour une pression de 6bars en fonction de la température pour	60
Tableau 4-3 : Concentration des particules dans l'eau filtrée pour une température de 30°C en fonction de la pression opératoire	62
Tableau 4-4 : Qualité du perméat avec deux débits d'alimentation à 6 bars et 30 °C	62
Tableau 4-5 : Résultats des analyses et des simulations du taux de rétention des ions par nanofiltration.	64
Tableau 4-6 : L'influence du débit d'alimentation pour un système bi-étagé sur le taux de conversion.	66
Tableau 4-7 : Les configurations possible pour une installation à deux étages.	67
Tableau 4-8 : Taux de rétention de SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+} pour la configuration N°3 de deux étages.	68
Tableau 4-9 : Débit du perméat et du rétentat de chaque étage pour la configuration N°3 à deux étages.	68
Tableau 4-10 : Concentration des ions dans le perméat et le concentrât de chaque étage pour la configuration 3 à deux étages.	69
Tableau 4-11 : Débit du perméat et du rétentat de chaque étage pour une configuration à 3 étages.	70
Tableau 4-12 : Débit du perméat et du rétentat de chaque étage pour une configuration à trois étages.	72
Tableau 4-13 : Qualité d'eau traitée finale.	73

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1-1 : Bac à décantation (hmf.enseiht.fr).....	27
Figure 2-1 : Phénomène d'osmose inverse	36
Figure 2-2 : Module plan	37
Figure 2-3 : Membrane tubulaire	38
Figure 2-4 : Module à fibres creuses.	39
Figure 3-1 : Situation géographique du bassin de TFT. (Ihaddadene, 2018).....	44
Figure 3-2 : Carte du système aquifères du Sahara septentrional (SASS)	45
Figure 3-3 : Unité pilote de traitement d'eau	47
Figure 3-4 : Installation de traitement d'eau d'injection.	48
Figure 3-5 : Plateforme du logiciel Wave DOW	54
Figure 3-6 : Ions favorables et nocifs dans l'eau traitée par nanofiltration.....	56
Figure 4-1 : Taux de conversion pour un débit initial de 0,42m ³ /h en fonction de la température.	60
Figure 4-2 : Taux de conversion pour un débit initial de 0,42m ³ /h en fonction de la pression.	61
Figure 4-3 : Débits mesurés d'eau d'alimentation, d'eau douce et de la saumure après traitement	63
Figure 4-4 : Variation de la concentration de SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ et Mg ²⁺ en fonction de la pression	65
Figure 4-5 : Configuration à deux étages.	68
Figure 4-6 : Concentration de Mg ²⁺ , Ca ²⁺ et SO ₄ ²⁻ dans l'eau traitée par 2 et 3 étages comparées.	70
Figure 4-7 : Configuration à trois étages	71
Figure 4-8 : Configuration à un seul étage	72

Liste des symboles

Liste des symboles

Symbole	Signification
°C	Degré Celsius
µm	Micro-mètre
BAM	Bioréacteur à membrane
DCO	Demande chimique en oxygène
DP	Division production
G	Gramme
H	Heure
J	Jour
Km	Kilometre
KPa	Kilo Pascal
MES	Matière en suspension
MF	Microfiltration
Mm	Millimetre
Mn	Minute
NF	Nanofiltration
OI	Osmose inverse
P	Pression
pH	Potentiel hydrogène
ppm	Partie Par Million 1 PPM= 1 mg/kg
PTM	Pression transmembranaire
Q _a	Débit d'alimentation

Liste des symboles

Q _p	Débit du perméat
S	Seconde
SASS	Système aquifère du Sahara septentrional
SWCTT	Single well chemical tracer test
T	Température
TDS	Taux de solides dissous
TFT	Tin Fouyé Tabankort
UF	Ultrafiltration

Liste des éléments chimiques

Liste des éléments chimiques

Élément	Nomenclature
$\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3m-n}$	Polymers d'aluminium
Ca^{2+}	Ion calcium
CaCO_3	Carbonate de calcium
Cl^-	Ion chlorure
Cl_2	Dichlore
CO_3^{2-}	Ion carbonate
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Le sulfate de fer
FeCl_3	Chlorure ferrique
Fr	Fer
H_2O	Molécule d'eau
HCl	Chlorure d'hydrogène
K^+	Ion potassium
Mg^{2+}	Ion magnésium
MgCO_3	Carbonate de magnésium
Mn	Manganese
NaAlO_2	Aluminate de sodium
NaHSO_3	Bisulfite de sodium
NH_4^+	Ammonium
O_2	Oxygène
SO_4^{2-}	Ion sulfate
Sr^{2+}	Ion strontium
TiO_2	Dioxyde de titanium
ZrO_2	Oxyde de zirconium

Définitions

Définitions

A

Adoucissement : c'est un procédé appliqué à une eau pour rendre son odeur moins forte et diminuer l'action corrosive de ses composés et dans certains cas pour une dilatation partielle. Son équivalent en Anglais est : Sweetening.

E

Eau de production : c'est une eau naturellement présente dans les réservoirs pétroliers, elle est récupérée durant la production du pétrole et du gaz. Son équivalent en Anglais est : Produced water.

F

Fracturation hydraulique : c'est un procédé de récupération du pétrole, elle se présente en une fissuration massive d'une roche en y injectant un liquide sous pression, cette technique est utilisée dans les substrats denses. Son équivalent en Anglais est : Hydrofracking.

G

Gisement pétrolier : c'est un ensemble de réservoir souterrain, conventionnels délimités géographiquement et qui contiennent des fluides avec intérêt. Son équivalent en Anglais est : Oil Field.

H

Huile : c'est un nom donné au pétrole brut. Son équivalent en Anglais est : Oil.

Hydrocarbures : c'est les constituants des pétroles bruts et les produits pétroliers. Donc c'est les molécules chimiques les constituants, en raison de l'hydrogène et du carbone dont ils sont formés. Son équivalent en Anglais est : Hydrocarbons.

M

Matière organique : c'est une substance végétale ou animale morte. Son équivalent en Anglais est : Organics mater.

P

Puits d'injection : c'est le puits utilisé pour injecter des fluides dans un gisement pétrolier afin de faciliter la récupération des hydrocarbures. Son équivalent en Anglais est : Injection-Well.

R

Récupération assistée des hydrocarbures : c'est des méthodes de récupération utilisées pour accroître la production de pétrole en utilisant des techniques ou matériaux inutilisés dans les méthodes normales. Son équivalent en Anglais est : Enhanced Oil Recovery.

Définitions

S

Séparation : isoler les différents composés d'un mélange. Son équivalent en Anglais est : Settling.

T

TDS : le taux des solides dissous dans une solution. Son équivalent en Anglais est : Total dissolved solids.

Turbidité : c'est un taux de non-transparence de l'eau causée par la présence des matières en suspension. Son équivalent en Anglais est : Turbidity.

Introduction générale

Le Sahara algérien est caractérisé par un désert qui s'étend de l'Atlas saharien et des Aurès jusqu'aux frontières Maliennes, Nigériennes et libyennes, sur une distance de plus de 2000 km nord-sud. Il se distingue par des précipitations très peu abondantes et irrégulières, ce qui fait de lui l'un des déserts les plus chauds et les plus arides du globe avec des températures très élevées dépassant les 45°C (*Ihaddadene, 2018*). Mais cela n'empêche pas que l'eau soit présente en abondance dans son souterrain, grâce à son système aquifère du SASS, plus précisément au bas Sahara.

La qualité de ces eaux souterraines diffère d'une région à une autre selon les roches traversées. Dans certaines régions, la teneur en sels dépasse les 7g/L comme c'est le cas dans les régions de Ouargla, El Oued et Biskra. Cela peut être attribué à la proximité de la nappe phréatique. Cela est aussi à l'origine de la stérilisation des sols agricoles. Toutefois l'eau est utilisée à d'autres fins, principalement dans l'industrie pétrolière.

La récupération des hydrocarbures dans le cas de l'activité pétrolière est étroitement liée à la production d'eau et est utilisée en quantité massive. L'eau peut provenir du réservoir pétrolier (eau de formation) ou d'un autre réservoir à proximité. Une fois extraite, elle est utilisée pour plusieurs opérations dont ceux du forage, de la fracturation hydraulique, de la complétion, du traitement des puits outre la récupération des hydrocarbures.

L'eau est injectée dans les réservoirs par l'intermédiaire des puits spéciaux, appelés puits injecteurs. Elle est utilisée donc pour compenser la diminution de pression du réservoir mis en production, et également pour améliorer l'efficacité de déplacement et l'extraction de l'huile et du gaz, cette méthode de récupération des hydrocarbures est dite 'récupération assistée'.

Lors de l'extraction des hydrocarbures, l'ingénieur fait face à plusieurs problèmes, les plus fréquents sont les risques de colmatage, de bouchage des puits d'injection, de corrosion des conduites et d'incompatibilité des eaux. Donc il est appelé à trouver des solutions pour palier et diminuer les risques cités ci-dessus. Aussi, il se base sur les propriétés du système à étudier (pression, température, ...), de la nature du risque et des résultats attendus pour prendre des décisions sur le procédé et la technique à utiliser pour régler le problème.

Pour ce qui est du réservoir de Lias, l'eau qui s'y trouve est caractérisée par de forte concentration en Mg^{2+} , Ca^{2+} et SO_4^{2-} . En effet, lors de l'injection de l'eau pour le maintien de pression, le sulfate s'associe avec le baryum (présent dans le gisement) et forme un solide insoluble (sulfate de baryum) engendrant le colmatage des réservoirs pétroliers. De même pour les cations divalents qui s'associent à des agents chimiques nécessaires à l'extraction du pétrole (polymère et surfactants) en réduisant leur efficacité.

Introduction générale

Plusieurs techniques de traitement d'eau existent : traitement chimique, traitement biologique, traitement physique. Il s'agit de choisir celle qui assure un débit et une qualité d'eau cibles requis pour les puits d'injection.

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude, nous sommes appelées à choisir la meilleure filière de traitement membranaire des eaux de Lias, situé dans la zone de Tin Fouyé Tabankort à Ilizi, entre la nanofiltration et l'osmose inverse tout en proposant une configuration membranaire qui assure la réduction de Mg^{2+} , Ca^{2+} et SO_4^{-2} et la production de $50m^3/jr$.

Plusieurs logiciels ont été développés dont le Wave DOW, spécialisé dans le traitement membranaire (Osmose Inverse, Ultrafiltration et les Résines à Échange d'Ions). Les décisions qu'il faut prendre doivent donc reposer sur les résultats des simulations et être compatibles ou proches des résultats obtenus à l'échelle du laboratoire.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres dont, le premier présente des généralités sur le traitement des eaux d'injection suivi d'un second chapitre dédié aux techniques de filtration membranaire, leurs caractéristiques fondamentales et les différentes configurations possible pour la conception de notre système. Le troisième chapitre porte sur une étude comparative entre la nanofiltration et l'osmose inverse afin de choisir la meilleure technique et en dernier, un quatrième chapitre consacré à l'étude de l'influence des différentes conditions opératoires sur le fonctionnement des membranes.

Partie 1

Étude Théorique et Recherche

Bibliographique

Chapitre 1

Généralité sur les prétraitements de l'eau

1 Généralités sur les traitements d'eau et les puits d'injection

1.1 Introduction

La science du traitement des eaux a un rôle primordial dans l'industrie pétrolière. En effet, des travaux de recherche ont été menés pour améliorer la récupération finale des gisements dont la récupération assistée est une des techniques les plus utilisées qui s'agit d'injecter un fluide sous pression pour augmenter la production.

Il est constaté que la plupart des gisements à grand usage sont systématiquement exploités par injection d'eau. La disponibilité en quantité suffisante de l'eau et le faible coût peuvent justifier cette utilisation répandue. Cependant, cette technique présente des inconvénients majeurs (corrosion, dépôt, ...) liés à l'incompatibilité des eaux d'injection et les eaux de gisement provoquent des dégradations irréversibles pour les installations de production. C'est pour cela que plusieurs chercheurs et scientifiques traitent les différentes filières de traitement d'eau.

Cependant, un prétraitement d'eau est nécessaire en amont du traitement membranaire afin d'éliminer les MES (matières en suspension), c'est généralement des matières colloïdales et macromolécules susceptibles d'augmenter la turbidité et capable de colmater les membranes.

Quelles sont toutes les étapes à prendre en compte avant le traitement membranaire ? et quels sont les risques les plus courants ?

1.2 Production de pétrole avec injection d'eau

Dans l'industrie pétrolière, la technique d'injection d'eau dans la roche réservoir permet d'augmenter la pression dans le champ pétrolifère, ce qui le pousse à surgir dans un autre puits, l'eau est injectée par l'intermédiaire d'un puits, appelé puits injecteur. L'injection d'eau permet d'augmenter la production des hydrocarbures.

Le dispositif d'injection d'eau contient trois principales parties nécessaires pour le fonctionnement du processus d'injection, on cite donc :

- Des puits sources : ce sont des puits producteurs d'eau dans le cas où l'eau est d'une source souterraine (comme dans notre cas). La source peut cependant être une eau de surface ou une eau de mer.
- Une station de pompage dont l'alimentation provient de notre eau source (puits source)

- Une station de traitement conçue pour traiter l'eau de source afin de permettre son injection dans le puit.

1.3 Risques liés à l'injection de l'eau

Il est clair que le procédé d'injection d'eau (dans un puit pour la récupération des hydrocarbures) peut engendrer certains risques, auxquels on doit faire face, la grande partie de ces risques est liée à la qualité de l'eau, ce qui fait qu'un traitement est primordiale avant toute utilisation afin de diminuer ces risques.

Les risques les plus fréquents sont la corrosion, le colmatage, bouchage de puits, l'entartrage et le problème d'incompatibilité des eaux.

1.3.1 Corrosion

La corrosion est une interaction d'un matériau avec et un agent corrosif avec lequel il est en contact, il conduit à la consommation du métal ou du matériau tout en formant une forme réduite de l'agent corrosif (*Ihaddadene, 2018*).

Les facteurs de corrosion sont nombreux, ils peuvent être attribués à la présence du sulfate, à l'acidité... Le tableau 1-1 présente les principaux facteurs de corrosion.

Tableau 1-1 : Facteurs de la corrosion.

Facteurs du milieu corrosif	<ul style="list-style-type: none">- La concentration des éléments chimiques- Teneur en O₂- Ph du milieu et sa température- La pression
Facteurs métallurgiques	<ul style="list-style-type: none">- Composition de la roche- Le procédé d'élaboration du puit injecteur- Les impuretés du milieu- Le traitement thermique et mécanique
Facteurs liés aux conditions d'emploi	<ul style="list-style-type: none">- État de la surface- La forme des installations- Les inhibiteurs employés- Procédé d'assemblage
Facteurs dépendant du temps	<ul style="list-style-type: none">- Vieillessement du matériel- Tensions mécaniques

Le phénomène de corrosion peut être amplifié ou amoindri selon plusieurs facteurs dont la température, le pH, ... (*Ihaddadene, 2018*).

- Plus la température est élevée plus le phénomène de la corrosion est accéléré car une haute température diminue la stabilité des métaux et accélère la cinétique des réactions
- Plus le pH est faible, plus la concentration des protons est élevée et plus l'agressivité du milieu augmente. La corrosion augmente avec la diminution du Ph.
- Les chlorures sont des ions agressifs, donc ils sont à l'origine de corrosions locales.

1.3.2 Bouchage de puits / entartrage

Ce phénomène est dû à la formation des dépôts, qui vont ensuite, après une certaine période, provoquer le bouchage du puits. Les minéraux de l'eau sont dissous et en équilibre, mais lors de l'exploitation du puits ces minéraux risquent de précipiter dans le réservoir et former des dépôts, cela revient au changement des conditions thermodynamiques, donc la Température, la Pression et le pH.

1.3.2.1 Source de formation des dépôts

- L'incompatibilité entre les eaux d'injection et les eaux de formations ;
- Changement des conditions thermodynamique (T, P et le pH), par exemple l'augmentation de la température réduit la solubilité des sels ;
- L'évaporation, en augmentant la concentration des solides dissous.

1.3.2.2 Les types de dépôts minéraux :

Les dépôts les plus rencontrés sont les suivants :

- Le carbonate de Calcium CaCO_3 , il est dû à l'augmentation du pH, donc le CO_3^{2-} complexe avec les Ca^{2+} puis se précipitent ;
- Les composés ferreux (FeS , FeCO_3 ...) ce type de dépôt est rencontré lorsque on utilise un produit acide pour le traitement de l'eau ;
- Les sulfates de Baryum, Strontium, Calcium (BaSO_4 , SrSO_4 , CaSO_4), ils se produisent lorsque l'eau d'injection est riche en SO_4^{2-} .

1.3.2.3 Les conséquences de l'entartrage

Les conséquences de l'entartrage sont :

- Diminution de la section de passage dans le puits donc une augmentation des pertes de charges ;
- Possibilité de corrosion sous les dépôts ;

- Diminution de l'écoulement des hydrocarbures due à la réduction de la perméabilité (cela revient à la restriction des sections de passage dans la roche réservoir) ;
- Du point de vue économique, les coûts de réparations des équipements sont élevés.

1.3.3 Incompatibilité des eaux

Quel que soit l'origine de l'eau source elle reste chargée de certains composés chimiques, des ions organiques et inorganiques, des gaz dissous, des cations, des anions et des bactéries. Tous ces composés présents dans l'eau de source la rendent incompatible avec l'eau présente dans le gisement pétrolier, ce qui causes plusieurs problèmes dont la corrosion et la formation des dépôts.

Quand cette eau est injectée dans la roche réservoir, des réactions chimiques entre les composés chimiques en place et les eaux injectées peuvent avoir lieu, les plus importantes d'entre elles sont les suivantes :

- Le gonflement des argiles : dans le cas où l'eau est douce, par échange d'ions entre cette dernière et l'argile ça peut engendrer une réduction de la perméabilité de la roche réservoir.
- Les changements de salinité peuvent amorcer la libération de certains éléments, comme les argiles et certains minéraux.
- Si les sels dans l'eau d'injections sont différents des sels de l'eau de formation, des dépôts de précipités peuvent se former, ce qui endommage la formation.

1.4 Traitement des eaux

Il existe différents procédés de traitements d'eau qui diffèrent selon l'eau brute qui doit être traitée et qui peuvent être classés selon quatre catégories : traitement physique (dégrillage, décantation, filtration, tamisage), traitement physico-chimique (coagulation-floculation), traitement chimique (oxydation, neutralisation, acidification) et un traitement biologique.

Pour un traitement membranaire, les traitements cités ci-dessus sont considérés comme un prétraitement qui a pour but d'extraire de l'eau brute les graviers, les sables et les particules minérales plus ou moins fines et cela pour éviter les dépôts dans les canaux et conduites et à protéger les pompes et les membranes de l'abrasion tout en évitant le colmatage des modules par les matières en suspension, soit par des micro-organismes soit par des dépôts de sel.

Les caractéristiques qui interviennent dans la définition et le type du prétraitement sont :

- Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter : MES, turbidité, COT (Carbone organique total), hydrocarbures, algues, composition chimique, pH ;

- Les conditions de fonctionnement des membranes : taux de conversion, pression ;
- Le type de membrane utilisée.

Le traitement d'une eau brute après son captage dépend bien sûr de sa qualité et de ses constituants, ces derniers varient dans le temps et d'une région à une autre. Donc l'eau doit être analysée en continu avant de subir le traitement nécessaire.

Les principales étapes du prétraitement sont les suivantes :

- 1- Dégrillage et tamisage
- 2- Chloration
- 3- Clarification
- 4- Prévention de l'entartrage
- 5- Déchloration

1.5 Dégrillage et tamisage

Cette étape a pour but d'éliminer les plus gros débris, et cela par le passage de l'eau captée à travers des grilles et tamis. Cette étape n'est nécessaire que dans le cas où notre eau contient beaucoup de MES,

1.6 Chloration

L'objectif de cette étape est d'inactiver les micro-organismes (bactéries), les microalgues, champignons. La prolifération des organismes vivants est bloquée par un procédé de désinfection. Sinon cela peut conduire à l'obstruction de l'installation ou au colmatage des membranes. Le procédé de chloration le plus répandu est l'injection du chlore, dissous dans l'eau, il libère l'ion hypochloreux (HClO^-) qui est l'agent actif de la stérilisation

1.7 Clarification

La clarification représente une étape très importante dans le traitement de l'eau, comme c'est cité dans l'introduction, son but est d'éliminer l'ensemble des MES (minérales ou organiques) d'une eau.

La clarification se décompose généralement en quatre étapes : la coagulation, la floculation, la décantation et puis la filtration. (*Harez et Djelailia 2014*)

1.7.1 La coagulation

Le mot coagulation vient du mot grec « cogulare » qui signifie aller ensemble ou agglomérer, le principe de la coagulation consiste à ajouter des additifs chimiques, appelés

coagulants, dans une solution pour assembler les particules dispersées afin de les déstabiliser pour favoriser leur agglomération.

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules et produire des floccs sont :

- Le sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$;
- Le chlorure ferrique $\text{FeCl}_3, 6 \text{H}_2\text{O}$;
- L'aluminate de sodium NaAlO_2
- Le sulfate ferrique $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 9 \text{H}_2\text{O}$;
- Le sulfate ferreux $\text{FeSO}_4, 7 \text{H}_2\text{O}$;
- Les polymères d'Aluminium $\text{Al}_n (\text{OH})_m \text{Cl}_{3m-n}$.

Les coagulants doivent répondre à plusieurs impératifs. Ils doivent être :

- Peu coûteux ;
- Inoffensifs (eux-mêmes et tous leurs sous-produits de décomposition) ;

1.7.2 La floculation

Après être déstabilisées, les particules colloïdales rentrent en contact les unes avec les autres et ont tendance à s'agglomérer. La floculation a donc pour but d'augmenter la probabilité de contact entre ces particules. Pour cela, on ajoute des produits chimiques, appelés adjuvants de floculation, ils modifient ainsi le comportement des coagulants pour former des floccs, plus la température est élevée plus le flocc est grand, sa densité varie selon la nature de l'eau, les impuretés à éliminer et le coagulant utilisé.

Parmi les flocculants utilisés, on cite :

- Les flocculants minéraux, comme la silice activée associée au sulfate d'aluminium, et elle donne de très bons résultats ;
- Polymères non ioniques ;
- Poly électrolytes anioniques ;
- Poly électrolytes cationiques.

1.7.3 La décantation

L'étape de la décantation intervient après la coagulation-floculation, l'eau entre dans un décanteur à vitesse réduite de façon à éviter les turbulences, ainsi les floccs se déposent par effet gravitaire au fond du décanteur appelés donc « dépôt » et l'eau clarifiée est extraite en surface.

Plusieurs facteurs influencent la décantation notamment dont le type des particules, leurs

diamètres et leur densité (voir annexe 1).

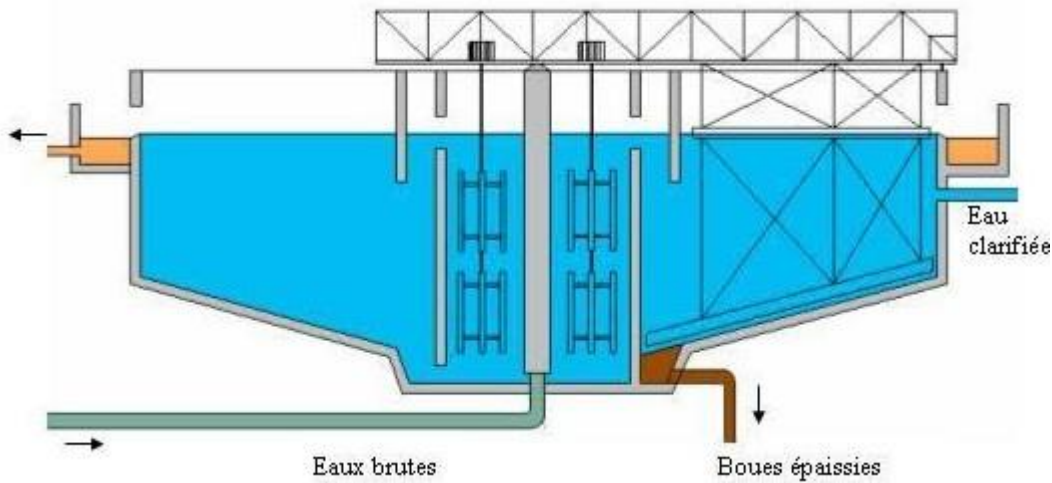


Figure 1-1 : Bac à décantation (hmf.enseiht.fr).

1.7.4 Filtration

Il existe plusieurs procédés de filtration

1.7.4.1 Filtration à sable

C'est l'un des procédés les plus répandus dans le traitement de l'eau, elle sert à éliminer les MES en fixant les particules les plus fines jusqu'à un diamètre de 10 μm . Comparée à la décantation, le seuil de coupure est plus fin, ce qui fait qu'elle filtre mieux l'eau.

Cette opération nécessite un nettoyage périodique pour éliminer les MES retenues entre les grains de sable pour ne pas ralentir le passage de l'eau.

Il existe deux types de filtre à sable :

- Le filtre à sable de prétraitement : il fait un traitement sommaire de l'eau.
- Le filtre à sable biologique : il fait un traitement complet et efficace.

Le filtre à sable est caractérisé par son efficacité, une utilisation facile, sa capacité de filtrer de grosses quantités d'eau et il est peu coûteux.

1.7.4.2 Adsorption sur charbon

Le charbon est un matériau à base de carbone obtenu par calcination et activation de bois, houille, tourbe ou noix de coco.

La filtration de l'eau au charbon est utilisée depuis des siècles pour filtrer l'eau, la majorité des fontaines à eau sont équipées d'un système de filtration à charbon pour garantir une eau propre

et agréable. Le filtre à charbon a le même principe de fonctionnement que le filtre à sable, donc les MES s'adsorbent sur la surface des particules de charbon. Comme il agit sur la qualité organoleptique de l'eau en lui retirant le chlore, les contaminants et les autres facteurs de goûts et de l'odeur.

Son rôle principal est de retenir les MES, comme il permet le développement des bactéries qui éliminent certains composés (NH_4^+ , Fr, Mn) et diminue la concentration en chlore, ce filtre est recommandé pour l'élimination des odeurs et les polluants gazeux.

1.7.4.3 Résine à échange d'ion

L'échange d'ions est un procédé permettant de récupérer une famille ionique d'une solution contaminée par échange contre un autre type d'ion de même nature à l'aide d'un échangeur d'ions.

L'échangeur d'ion est une substance solide qu'on place dans le liquide à traité, il a la capacité de libérer des ions ou de fixer des ions contenus dans ce liquide. Ils sont utilisés pour adoucir l'eau, il existe aussi des échangeurs d'ions sélectifs qui fixent une espèce d'ion particulière.

Une résine échangeuse d'ions fonctionne par cycle décomposé en 4 phases :

- **La saturation**

Dans cette étape, on percole la solution polluée dans la résine jusqu'à sa saturation.

- Le dé-tassement de lit

La phase du dé-tassement consiste à éliminer les particules qui sont coincées en amont de la résine en procédant par contre-lavage.

- **La régénération**

C'est dans cette étape qu'on fait intégrer dans la colonne une solution d'ions spécifique pour capturer les molécules désirées, cette réaction est générée par inversion de l'équilibre chimique. Pour cette phase on utilise généralement des solutions à base d'acide chlorhydrique, acide sulfurique, de soude, ou une solution salée cela varie selon le PH de la résine et ses caractéristiques.

- **Le rinçage**

Le rinçage est une étape essentielle, afin d'éliminer la solution de régénération

1.8 Prévention de l'entartrage

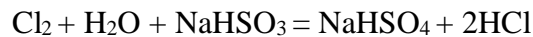
L'entartrage est le fait que les équipements sont chargés de tartre (CaCO_3 , CaCO_4 , $2\text{H}_2\text{O}\dots$), c'est une formation sur les parois contenant des dépôts cristallins adhérents, appelés tartres. Il est constitué essentiellement de carbonates de calcium dans des circuits alimentés par des eaux naturelles. Les tartres formés par le sulfate de calcium sont impérativement rencontrés dans les procédés de dessalement des eaux.

Pour éviter l'entartrage de notre installation, il existe plusieurs méthodes, et cela en injectant dans l'eau des inhibiteurs d'entartrage ou antitartres, les produits généralement utilisés sont :

- Les polyphosphates : efficaces et bon marché, mais ils peuvent former des dépôts d'ortho-phosphates par suite de phénomènes d'hydrolyse.
- Les polymères carboxyliques : efficaces sur la majorité des tartres, mais ils sont chers.
- L'acidification de l'eau, en provoquant la décomposition des bicarbonates est aussi un moyen efficace pour empêcher les dépôts de CaCO_3 ; $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

1.9 Dé-chloration

La dé-chloration est indispensable lors d'un excès de chlore et vu les teneurs élevées en chlore au sud, un procédé de dé-chloration est nécessaire. La solution la plus utilisée pour réduire le chlore est l'ajout du bisulfite, le résultat obtenu est efficace avec un coût relativement faible



Le charbon actif granulaire peut être également utilisé, pour réduire la teneur en chlore toute fois ce type de procédé de dé-chloration est coûteux étant donné que la réaction d'adsorption est de nature chimique irréversible conduisant à la formation de CO_2

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différentes étapes de prétraitements nécessaires pour notre cas d'étude afin d'éliminer les MES et certains ions de l'eau d'injection, comme nous avons cité les propriétés et les caractéristiques de chaque technique de séparation, et cela pour mieux comprendre l'origine des risques liés à l'utilisation des eaux souterraines, tout en présentant l'origine et les causes de chaque risque afin de pouvoir bien choisir la technique de traitement la mieux placée pour diminuer tous les risques liés à la qualité d'eau et au processus d'injection.

Dans les prochains chapitres, nous allons proposer des modifications de l'installation selon les propriétés des outils de traitement et proposer des solutions pour atteindre le but du travail.

Chapitre 2 : Les techniques membranaires

2 Les techniques membranaires

2.1 Introduction

Avec le développement accru des populations, de l'industrie et du niveau de vie, la consommation d'eau n'a cessé de croître, et par conséquent, les ressources hydriques n'ont cessé de diminuer durant les années.

Afin de pouvoir fournir de l'eau douce et traiter les volumes considérables d'eaux usées en répondant aux exigences imposées par la réglementation en vigueur dans le cas des puits d'injection, une des solutions possibles est la technique des séparations membranaires. En effet cette technique de séparation, et de par ses performances énergétiques et technico-économiques de plus en plus concurrentielles, est de plus en plus utilisée dans diverses industries, telles que l'industrie chimique, alimentaire, pharmaceutique et le traitement des eaux usées.

Dans ce chapitre, après quelques généralités, les différents types de membranes de filtration, leurs structures, leurs géométries et leurs modes de fonctionnement sont ensuite présentés.

2.2 Généralités sur les procédés membranaires

2.2.1 Historique

Au milieu du 18^{ème} siècle, Jean-Antoine Nollet a remarqué que lorsque la vessie du porc était en contact avec un mélange eau-éthanol d'un côté et de l'eau pure de l'autre, l'éthanol la traversait préférentiellement. Il s'agit de la première étude sur l'utilisation des membranes et la découverte du phénomène d'osmose (*Ahoulé, 2016*).

Ce n'est que durant les années 1970 que le développement de la technologie membranaire et son application généralisée ont vu le jour dans l'espoir de résoudre tous les problèmes de séparation. À l'époque, les membranes n'étaient pas considérées comme performantes pour toutes applications.

De nombreuses applications de traitement d'eau et d'effluents industriels font appel aujourd'hui à la filtration membranaire. Les applications commerciales des membranes les plus importantes aujourd'hui sont l'osmose inverse pour le dessalement de l'eau.

À ce jour, en raison des limitations inhérentes aux membranes (faible flux ou sélectivité) ou du fait des déficiences techniques du système n'ont pas été surmontées, des recherches sont en cours sur certaines applications des membranes (celles de la récupération des arômes vaporisés, les réacteurs enzymatiques à membrane, etc.).

2.2.2 Définitions de la membrane

Une membrane, qui peut être poreuse ou dense, est définie comme étant une mince paroi d'une substance poreuse séparant deux compartiments qui permet le passage préférentiel de certains constituants sous l'action d'une force de transfert chimique (concentration ...) ou physique (pression). Les espèces de tailles inférieures à celle des pores de la membrane qui sont capable de passer du fait de la différence de pression entre l'amont et l'aval de la membrane, donnant deux fractions de différentes concentrations : la solution en amont de la membrane contenant les éléments retenus par la membrane qui constitue le rétentat et la solution en aval, contenant les éléments qui ont traversé la membrane (le perméat).

Par conséquent, la séparation membranaire permet de fractionner, concentrer ou purifier des solutions en contrôlant et en dirigeant l'échange de substances à travers des barrières sélectives (*Ahoulé, 2016*).

2.3 Classification des membranes

Les membranes peuvent être classées, selon le matériau de leurs fabrications, en quatre types.

2.3.1 Membranes Minérales

Ce sont des membranes composées de corps entièrement minéraux, de couches filtrantes d'oxydes minéraux (aluminium, ZrO_2 , TiO_2 ...) avec une faible épaisseur déposée sur un support macroporeux afin d'assurer la séparation des solutés grâce à un rayon de pore adapté provoquant la résistance mécanique assurée par le support.

Ces membranes présentent l'avantage de pouvoir être utilisées dans des conditions extrêmes de températures (jusqu'à 120°C) et d'agression chimique et thermique (Pression allant jusqu'à 40 bars et un pH de 1 à 14).

2.3.2 Membranes Organiques

Ce sont des membranes de polymères organiques (acétate de cellulose). Généralement un premier polymère d'une structure macroporeuse présente le support, suivi de couches actives composées d'un second type de polymère choisi selon la nature du problème à résoudre. Pour des raisons de cout, et bien que la résistance à la chaleur et la résistance chimique des membranes organiques soient relativement limitées, ce sont toujours les membranes les plus utilisées.

2.3.3 Membranes Composites

Ces membranes sont relativement récentes (1990). Elles ont des structures asymétriques de peau beaucoup plus fines que celle des autres types, et, se distinguent par une différence de leur nature chimique ou de leur état physique. Ce sont une superposition de plusieurs couches pouvant être organiques, organominérales ou minérales.

Généralement, les fabricants ne dévoilent pas la nature chimique de leurs membranes. Ils expriment leurs principales propriétés en termes de résistance mécanique (déterminant la durée de vie et l'intégrité des membranes), d'hydrophilicité (déterminant la résistance au colmatage) et de stabilité chimique (résistance aux agents lavant).

2.3.4 Membranes échangeuses d'ions

Principalement utilisées dans le domaine de dessalement de l'eau et du traitement des effluents des installations de protection, elles sont basées sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge ce qui a fait appel à d'autres techniques notamment d'électrodialyse, la dialyse... (ARZATE, 2008)

2.4 Grandeurs caractéristiques de la filtration membranaire

Il existe différents paramètres caractérisant le fonctionnement du procédé :

- Pression transmembranaire : PTM

La PTM est définie par la moyenne des pressions d'alimentation, P_A , et de rétentat, P_R , à laquelle on soustrait la pression du perméat. C'est la force motrice qui permet le transfert à travers une membrane.

$$PTM = \frac{P_A + P_r}{2} - P_p$$

PTM : pression transmembranaire (Pa)

- Flux de perméation

Le flux de solvant J_v traversant la membrane exprime la productivité du procédé, c'est le débit de perméation, Q_p , rapporté par la surface membranaire.

$$J_v = \frac{Q_p}{S}$$

J_v : flux ($m \cdot s^{-1}$ unité usuelle $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$)

Q_p : débit ($m^3 \cdot s^{-1}$)

S : surface géométrique de la membrane (m^2)

- Perméabilité hydraulique

Selon la loi de Darcy, le flux du solvant J_v traversant la membrane est proportionnel à la pression transmembranaire tel que :

$$J_v = J_p * PTM$$

J_p : perméabilité hydraulique de la membrane ($m s^{-1} Pa^{-1}$ ou $L h^{-1} m^{-2} bar^{-1}$)

PTM : pression transmembranaire (Pa)

Tel que J_p est valable pour toutes les membranes et permet de décrire la résistance de la membrane, R_m , vis-à-vis du solvant : $J_p = \frac{1}{R_m}$

- Taux de rétention

Le taux de rétention, ou taux de rejet, est donné par la relation suivante :

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_0}$$

C_0 : Concentration d'une particule dans la solution d'alimentation.

C_p : Concentration d'une particule dans le perméat.

- Seuil de coupure

Le seuil de coupure est défini comme étant la masse molaire du plus petit composé dont la rétention observée est 90 % s'exprimant par ($g mol^{-1}$).

2.5 Différents procédés de séparation membranaire

Il existe quatre principales techniques de séparation membranaire à gradient de pression : la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (OI) suivant la taille des éléments qu'elles retiennent. En effet, la pression est décroissante de l'osmose inverse à la microfiltration ; elle varie inversement avec la taille des pores.

2.5.1 Microfiltration (MF)

La microfiltration est un procédé de séparation, à basse pression, des particules en suspension ou de bactéries dont la taille se situe entre 0.1 et 10 μm telles que les émulsions d'huile, les bactéries, les levures, les plus gros colloïdes, les gros pigments et les gros virus...

Ses principales applications sont :

- La clarification des eaux.
- La séparation d'émulsion eau / huile.
- La débactérisation des solutions.

- La production d'eau potable (la microfiltration intervient ici comme une étape de prétraitement).
- Les bioréacteurs à membranes (BAM) (*SAID,2015*).

2.5.2 Ultrafiltration (UF)

Sous l'effet de la pression, généralement entre 2 et 5 bars, le solvant ainsi que les solutés de faible masse molaire traversent la membrane où les plus petites particules non retenues en MF seront retenues.

Ses principales applications sont :

- Le traitement des bains de dégraissage (élimination des matières en suspensions (MES) et d'huile émulsifiée)
- La récupération de cations métalliques par ultrafiltration assistée par complexation.
- Les bioréacteurs à membranes.
- La clarification des jus de fruit.

2.5.3 Nanofiltration (NF)

La nanofiltration est une technique relativement récente, située entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse, conçue pour obtenir une séparation très spécifique des composés à faible poids moléculaire (adoucissement de l'eau) sous l'effet d'une pression transmembranaire de 5 à 25 bars. Les membranes de nanofiltration possèdent également une sélectivité spécifique vis à vis des espèces ioniques. Elles présentent une forte sélectivité entre les ions mono- et multivalents ; une rétention plus faible des ions monovalents que des ions divalents et une forte rétention globale pour les sels minéraux à faible concentration.

Ce procédé présente l'avantage d'être moins coûteux du fait qu'il est moins consommateur d'énergie comparé à l'osmose inverse avec une structure moins dense permettant d'obtenir des flux de perméation supérieurs pour des pressions inférieures. Le perméat obtenu également par la nanofiltration est connu pour être moins polluant avec une Demande Chimique en Oxygène (DCO) plus faible.

Ses principales applications sont :

- La production d'eau potable ;
- L'élimination de pesticides et d'herbicides ;
- La déminéralisation des produits laitiers ;
- La purification des colorants solubles et des pigments ;

- La concentration d'antibiotiques.

2.5.4 Osmose inverse (OI)

L'osmose est un phénomène naturel rencontré lorsque deux liquides de concentration différente sont séparés par une membrane semi-perméable où la solution la moins concentrée passe vers la solution la plus concentrée afin de créer un équilibre (*Berland et Juery, 2012*).

L'osmose inverse, mouvement inverse de celui de l'osmose, se fait par application d'une pression supérieure à la pression osmotique exercée en amont de la membrane par la solution filtrée et qui varie généralement de 20 à 100 bars.

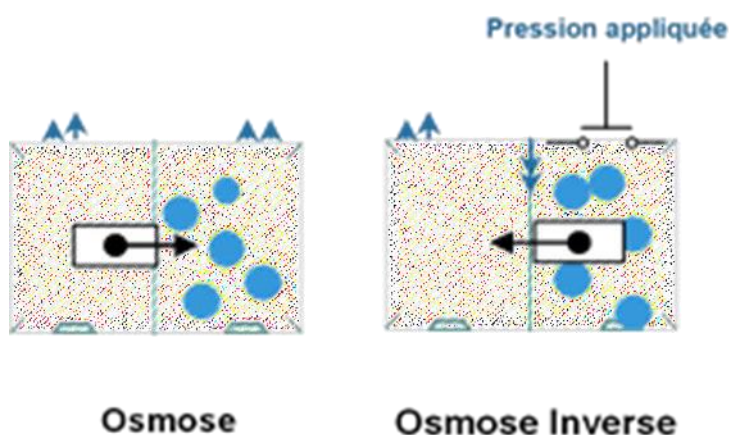


Figure 2-1: Phénomène d'osmose inverse

C'est un procédé haute pression, énergétiquement performant, mettant en œuvre des membranes denses pouvant retenir les ions monovalents par un mécanisme de solubilisation-diffusion : le solvant s'adsorbe dans la phase membranaire ensuite diffuse à travers le matériau.

Ses principales applications sont :

- Dessalement d'eau de mer et d'eaux saumâtres.
- La purification des eaux de process.
- Le traitement des condensats des évaporateurs.
- Production d'eau ultra pure (industrie électronique, pharmaceutique...).

2.6 Les modules

Il existe différents modèles de configuration des membranes permettant d'améliorer la performance globale du processus grâce à des supports sur lesquels sont montées, appelés modules.

Les modules membranaires couramment utilisés sont : le module plan, le module tubulaire, le module spiralé et le module à fibres creuses (*Bouchoux, 2004*).

2.6.1 Module plan

Les modules plans sont les plus anciens et qui ont été développés pour des applications commerciales à grande échelle et qui ne sont plus utilisés en raison de leurs prix élevés.

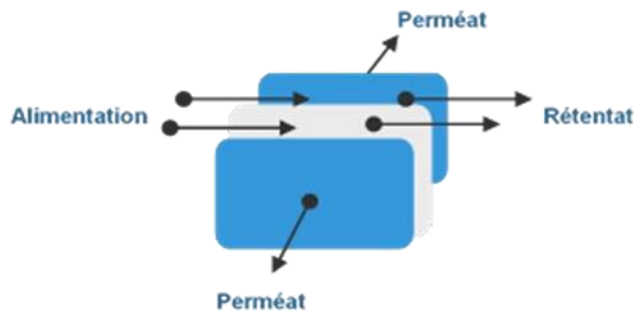


Figure 2-2: Module plan.

Ils sont composés de deux plaques d'extrémité, d'une membrane en feuille plate et des entretoises. La couche de membrane sélective est prise en sandwich entre deux plaques de support, qui fournissent des canaux d'écoulement au fluide des deux côtés de la membrane, L'écoulement du fluide aura lieu donc parallèlement à travers le module. Cette disposition offre une grande flexibilité et facilite le nettoyage et le remplacement de la membrane. Cependant, ces systèmes ne conviennent pas aux débits élevés, ils occupent trop de surface, ils sont facilement colmatés et nécessitent souvent une préfiltration.

2.6.2 Module tubulaire

Dans les modules tubulaires, les membranes se trouvent à l'intérieur d'un tube support. Les tubes sont déposés ensuite, en série ou en parallèle dans une enveloppe cylindrique où l'eau à traiter circule. Le perméat est recueilli l'extérieur donnant naissance à un écoulement turbulent à l'intérieur, les tubes donc constituent des canaux d'écoulement tangentiel.

Cette configuration nécessite un grand espace au sol pour fonctionner et des coûts d'investissement élevés à cause de l'énergie importante dépensée mais elle ne nécessite pas de préfiltration.

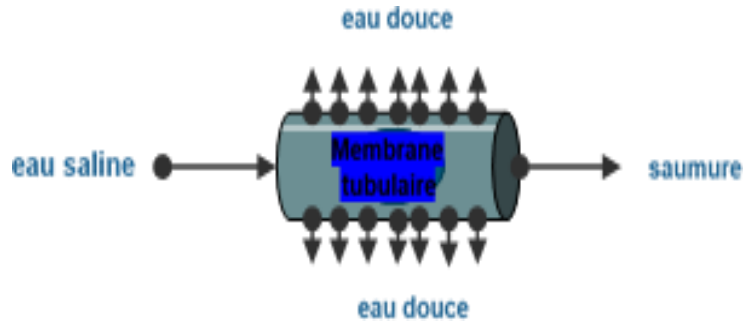


Figure 2-3 : Membrane tubulaire.

2.6.3 Module spiralé

Le module le plus populaire dans l'industrie pour les membranes de nanofiltration ou d'osmose inverse est le module spiralé. Au sein de ces modules, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube collecteur, constituant l'axe central de la membrane, qui recueille le perméat.



Figure 2-4 : Module spiralé.

2.6.4 Modules fibre creuse

Ils contiennent plusieurs milliers de fibres assemblées en parallèle suivant deux configuration inverse :

- Configuration Extérieure - Intérieure : l'eau s'écoule à l'extérieur des fibres et le perméat est recueilli à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre.
- Configuration Intérieure - Extérieure : similaire à la configuration tubulaire de telle façon que l'eau à traiter s'écoule à l'intérieur des fibres tandis que le perméat est récupéré à l'extérieur. L'écoulement à l'intérieur des fibres est tangentiel.

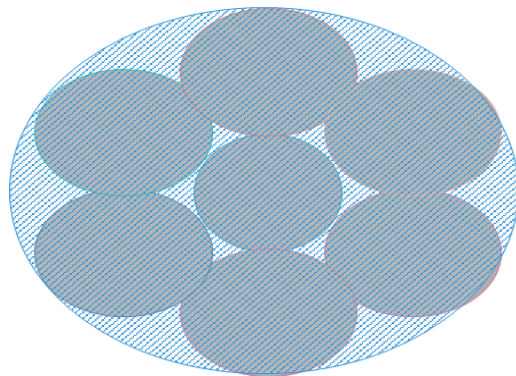


Figure 2-4 : Module à fibres creuses.

Le module membranaire est composé donc d'une entrée (alimentation) et de deux sorties, une du perméat qui a traversé la membrane, et l'autre du rétentat qui a été retenue.

Le choix doit être basé sur les contraintes les plus importantes par rapport à l'application industrielle envisagée. Par conséquent, plusieurs critères (compacité, coût, ...) peuvent être pris en compte pour choisir le meilleur type de module.

2.7 Mise en œuvre des membranes

Il existe deux types de filtration membranaire selon le sens de l'écoulement du fluide à traiter :

2.7.1 Filtration frontale

Sous l'effet d'un gradient de pression, le fluide traverse perpendiculairement la membrane, les molécules retenues se concentrent au niveau de la surface membranaire ce qui provoque une diminution du flux au cours du temps (*Bouchoux, 2004*).

2.7.2 Filtration tangentielle

Le fluide circule parallèlement à la surface de la membrane et se partage en deux débits : un traversant la membrane et appelé perméat, et un deuxième ne la traversant pas nommé rétentât.

Elle est caractérisée par le mouvement de cisaillement limitant la formation de dépôt sur la membrane. Ce mode de filtration est le plus utilisé actuellement en industrie bien qu'il soit plus couteux en énergie (voir annexe 2).

2.8 Configuration du système membranaire

Un système membranaire est un système composé d'une amenée de solution à traiter (solvant contenant des solutés) qui passe par un système de pompage pour la mise en pression, refoulant

le flux sous une pression élevée vers les modules à membranes. Des combinaisons de modules sont souvent réalisées afin de répondre aux exigences imposées en termes de qualité et de quantité.

Cependant, le flux d'alimentation peut soit passer une seule fois par le module sans recirculation, dit simple passage, dont les surfaces des membranes sont de plus en plus petites suivant les étages car le volume de solution à traiter diminue d'une fraction correspondante au volume du concentrât ou du perméat éliminé comme c'est expliqué par la suite. Le flux d'alimentation peut aussi passer plus d'une fois par l'intermédiaire d'une pompe lorsqu'il y'a un grand risque de polarisation de concentration ou de colmatage, ce système est un système à recirculation (*Metaiche, 2014*).

Les principales configurations à disposition sont les suivantes :

2.8.1 Système mono-étage

Dans ce système, tous les modules sont montés en parallèle d'une telle façon que chaque module comporte deux sorties : une sortie de solution moins concentrée (perméat) sous une pression très réduite, et une sortie de solution plus concentrée (retentât) sous une pression élevée, un système de récupération d'énergie est alors nécessaire à la sortie du concentrât.

2.8.2 Système di- étages en série rejet

C'est un système où le concentrât de chaque étage alimente l'étage suivant (c'est-à-dire que l'alimentation de chaque étage a des caractéristiques identiques à celles du concentrât de l'étage précédent) pour donner au dernier étage le concentrât de tout le système, le perméat total est alors l'ensemble des perméats de tous les étages.

Il est à noter que chaque étage est composé d'un ensemble de modules montés en parallèle avec un nombre de paramètres le caractérisant des autres étages.

Ce système est caractérisé par un taux de conversion élevé grâce au traitement des débits des concentrâts par étage.

2.8.3 Système di-étage en série production

C'est un système où le perméat de chaque étage alimente l'étage suivant (c'est-à-dire que l'alimentation de chaque étage a des caractéristiques identiques aux celles du perméat de l'étage précédent) pour donner au dernier étage le perméat de tout le système, le concentrât total est alors l'ensemble des concentrât de tous les étages.

Ce système est caractérisé par une haute qualité du perméat final obtenu du fait qu'à chaque augmentation du nombre d'étages, la qualité s'améliore, la concentration diminue et le taux d'élimination augmente considérablement. C'est la raison pour laquelle ce système est utilisé

dans le domaine du dessalement d'eau de mer lorsqu'une qualité d'eau élevée est exigée.

2.8.4 Système di- étages hybrides rejet- production

C'est une installation où les deux types de systèmes, en série rejet et en série production, sont présents afin d'améliorer le rendement quantitatif (conversion) et le rendement qualitatif (taux de rejet).

2.9 Conclusion

Ce chapitre bibliographique a pour objectif de poser, de façon précise, les bases théoriques de cette étude ; à savoir :

- Les principes de base de la filtration membranaire et ses grandeurs caractéristiques,
- Les quatre procédés de séparation ont été présenté à savoir la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse.
- Ainsi que les différents modules et configurations possibles des systèmes membranaires ;

Ce chapitre va s'avérer particulièrement utile par la suite, lors de la partie pratique présentée dans les chapitres qui suivent.

Partie 2
Étude pratique

Chapitre 3

Présentation du cas d'étude et choix de la technique de séparation

3 Présentation du cas d'étude et choix de la technique de séparation

3.1 Introduction

Dans le cadre du traitement d'eau d'injection pour la récupération assistée des hydrocarbures dans le gisement de TFT, différents matériels et techniques ont été utilisés pour avoir une qualité d'eau cible et convenable pour le processus d'injection.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la zone d'étude, la qualité de l'eau de production, l'installation utilisée, ainsi que la technique de séparation choisie en se basant sur les résultats de simulation des deux techniques de traitement, Nanofiltration et Osmose Inverse, et cela en posant les pour et les contres de chaque technique en fonction de la qualité d'eau ciblée à atteindre à la fin du traitement.

3.2 Présentation de la zone d'étude

TFT, un acronyme de la direction régionale de « Tin Fouyé Tabankort », c'est une division de production de la société SONATRACH créée en 1976. Elle est chargée de la production du pétrole et du gaz du champ de TFT (*Ihaddadene, 2018*)

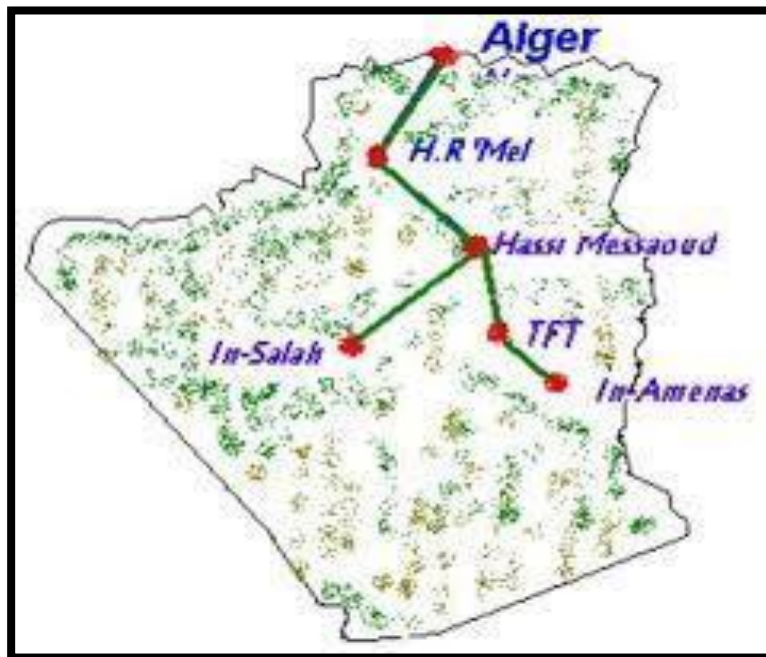


Figure 3-1 : Situation géographique du bassin de TFT.
(*Ihaddadene, 2018*)

3.3 Situation géographique

La zone d'étude est située dans le Nord-ouest du bassin d'Ilizi, au sud-est du Sahara algérien, entre 26° 30' et 29°30' de l'altitude Nord et entre 6° et 10° de la longitude est.

La région de Tin Fouyé Tabankort est située à 300 km au nord-ouest d'In Amenas et à 500 km au sud-est de Hassi Messaoud, elle recouvre une superficie d'environ 4000 km². La région se trouve à une altitude de 432 m avec des températures ambiantes entre 0°C et 45°C pendant l'année.

3.3.1 Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS)

Le Sahara septentrional est le Sahara partagé entre la Libye, la Tunisie et l'Algérie, il renferme un réservoir d'eau considérablement grand. Ce réservoir s'étend sur plus d'un million de kilomètres carrés, dont la plus grande partie se trouve en Algérie (près de 70%)

Comme le montre la figure ci-dessous. Cette ressource souterraine est classée comme étant peu renouvelable voire même non renouvelable.

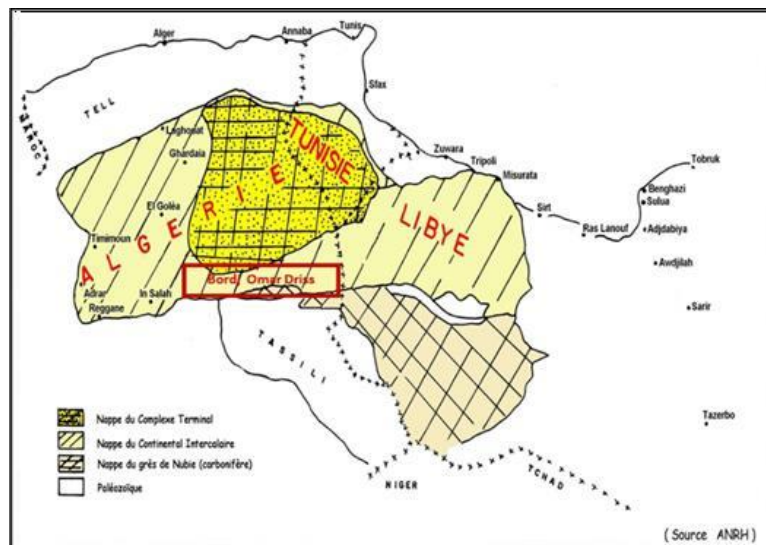


Figure 3-2 : Carte du système aquifères du Sahara septentrional (SASS)

3.3.2 Définitions des aquifères de la zone d'étude

3.3.2.1 Complexe terminal

Appelé aussi système aquifère du Tertiaire et du Crétacé supérieur, c'est un système multicouche entre les formations tertiaires (Mio-Pliocène, Éocène) et les niveaux de carbonate du Crétacé supérieur (Sénonien). Les puits du Grand Erg Oriental sont alimentés par ce réservoir, il est utilisé dans l'industrie pétrolière de la région pour l'eau de traitement, le

lavage... mais aussi dans les besoins domestiques, d'irrigation et d'eau potable.

3.3.2.2 Continental Intercalaire

Dit aussi Système aquifère du Crétacé, il est représenté par des séries de grès Albiens qui constituent le réservoir principal avec une épaisseur de 150 m.

Il a une continuité hydraulique dans des calcaires du Cénomaniens au-dessus, et par-dessous dans des grès argileux du Barrémien et du Néocomien, sa limite supérieure est formée par des séries argileuses du Cénomaniens, tandis que sa limite inférieure est constituée par des argiles du Jurassique supérieur (Malm).

Cet aquifère fournit l'alimentation en eau au groupement TFT, TFT Huile/DP, au village Tin Fouyé ainsi qu'aux installations de Sonatrach.

3.3.2.3 Aquifères jurassiques

Les séries aquifères du Jurassique, appelées Malm ou Nappe du Lias, sont composées de grès argileux, elles produisent une eau abondante à des profondeurs allant de 600 à 1200m.

L'épaisseur de cette formation varie entre 200 et 300m selon la région. Les calcaires de la formation sont fréquemment karstifiés et renferment des aquifères avec de grandes extensions, multicouches séparés par des formations perméables ou semi-perméables.

3.3.2.4 Aquifères du Dévonien et Cambro-Ordovicien

Aquifère du Dévonien à Illizi et aquifère du Cambro-Ordovicien à Djanet, ces deux réservoirs sont plutôt associés avec des réservoirs d'hydrocarbures.

La nappe dévonienne se trouve entre 200 et 250m de profondeur, localisée dans le centre de la wilaya d'Illizi. Les eaux y sont un peu salées. Le tableau suivant nous montre les caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère Dévonien.

Tableau 3-1 : Caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère Dévonien.

Caractéristiques	Valeurs
pH	7,11
Salinité Totale (g/L)	17,70
Conductivité (mS/cm)	25,70

3.4 Description du pilote

L'étude expérimentale a été menée par le moyen d'une unité pilote de traitement d'eau au niveau du champ de TFT (figure 3-3) afin de déterminer la meilleure configuration en termes de qualité et quantité d'eau produite.

Suite à une étude comparative entre la technique de Nanofiltration et d'Osmose Inverse, l'unité pilote est composée des éléments suivants afin de réaliser l'installation schématisée sur la figure 3-4.

- Une conduite d'alimentation à partir du réservoir de Lias;
- Deux bacs de stockage consécutifs lieu de décantation ;
- Un surpresseur ;
- Un bac à sable suivi d'un bac à charbon pour la préfiltration avec des vannes de manipulation ;
- Une pompe à eau précédée par un filtre à cartouche ;
- Deux modules membranaires sous-système di- étages en série rejet ;
- Deux débitmètres pour la mesure du débit du concentrât et du débit du perméat ;
- Trois capteurs de pression pour chaque membrane : un à l'entrée de la membrane pour la mesure de pression d'alimentation, deux autres à la sortie de la membrane pour la mesure de la pression du concentrât et du perméat ;



Figure 3-3: Unité pilote de traitement d'eau

L'eau brute est donc pompée des puits de TFT afin de subir un prétraitement pour ensuite subir un traitement membranaire. L'eau brute est passée par une décantation au niveau de deux bacs de stockage consécutifs pour éliminer les matières en suspension, puis prétraitée par une filtration à sable et à charbon de manière à éliminer toute odeur, couleur ou goût dans l'eau d'injection.

Par le biais d'une pompe protégée par un filtre à cartouche, l'eau est envoyée vers deux modules membranaires montés en série rejet.

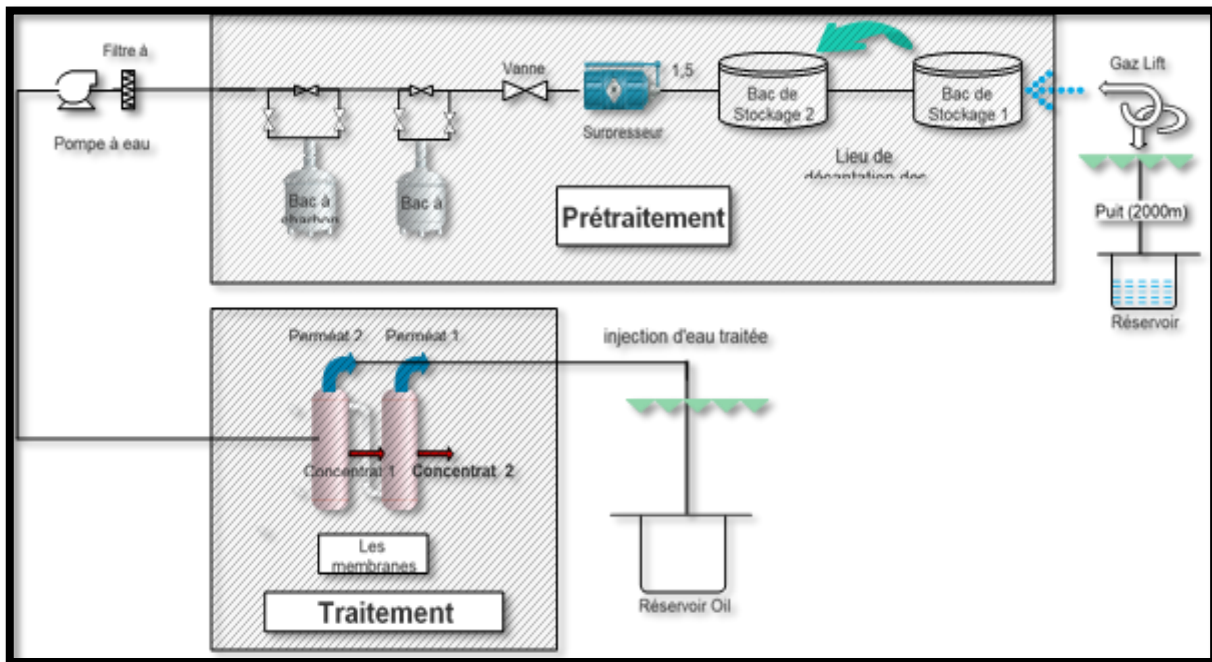


Figure 3-4 : Installation de traitement d'eau d'injection.

3.4.1 Membranes utilisées

Deux systèmes de filtration membranaire ont été mis en place dans le but de choisir la meilleure technique en termes de qualité et quantité. Les membranes utilisées sont deux membranes spirales composites Filmtec de Dow Chemical (BW 30-4040) pour l'Osmose Inverse et (NF 270-4040) pour la Nanofiltration (Annexe 3). Ces membranes industrielles sont livrées avec un extérieur à coque dure conçu pour résister à des chutes de pression élevées.

Les caractéristiques principales de ces membranes sont présentées dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Caractéristiques des membranes utilisées.

Membrane	Pression Maximale (bar)	Température maximale (bar)	Game de pH	Débit d'alimentation maximale (m ³ /h)	Surface active (m ²)
BW 30-4040	41	45	2-11	3,6	7,2
NF 270-4040	41	45	2-11	3,6	7,6

La NF 270-4040 est conseillée aux eaux de surface et eaux souterraines où une bonne élimination organique est souhaitée avec un adoucissement partiel.

Le choix de ces membranes a été imposé par le Centre de Recherche et de Développement CRD pour des raisons économiques.

3.5 Eau d'injection

La production des hydrocarbures nécessite une production d'eau en parallèle, parallèle pour être injecté dans les puits pour la récupération du pétrole et du gaz. Mais avant d'être injectée, cette eau doit être traitée pour atteindre la qualité cible.

La composition chimique d'une eau naturelle varie d'une région à une autre, et cela revient au fait qu'elle a séjourné pendant des périodes longues dans le réservoir en contact avec l'huile, le gaz et la roche. Donc la quantité comme la qualité dépend de l'origine de l'eau, elles varient d'une zone à une autre selon la géologie de la formation, des types de fluides qu'elle contient ainsi que des conditions et du procédé de récupération.

Toute eau issue d'un milieu souterrain contient donc :

- Des MES, minérales ou organiques ;
- Des sels et des solides dissous ;
- Des métaux lourds ;
- Des matières organiques ;
- Des bactéries ;
- Des gaz dissous.

Certains de ces composés sont nocifs et doivent être éliminés ce qui fait que l'eau doit être traités avant utilisation vu qu'elle peut être corrosive, huileuse et biologiquement active.

Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude et choix de la technique de séparation

L'eau utilisée dans notre cas d'étude est extraite du bassin de Lias du puit TFT 614. Elle présente une turbidité de 5.5 NTU, un pH de 7.7 et une teneur en sel dissout de 4179. L'analyse chimique de l'eau est donnée dans (tableau 3-3) pour une température 30° C.

Tableau 3-3 : Composition chimique de l'eau de TFT.

K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Sr ²⁺ (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	TDS (mg/L)
40,71	1127	66,88	252,50	3,16	1,29	183,70	1312	106	1086	445	4179

Il en ressort que l'eau obtenue a une forte teneur en ions Sulfates de 1086mg/l comparé aux exigences de la SONATRACH (inférieur à 20PPM). En effet, l'excès de sulfate engendre un grand risque de colmatage, voir même le bouchage du puits d'injection, d'où la nécessité d'éliminer les sulfates de l'eau avant injection.

Il en ressort également une très forte minéralisation avec une concentration de TDS de 4179mg/L, qui peut générer des dépôts sur les installations et à l'intérieur des tuyauteries.

La dureté est élevée avec 252,5mg/L de calcium et 66,88mg/L de magnésium, soit une dureté totale de 33.2°f. En effet pour une dureté de 20°f l'eau entartre les installations, et quand elle est inférieure à 10°f l'eau devient agressive et provoque la corrosion des conduites. Donc il est impératif de diminuer la quantité de calcium et de magnésium dans notre eau d'injection.

3.6 Choix de la technique de séparation

Avant de choisir la technique de séparation correspondante à nos attentes, nous avons d'abord tracé les objectifs du traitement, et les conditions réelles du traitement pour pouvoir faire la transition entre les méthodes de traitement disponibles et choisir la plus convenable et celle qui satisfait les conditions techniques et économiques de notre projet.

3.6.1 Objectif du traitement

Toute eau naturelle doit passer par un traitement avant d'être utilisée. Selon les besoins, industriels, ménager ou pour agricoles, la qualité de l'eau attendu du traitement diffère. Dans notre cas, l'eau est utilisée pour la récupération des hydrocarbures et sa composition chimique doit répondre à certaines normes et exigences pour ne pas endommager les installations. Outre la qualité cible à atteindre, la production d'eau doit garantir un débit précis pour satisfaire certaines conditions lors de l'injection et éviter les risques liés au SWCTT (Single Well Chemical Tracer Test). Parmi ces risques il y'a ceux qui sont intrinsèques à la qualité de l'eau d'injection, et d'autres aux produits chimiques injectés.

3.6.1.1 Risques liés à la qualité d'eau d'injection

- Formation des dépôts de CaCO_3 et MgCO_3 ;
- Formation de dépôt Surfactants- Ca^{2+} et diminution de la température et de la Turbidité (Robustesse aux cations divalents) ;
- Perte de la viscosité des polymères et précipitation dues à l'effet écran des cations divalents (conformation de repliement) ;
- Incompatibilité entre l'eau d'injection et les eaux de formation.

3.6.1.2 Risques liés aux produits chimiques injectés

Les Risques liés aux produits chimiques injectés sont :

- Transition de turbidité à faible température (formation d'agrégats) ;
- Séparation chromatographique et ségrégation du Blend (Mélange de surfactants) ;
- Séparation de phase du système micellaire (hydrolyse des surfactants) ;
- Incompatibilité entre les agents chimiques (Surfactant-Polymère) ;
- Formation de colloïdes et de gel : cas d'une microémulsion.

Notre présente situation consiste à résoudre les problématiques suivantes :

- L'incompatibilité de l'eau de la nappe et l'eau du réservoir pétrolier ;
- Nécessité d'éliminer les sulfates de l'eau d'injection des puits pétrolier pour éviter la formation du sulfate de baryum provoquant l'encrassement des installations impactant négativement la productivité ;
- La présence de dépôt de sels, notamment le chlorure de sodium ;
- Diminution de la quantité des sels dissous ;
- Diminution de la quantité des solides dissous (TDS) ;
- Élimination des éléments nocifs (SO_4^{2-} , Sr^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ;
- Augmentation du taux de conversion des membranes ;
- Optimiser le processus de filtration ;
- Augmentation du débit de sortie de $23\text{m}^3/\text{j}$ (débit actuel) à $50\text{m}^3/\text{j}$.

3.6.2 Effet de la concentration des particules de l'eau d'injection

La concentration de certaines particules de l'eau à injecter pour la récupération des hydrocarbures doit être très faible pour éviter le colmatage des installations, car la concentration

de la solution affecte la polarisation et le colmatage de la membrane et le réservoir. L'augmentation de la concentration favorise donc les phénomènes intervenant dans le colmatage que ce soit pour les membranes ou bien dans le réservoir pendant l'injection. Mais après une certaine période d'injection, le réservoir arrive à un état de colmatage avancé. Plusieurs essais ont été fait prouvant que la concentration des particules ont un rôle dans le dépôt de particules (*Sadok, 2015*).

3.6.3 Effet du débit d'injection

L'augmentation du débit permet de diminuer le dépôt des grosses particules en suspension, qui sont donc plus facilement entraînées. Un faible débit favorise du coup le dépôt des particules, car le coefficient de dépôt des matières en suspension varie avec le débit et la vitesse d'injection, plus la vitesse est grande moins est le dépôt, mais d'un autre côté, plus le débit est élevé plus le colmatage est rapide (*Sadok, 2015*).

3.6.4 Présentation des résultats de simulation et comparaison entre la nanofiltration et l'osmose inverse

3.6.4.1 Présentation du logiciel Wave DOW

Le logiciel Wave DOW est un logiciel lancé par Dow Water & Process solutions, c'est un logiciel de conception multi technologique qui permet de concevoir des systèmes de traitement d'eau tout en optimisant les performances et augmentant la productivité du système. Wave estime les performances des technologies d'ultrafiltration (UF), Osmose inverse (OI) et d'échange d'ions (IX) dans les systèmes de traitement des eaux, individuelles soient-elles ou combinées. Le logiciel Wave permet de donner une estimation des coûts d'élimination des produits chimiques présents dans l'eau. De plus il fournit des informations sur les volumes et les flux de bilan massique réels qui reflètent les changements de densité dus à la température, la compressibilité et la composition de l'eau.

Parmi les avantages de ce logiciel :

- Utilisation de trois technologies en combinaison ;
- Utilisation d'algorithmes améliorés et efficaces ;
- Simplification des processus de traitement ;
- Présence de données pour tous les produits et processus.

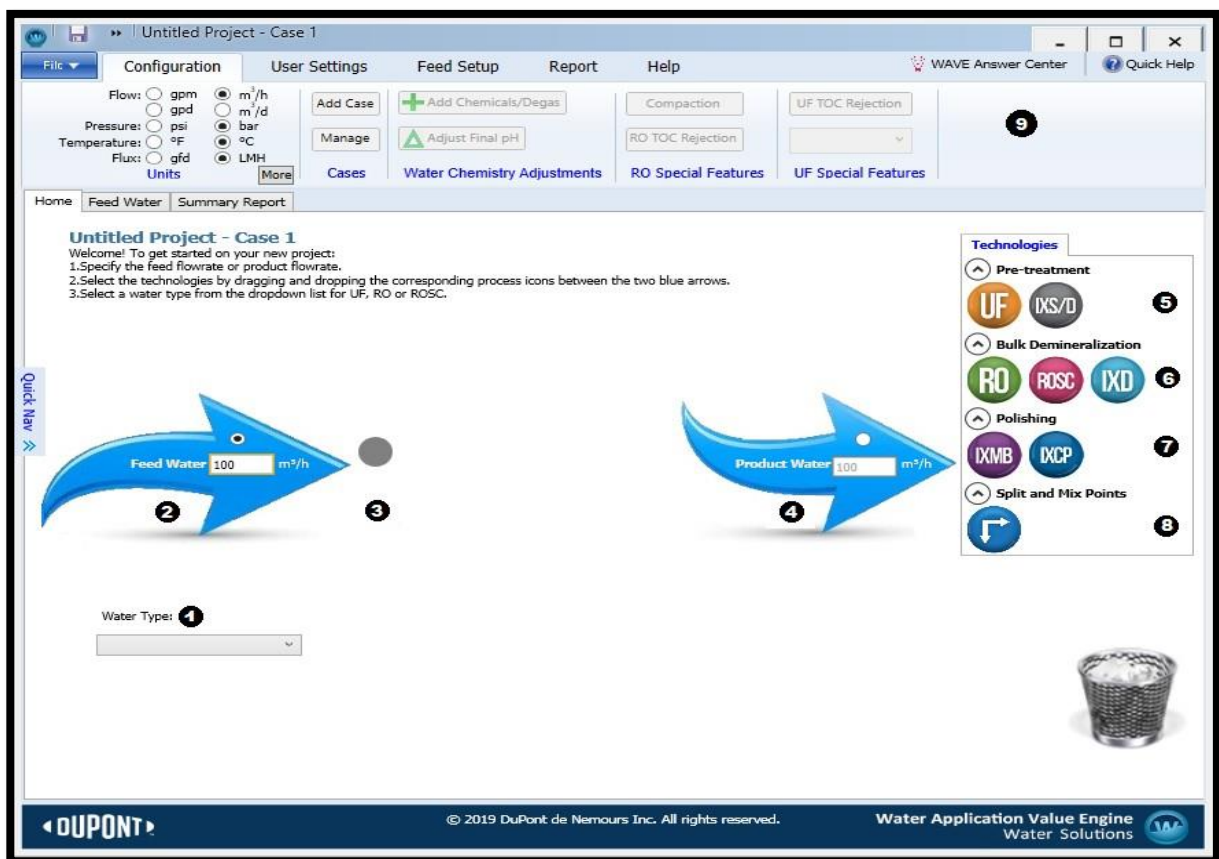
3.6.4.2 Simulation avec le logiciel

La manipulation du logiciel Wave DOW est très simple, ne nécessitant pas beaucoup de paramètres d'entrée, il peut nous donner des résultats très fiables. Sa plateforme est claire,

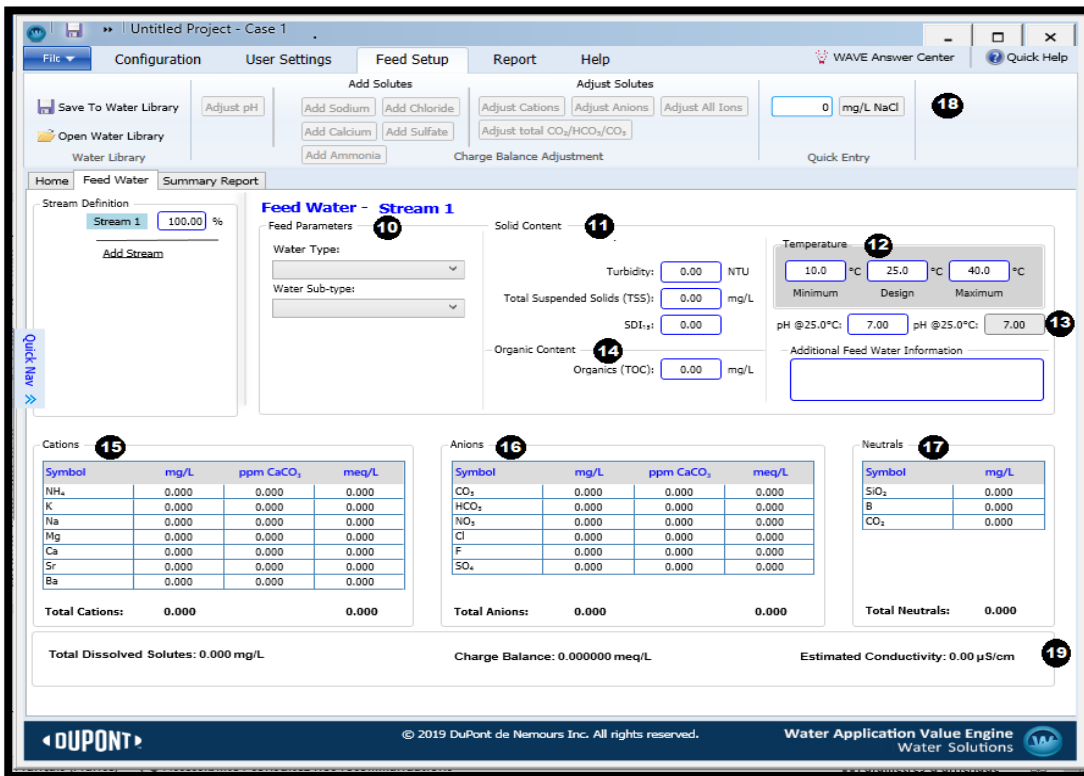
Chapitre 3 : Présentation du cas d'étude et choix de la technique de séparation

comme le montre la figure 3-5, il suffit donc de connaître la qualité de l'eau à filtrer, donc les concentrations de produits chimiques présents dans l'eau, la nature de l'eau, sa température, son Ph et sa turbidité, ainsi qu'un débit, soit le débit d'entrée à la membrane, ou le débit de sortie, ce qui fait que cet outil informatique soit performant et précis. On peut choisir soigneusement la nature de l'eau à traiter : une eau de puits, un perméat, une eau adoucie, des eaux municipales, des eaux de surface, des eaux de mer ou des rejets. Wave DOW a une base de données actualisée sur les membranes, ce qui permet de voir les résultats de traitement avec plusieurs membranes, selon les références, puis choisir la plus performante.

La figure suivante représente la plateforme du logiciel.



(a)



(b)

Figure 3-5 : Plateforme du logiciel Wave DOW

La légende :

- | | |
|---|---|
| 1- Nature de l'eau | 11- Caractéristiques de l'eau |
| 2- Débit d'entrée | 12- Températures |
| 3- Zone d'insertion du type de traitement | 13- Ph de la solution |
| 4- Débit de sortie | 14- Taux de la matière organique |
| 5- Membranes d'ultrafiltration | 15- Concentrations des cations |
| 6- Membranes d'osmose inverse | 16- Concentrations des anions |
| 7- Membranes à échange d'ions | 17- Concentrations des ions neutres |
| 8- Points mixtes | 18- Paramètres d'ajustements |
| 9- Panneau de configuration | 19- Caractéristiques physico-chimiques de la solution |
| 10- Type de l'eau | |

3.6.4.3 Simulation et comparaison des résultats

Les simulations des performances des deux techniques ont été faites sur le Wave afin de déterminer la meilleure technique en termes de qualité d'eau et de débit. Ces simulations ont été réalisées pour différents pressions et températures :

Pour la Nanofiltration, une température allant de 10 à 40 °C et une pression de 4 à 10 bars avec un pas de 1 bar.

Pour l'Osmose Inverse, une température de 10 à 40 °C et une pression de 6 à 20 bars avec un pas de 2 bars.

Le tableau 3-4 présente un cas d'étude pour des simulations avec une pression de 6 bars pour la Nanofiltration et de 10 bars pour l'Osmose Inverse et un débit d'alimentation de 10m³/jr.

Tableau 3-4 : Résultats de simulation du traitement par nanofiltration et osmose inverse.

	Alimentation (mg/L)	Perméat de nanofiltration P=6 bar				Perméat d'osmose inverse P=10bar			
		T= 10 °C	T=20 °C	T=30 °C	T=40 °C	T= 10 °C	T= 20 °C	T= 30 °C	T= 40 °C
K ⁺ (mg/L)	40,71	21,37	26,51	30.20	32.23	0,47	0,81	1,44	2,59
Na ⁺ (mg/L)	1127	645	767.60	895.20	986.20	11,52	20,03	36,22	65,74
Mg ²⁺ (mg/L)	66,88	13,42	22,16	29.70	34.45	0,25	0,45	0,84	1,57
Ca ²⁺ (mg/L)	252,50	59,28	92,70	117.80	131.90	0,91	1,63	3,03	5,68
Sr ²⁺ (mg/L)	3,16	0,70	1,11	1.44	1.63	0,01	0,02	0,04	0,07
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	2,02	0,28	0,69	1.41	2.15	0,00	0,00	0,00	0,00
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	181,50	75,50	112,40	154.80	182.90	2,12	3,70	6,73	12,26
Cl ⁻ (mg/L)	1312	951,7 0	1161	1334	1388	13,58	23,50	42,30	76,59
F ⁻ (mg/L)	106	78,32	94,72	107.90	112.10	1,24	2,16	3,92	7,12
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1086	22,45	44,86	104.40	242.60	4,66	8,35	15,15	29,02
CO ₂ (mg/L)	3,20	2,65	2,69	2.87	3.02	3,09	3,26	3,45	3,63
TDS (mg/L)	4178	1868	2324	2777	3144	34,75	60,64	110,10	200,70
pH	7,70	7,50	7,70	7.70	7.70	6,10	6,30	6,40	6,60

On remarque une rétention nettement élevée, des particules solides dissoutes, par osmose inverse que par la nanofiltration. La figure 3-6 présente les ions favorables et ions nocifs dans l'eau traitée par chacune des deux techniques membranaires. Le taux de conversion de chaque technique est donné dans annexe 4.

À partir de ces résultats, on peut constater que la nanofiltration répond à l'objectif principal de dé-sulfatation grâce à son pouvoir sélectif, contrairement à l'osmose inverse qui a éliminé même les ions nécessaires pour l'eau d'injection. Ceci explique donc notre choix d'utiliser des membranes de nanofiltration.

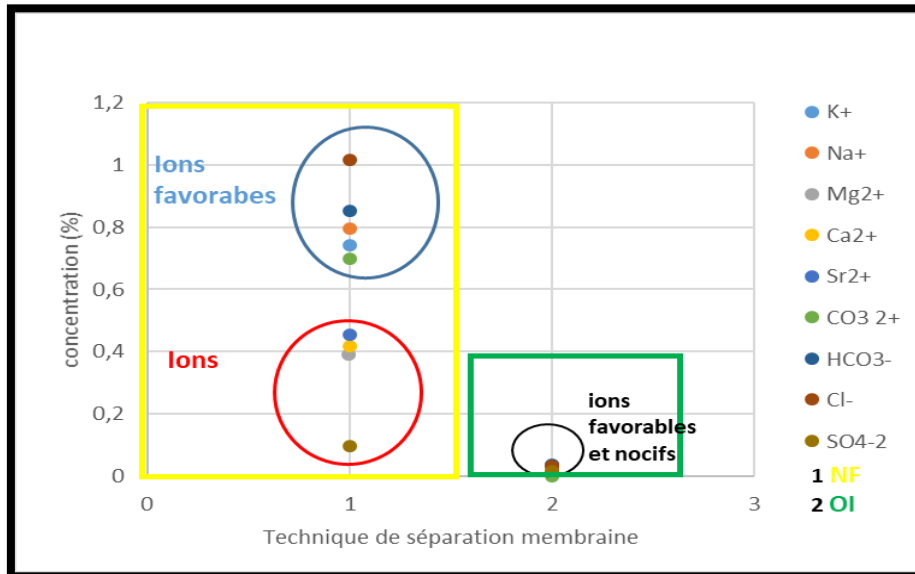


Figure 3-6: Ions favorables et nocifs dans l'eau traitée par nanofiltration

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'installation de traitement d'eau, ainsi que la qualité d'eau brute et celle qu'on veut atteindre après traitement. Les simulations faites avec le logiciel Wave, nous ont donné une solution convenable techniquement. Cette solution est le traitement membranaire par nanofiltration en rejetant le traitement membranaire par osmose inverse.

Le choix de nanofiltration est basé sur les résultats obtenus pour l'eau traitée. La méthode satisfait les conditions concernant le taux de conversion et le taux de rétention (débit élevé et élimination des particules nocives grâce à son pouvoir sélectif) et aussi le fait que cette technique consomme moins d'énergie que l'OI.

Dans le prochain chapitre, nous allons aborder l'étape de l'augmentation du débit et l'amélioration des performances du traitement membranaire par nanofiltration.

Chapitre 4

Étude de l'influence des conditions opératoires sur la nanofiltration et optimisation de la configuration membranaire.

4 Étude de l'influence des conditions opératoires sur la nanofiltration et comparaison avec les résultats expérimentaux

4.1 Introduction

Afin de mieux comprendre le processus de filtration membranaire et pouvoir optimiser la station de nanofiltration, une série de simulation a été menée dans le but de mettre en évidence l'influence des paramètres opératoires (à savoir la température, le débit de la solution d'alimentation et la pression opératoire) sur les performances du système de traitement d'eau par nanofiltration. L'analyse est donc basée sur quatre axes :

- Débit du perméat en fonction de la pression $Q_p(P)$;
- Débit du perméat en fonction de la température $Q_p(T)$;
- Qualité du perméat en fonction de la pression $K(P)$;
- Qualité du perméat en fonction de la température $K(T)$;
- Qualité du perméat en fonction du débit d'alimentation $K(Q_a)$

4.2 Influence des conditions opératoires sur le flux de nanofiltration

Le transfert du soluté et du solvant dépend des conditions opératoires (concentration du soluté, pression transmembranaire, température, ...) ces paramètres influencent le transport de matière et donc conditionnent le débit et la qualité de perméat de nanofiltration.

Les conditions opératoires fixées pour évaluer les performances du système de nanofiltration sont données dans le tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Conditions opératoires fixées pour évaluer les performances du système de nanofiltration.

Alimentation		Débit d'alimentation (m ³ /h)	Pression opératoire (bar)	Température (°C)
Ion	Concentration (mg/l)			
K ⁺	40,710			
Na ⁺	1127,000			
Mg ²⁺	66,880			
Ca ²⁺	252,500			
Si ²⁺	3,160			
CO ₃ ²⁻	2,020			
HCO ₃ ⁻	181,500	0,42 - 1	[4-10]	[10-40]
Cl ⁻	1312,000			
F ⁻	106,000			
SO ₄ ²⁻	1086,000			
CO ₂	3,200			
TDS	4,178			
pH	7,700			

4.2.1 Influence de la température de l'eau sur le débit et la qualité d'eau du perméat

La température de l'eau est une caractéristique physique très importante qui doit être prise en compte durant le processus de filtration membranaire. Des variations de températures ont été faites lors des simulations afin d'étudier son influence sur la qualité et débit d'eau en mesurant la concentration de chaque particule et le débit obtenu après la filtration en maintenant la pression.

Pour la nanofiltration, il a été noté que le débit augmente avec l'augmentation de la température comme le montre la figure 4-1 ci-dessous

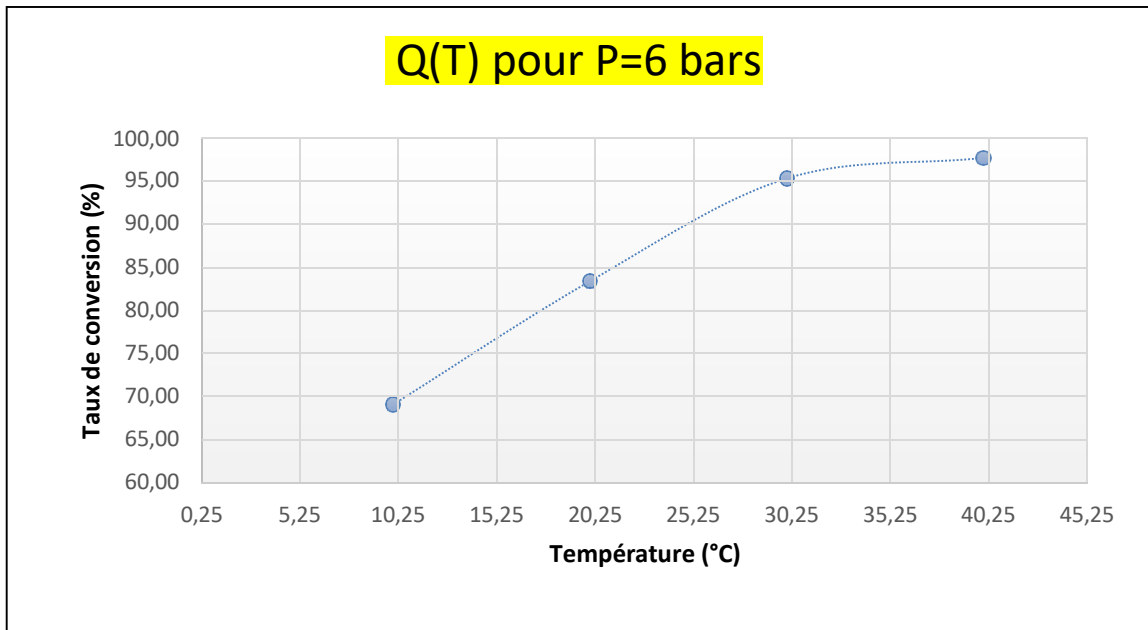


Figure 4-1 : Taux de conversion pour un débit initial de 0,42m³/h en fonction de la température.

L'amélioration du flux du perméat est remarquée lors d'une élévation de la température, ceci est dû à l'augmentation du coefficient de diffusion des solutés du fait de la diminution de la viscosité de la solution.

Contrairement au débit, la qualité de perméat diminue avec l'augmentation de la température. En effet, une meilleure filtration est notée pour des basses températures comme le montre le tableau 4-2.

Tableau 4-2: Concentration des particules dans l'eau filtrée pour une pression de 6bars en fonction de la température pour.

	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Sr ⁺² (mg/L)	CO ₃ ⁻² (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	TDS (mg/L)	pH
T=10°C	21,37	645	13,42	59,28	0,70	0,28	75,5	951,7	78,32	22,45	2,65	1,87	7,6
T=20°C	26,51	767,6	22,16	92,7	1,11	0,69	112,4	1161	94,72	44,86	2,69	2,32	7,7
T=30°C	30,2	895,2	29,7	117,8	1,44	1,41	154,8	1334	107,9	104,4	2,87	2,78	7,7
T=40°C	32,23	986,2	34,45	131,9	1,63	2,15	182,9	1388	112,1	242,6	3,02	3,11	7,7

Le choix de la température optimale de l'eau à traiter est donc un compromis entre, le débit nécessaire et la qualité d'eau demandée.

4.2.2 Influence de la pression opératoire sur le débit et la qualité d'eau du perméat

La pression opératoire est un paramètre fondamental assurant la filtration du solvant. Pour étudier son influence sur la qualité et le débit d'eau filtrée, des variations de pressions à une température fixe ont été faites lors des simulations.

Il est à noter que le débit augmente avec l'augmentation de la pression appliquée comme le présente la figure 4-2 :

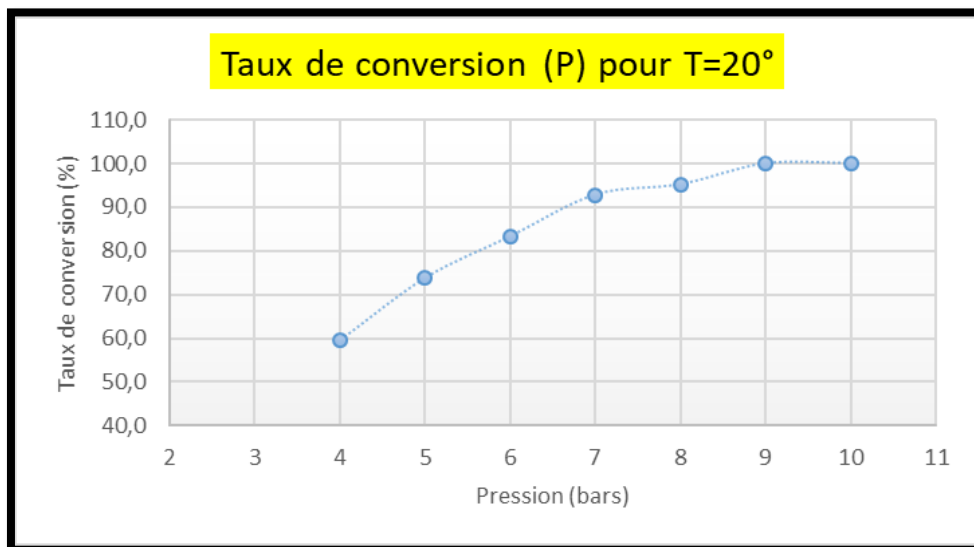


Figure 4-2 : Taux de conversion pour un débit initial de 0,42m³/h en fonction de la pression.

L'influence de la pression opératoire sur la qualité du perméat a été réalisée en variant la pression de travail entre 4 et 10bar. Les résultats sont donnés dans le tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Concentration des particules dans l'eau filtrée pour une température de 30°C en fonction de la pression opératoire.

Pression (bar)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	Sr ⁺² (mg/L)	CO ₃ ⁻² (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	TDS (mg/L)	pH
4	28,32	808,6	27,67	112,9	1,37	0,96	126,5	1249	101,2	55,81	2,75	2,51	7,7
5	28,94	848,4	28,35	114,1	1,39	1,16	139,8	1288	104,3	74,98	2,81	2,63	7,7
6	30,20	895,2	29,70	117,8	1,44	1,41	154,8	1334	107,9	104,4	2,87	2,78	7,7
7	31,06	926,4	31,28	122,8	1,50	1,61	165,5	1363	110,1	134,8	2,9	2,88	7,7
8	22,97	957	21,89	99,32	1,14	1,66	170,3	1297	105	193,8	2,97	2,87	7,8
9	31,82	1020	30,97	118,6	1,47	2,23	188,7	1378	110,9	279,5	2,8	3,16	7,8
10	33,48	960,2	37,68	144,9	1,79	2,21	184,3	1360	109,6	276,6	2,7	3,11	7,8

Ces résultats montrent que le taux de matière en suspension évolue d'une manière inversement proportionnelle à la pression opératoire, pour toutes les simulations réalisées. En effet, la sélectivité de la membrane semble diminuer lorsque la pression ou la température augmente.

4.2.3 Influence du débit d'eau d'alimentation sur la qualité d'eau du perméat

En vue de mettre en évidence l'impact éventuel du débit d'alimentation sur la performance de l'installation de traitement d'eau par nanofiltration à savoir la qualité du perméat, deux débits ont été testés (0,42 m³/h et 1,00 m³/h). Ceci est réalisé en maintenant la température et variant la pression. Les résultats sont présentés dans le tableau 4-4 ci-dessous.

Tableau 4-4 : Qualité du perméat avec deux débits d'alimentation à 6 bars et 30 °C.

Débit (m ³ /h)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Sr ²⁺ (mg/L)	CO ₃ ⁻² (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	TDS (mg/L)	PH
Q=0,42	30,2	895,2	29,7	117,8	1,44	1,41	154,8	1334	107,9	104,4	2,87	2777	7,7
Q=1	23,19	687,1	17,53	75,04	0,89	0,43	87,17	1035	84,94	28,14	2,73	2039	7,5

Le débit d'alimentation semble avoir une influence notable sur la qualité du perméat, en effet, la rétention de la membrane s'évolue de manière proportionnelle au débit d'alimentation.

4.3 Validation des résultats de simulation

Différents tests ont été menés sur des échantillons d'eau prélevés afin de déterminer les conditions opératoires optimales de l'installation pilote et la configuration membranaire idéale tout en les comparant aux résultats de simulation. Les résultats d'analyse seront présentés par la suite ainsi permettant de juger la fiabilité des simulations.

4.3.1 Présentation des résultats d'analyse des échantillons

L'annexe 5 présente les résultats des analyses des concentrations des particules dans plusieurs échantillons.

Ces résultats portant sur 21 échantillons de prélèvements d'eau de source, présentent le taux restant des particules dans l'eau après traitement par nanofiltration.

Ces essais ont été réalisés avec deux membranes NF270-4040 en série de rejet, sous une pression de 6 bars et à une température de 30 °C avec un débit de 1 m³/h.

Pour ces mêmes conditions, les débits ont été mesurés à chaque essai et reportés sur la figure 4-3.

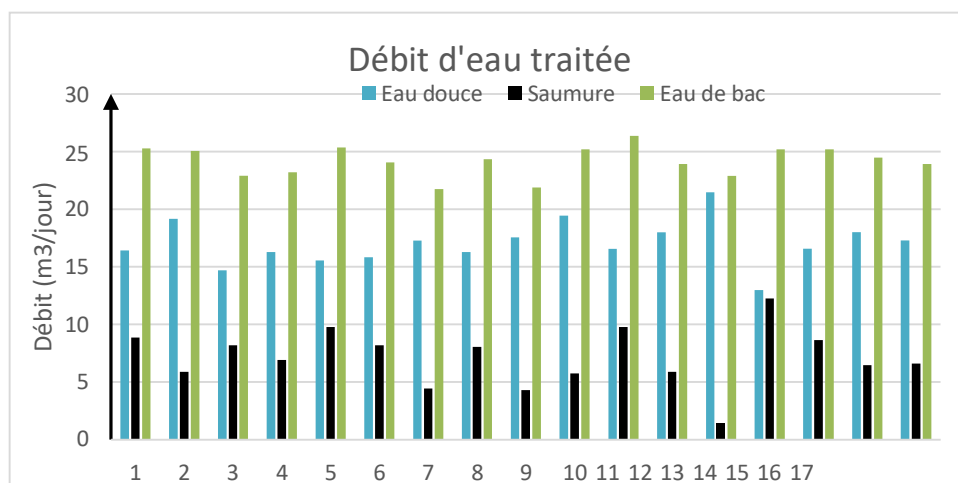


Figure 4-3 : Débits mesurés d'eau d'alimentation, d'eau douce et de la saumure après traitement

4.3.2 Comparaison des résultats de simulation et les résultats expérimentaux

La validation de nos résultats de simulations se base sur la comparaison de ces résultats avec les résultats expérimentaux vis-à-vis le taux de rétention des particules et le taux de conversion en fonction des conditions opératoires.

En se basant sur les résultats de simulation et expérimentaux présentés dans le tableau 4-3 et

l'annexe 5 respectivement, portant sur la qualité du perméat après traitement pour les mêmes conditions opératoires, on a pu comparer et étudier la fiabilité des résultats de simulation de nanofiltration par le logiciel Wave.

Tableau 4-5 : Résultats des analyses et des simulations du taux de rétention des ions par nanofiltration.

	Taux de rétention des ions						
	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	HCO ³⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)
Analyse	30,6 ± 4,2	27,1 ± 4,6	82 ± 5,2	73 ± 3,4	20,4 ± 11,8	4,9 ± 3	98 ± 2,1
Simulation	43,0	39,0	73,8	70,3	52,0	21,1	97,4

D'après ces résultats, ressort que la simulation tend à surestimer la rétention des ions monovalent et à sous-estimer celle des ions divalents.

Le SO₄⁻² et Ca²⁺ sont les seules particules pour qui, le taux de rétention par simulation soit dans l'intervalle de confiance de l'expérience, néanmoins, ceci n'exclut pas ces résultats de simulations. Cette différence, qui est relativement acceptable, peut être expliquée par la composition d'eau d'alimentation qui varie d'un prélèvement à un autre du fait que l'eau vient de plusieurs puits, ou par la configuration du logiciel lui-même.

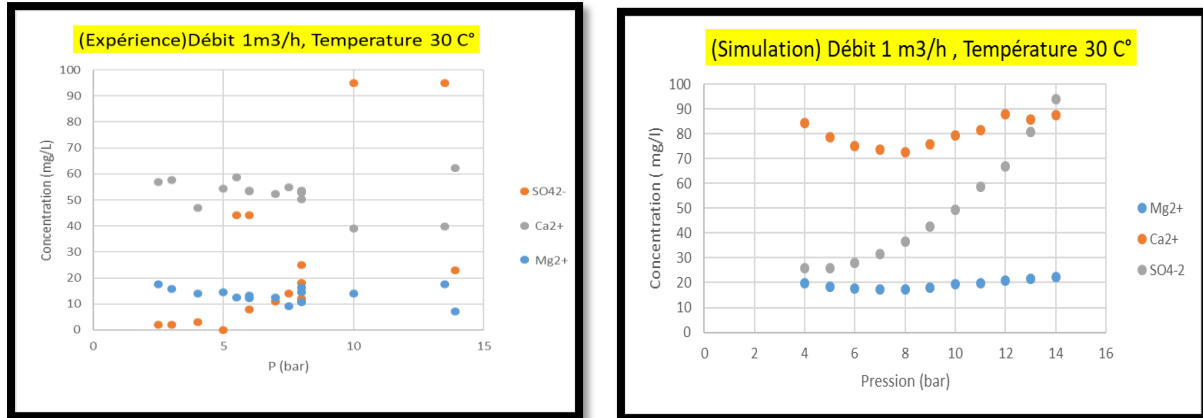
Il a été remarqué une influence semblable des conditions opératoires sur la qualité et le débit du perméat entre la simulation et l'expérience. L'augmentation de la pression d'attaque tend à améliorer le flux du perméat et à baisser la sélectivité de la membrane, tandis que l'augmentation de la température a un effet inverse.

4.3.3 Rétention de Ca²⁺, Mg²⁺ et SO₄²⁻

Les graphes présentés dans la figure 4-4 donnent respectivement la variation de la concentration de Ca²⁺, Mg²⁺ et SO₄²⁻ en fonction de la pression par analyse et simulation. La rétention de SO₄²⁻ diminue avec l'augmentation de la pression, tandis que Ca²⁺ et Mg²⁺ semblent être indépendant de la pression.

Un comportement semblable des particules est observé entre la simulation et l'expérience. En effet, seul le SO₄²⁻ semble être affecté par la pression. Aussi et d'après le tableau 6, on constate que la rétention de SO₄²⁻ est plus grande que celle de Ca²⁺ et Mg²⁺, cela est dû à la charge négative de la membrane.

Figure 4-4 : Variation de la concentration de SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+} en fonction de la pression



En ce qui concerne le phénomène de sélectivité en nanofiltration, la rétention des particules par notre membrane est produite sous deux effets :

- Effet Stérique : un des paramètres qui gèrent la sélectivité de notre membrane est lié à la dimension des pores et des particules.
- Répulsion électrostatique : c'est ce qui explique le taux élevé de rétention du cation SO_4^{2-} par rapport aux anions Ca^{2+} et Mg^{2+} étant donné que la membrane est constituée par une couche active chargée négativement responsable de la répulsion des ions présents dans la solution de charge contraire. Ceci peut être confirmé par le taux de rétention de K^+ qui reste supérieur à celui de Cl^- malgré le fait qu'ils ont tous les deux pratiquement le même rayon hydraté ainsi que le coefficient de diffusion (les caractéristiques des ions sont données dans Annexe 6).

Il est à noter que les ions divalents ont un rayon hydraté plus grand que celui des ions monovalents, c'est la raison pour laquelle le procédé de nanofiltration est connu comme un procédé sélectif qui retient plus les ions divalents, ainsi que l'effet de charge vu que les ions divalents ont une forte répulsion électrostatique. Il suffit de prendre pour exemple les ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} et SO_4^{2-} qui sont mieux retenus que le Cl^- et le K^+ (Ahoule, 2016).

4.4 Optimisation de la configuration membranaire

Dans le but d'atteindre la production de $50\text{m}^3/\text{jour}$, une étude de la configuration membranaire est nécessaire afin de choisir la conception adéquate. Pour cela, une analyse devrait être faite du taux de conversion des essais précédents tout en assurant un taux de rétention minimal.

En référence aux résultats de l'influence du débit sur le taux de conversion du système étudié pour un puit d'injection, nous adopterons plusieurs configurations : configuration mono-étagée, bi-étagée, et tri-étagée pour assurer la qualité de et le débit de l'eau requis.

4.4.1 Influence du débit d'alimentation

Après une étude qualitative et quantitative de l'eau traitée par le pilote actuel en fonction de la température et la pression, les conditions opératoires qui ont été jugées comme étant optimales, pour deux membranes en série de rejet, sont :

- Pression : 7 bar ;
- Température : 30 °C.

L'influence du débit sur le taux de conversion du système est consignée dans le tableau 4-6

Tableau 4-6 : L'influence du débit d'alimentation pour un système bi-étagé sur le taux de conversion.

Débits						
Alimentation (m ³ / h)	Perméat 1 (m ³ / h)	Concentrât 1 (m ³ / h)	Perméat 2 (m ³ / h)	Concentrât 2 (m ³ / h)	Perméat total (m ³ / h)	Taux de conversion (%)
1,0	0,39	0,61	0,29	0,32	0,68	0,68
1,1	0,40	0,70	0,31	0,39	0,71	0,65
1,2	0,40	0,80	0,32	0,48	0,72	0,60
1,3	0,40	0,90	0,33	0,57	0,73	0,56
1,4	0,40	1,00	0,34	0,66	0,74	0,53
1,5	0,41	1,09	0,34	0,75	0,75	0,50

Pour un taux de conversion de 60%, le débit du perméat final est de 0,72 m³/h. Donc, pour atteindre les 50 m³/j qui fait 2,1 m³/h, il faut un système de deux étages et chaque étage composé de trois (03) membranes en parallèle, soit 6 membranes au total.

Néanmoins, il est nécessaire de réduire le nombre de membranes du deuxième étage car le

volume entrant (qui est le concentrât total des membranes du premier étage) diminue d'une fraction correspondant au perméat total éliminé dans le premier étage, d'où la nécessité de réduire la surface membranaire pour avoir une meilleure efficacité. A ce titre, une étude a été faite sur le nombre optimal de membranes de chaque étage ;

Il est à noter que, dans ces conditions, on a obtenu une meilleure rétention de SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+} du fait que la qualité du perméat évolue de manière proportionnelle aux débits d'alimentation.

Le tableau ci-dessous présente les quatre configurations possibles pour cette installation.

Tableau 4-7 : Les configurations possible pour une installation à deux étages.

N°. Configuration	Étage 1		Étage 2			Total
	N°. Membrane	Débit de production total (m ³ /h)	N°. Membrane	Débit d'alimentation de chaque membrane (m ³ /h)	Débit de production total (m ³ /h)	Débit de production total (m ³ /h)
1	3	1,20	2	1,20	0,68	1,88
2	3	1,20	1	2,40	0,70	1,90
3	4	1,60	2	1,60	0,70	2,30
4	4	1,60	1	3,20	XXXXXXX	XXXXXXX

On remarque que seule la configuration N°3 satisfait nos conditions de débit de production. La configuration N°4 a été éliminé car le débit alimentant la membrane du deuxième étage a atteint la valeur maximale d'alimentation qui est de 3,2 m³/h.

Cependant, le débit de 50m³/j n'est pas le seul critère de choix de la configuration optimale, il est primordial de vérifier la composition d'eau de chaque configuration. Les taux de rétention de Ca^{2+} et Mg^{2+} et SO_4^{2-} sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-8 : Taux de rétention de SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+} pour la configuration N°3 de deux étages.

Particule	SO_4^{2-}	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Taux de rétention (%)	98	78	75

Ces résultats confirment l'adaptabilité de cette configuration à nos conditions de conception, donc, on conclut que la configuration optimale qui vérifie les critères de qualité et assure les 50m³/h pour cette installation à deux étages (figure 4-5) est composée de :

- Premier étage composé de 4 membranes en parallèle produit 0,4*4 = 1,6 m³/h.
- Second étage composé de 2 membranes en parallèle produit 0,35*2 = 0,7 m³/h.

Tableau 4-9 : Débit du perméat et du rétentat de chaque étage pour la configuration N°3 à deux étages.

Débits (m ³ / h)						
Alimentation	Perméat 1	Concentrat 1	Perméat 2	Concentrat 2	Perméat total	Con. final
4,8	1,6	3,2	0,7	2,5	2,3	2,5

Donc, avec cette configuration, le taux de conversion est de l'ordre de 48% comme le montre le tableau 4-9.

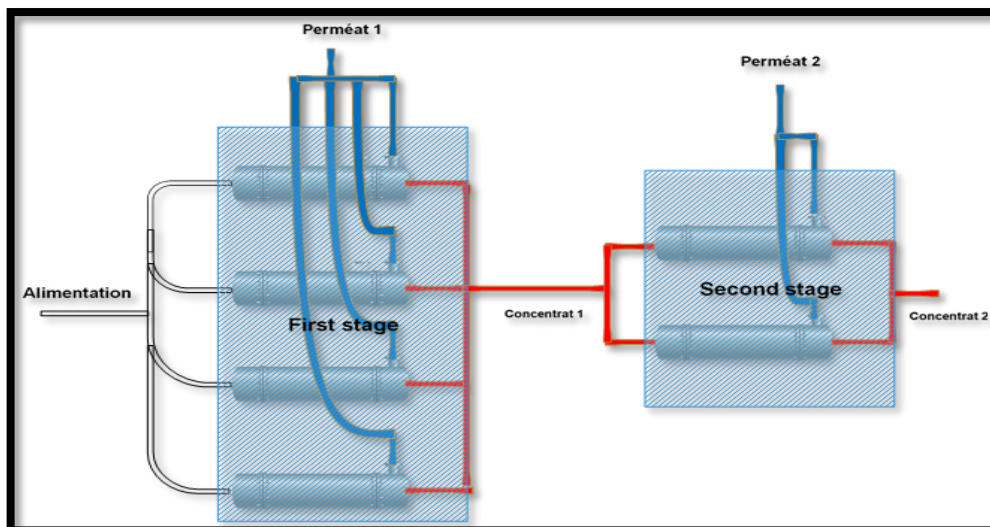


Figure 4-5 : Configuration à deux étages.

4.4.2 Configurations proposées

Il ressort des résultats des analyses du perméat une augmentation des éléments indésirables dans le perméat du deuxième étage de qui affecte négativement la qualité d'eau traitée.

L'analyse de la composition du perméat et du concentrât de chacun des deux étages de la configuration 3 (tableau 4-10) après traitement confirme l'influence négative.

Tableau 4-10: Concentration des ions dans le perméat et le concentrât de chaque étage pour la configuration 3 à deux étages.

	Alimentation	Perméat 1 ^{er} étage	Concentrât 1 ^{er} étage	Perméat 2 ^{eme} étage	Concentrât 2 ^{eme} étage	Perméat total
K ⁺ (mg/L)	40,71	17,86	52,14	25,85	69,80	21,42
Na ⁺ (mg/L)	1127,0	598,00	1392,00	766,00	1812,00	672,9
Mg ²⁺ (mg/L)	66,88	10,81	94,90	19,64	145,50	14,75
Ca ²⁺ (mg/L)	252,50	46,69	355,40	84,10	537,70	63,38
Sr ²⁺ (mg/L)	3,16	0,55	4,46	1,00	6,79	0,75
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	2,02	0,23	3,33	0,60	5,78	0,38
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	181,50	64,44	239,20	103,70	32,90	81,97
Cl ⁻ (mg/L)	1312,00	867,00	1535,00	1149,00	1794,00	992,7
F ⁻ (mg/L)	106 ,00	72,06	123,00	94,04	142,40	81,86
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1086,00	18.65	1619,00	35,47	2684,00	26,15
CO ₂ (mg/L)	3,20	2,68	3,75	2,85	4,80	2,75
TDS (mg/L)	4178,00	1696,00	5418,00	2279,00	7527,00	1956,00
pH	7,70	7,40	7,70	7,60	7,70	7,50

Dans l'espoir d'améliorer cette qualité tout en gardant un bon débit, plusieurs configurations ont été étudiées.

4.4.2.1 Configuration à trois étages

Pour améliorer la qualité du perméat final, nous proposons de traiter le perméat du deuxième étage avant d'être mélangé avec le premier perméat par le biais d'une troisième membrane en série de production.

On remarque que ce traitement a répondu à nos exigences en terme de qualité. En effet, une réduction de 26% des sulfates a été notée, de 22% pour le Ca^{2+} et le Mg^{2+} par rapport aux résultats de la configuration à deux étages comme c'est illustré sur la figure 4-6 :

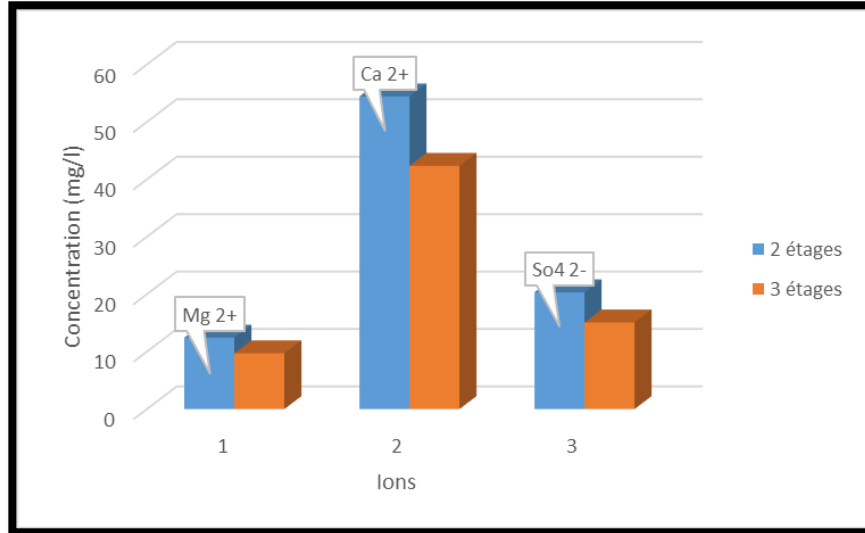


Figure 4-6: Concentration de Mg^{2+} , Ca^{2+} et SO_4^{2-} dans l'eau traitée par 2 et 3 étages comparées.

Les conditions opératoires de l'installation sont conservées, les deux premiers étages gardes les mêmes conditions précédentes de l'installation actuelles.

Toutefois, on remarque une faible diminution du débit du perméat total comme le montre le tableau 4-11.

Tableau 4-11: Débit du perméat et du rétentat de chaque étage pour une configuration à 3 étages.

Débits (m ³ / h)								
Alimentation	Perméat 1	Concentrât 1	Perméat 2	Concentrât 2	Perméat 3	Concentrât 3	Perméat total	Concen. Final
4,80	1,60	3,20	0,70	2,50	0,39	0,31	1,99	2,81

Comme il a été expliqué auparavant, le nombre de membranes diminue d'un étage à un autre ce qui impose l'installation d'une seule membrane au dernier étage (figure 4.7).

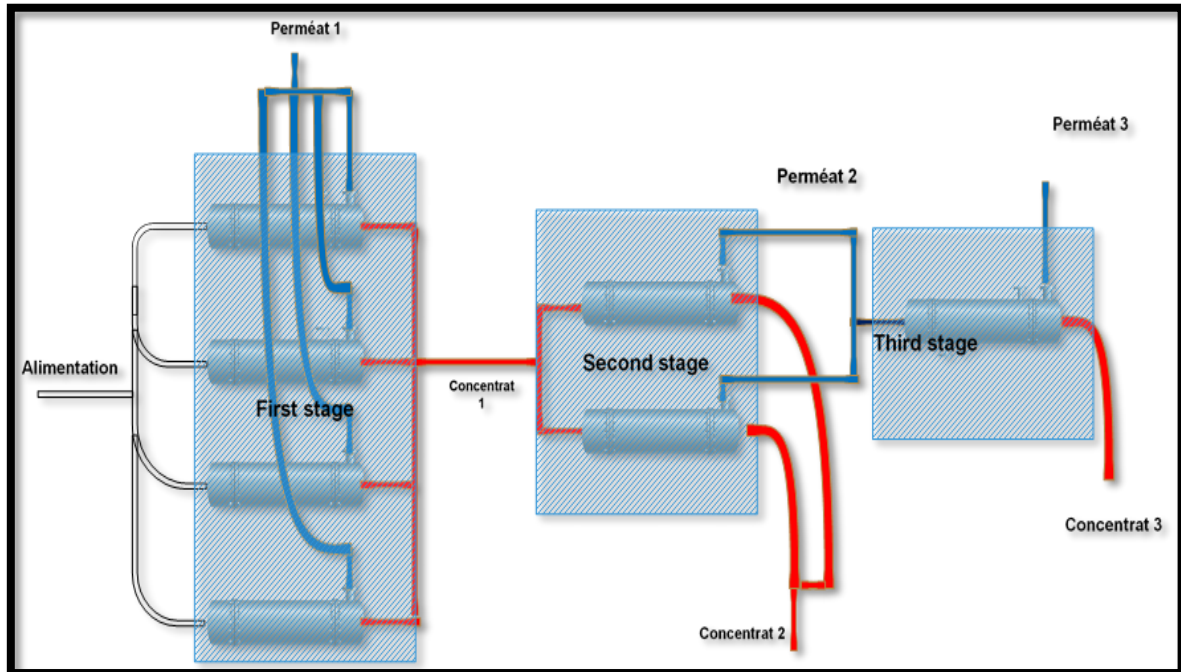


Figure 4-7: Configuration à trois étages

Bien que le critère de qualité a été vérifié avec cette configuration à trois étages, la diminution du débit qui n'atteint toujours pas les $2,1\text{m}^3/\text{h}$ désirés nous amène à suggérer :

- Augmenter le débit d'alimentation au niveau du premier étage ;
- Augmenter la pression opératoire au niveau des membranes du second étage ;
- Augmenter le nombre de membranes constituant le premier étage.

Quel que soit la solution préconisée, elle engendre une dépense supplémentaire c'est pourquoi ces configurations ont été éliminées de notre travail, néanmoins, en fonction de l'importance et l'urgence de l'installation le décideur peut adapter une des solutions ci-dessus.

Une solution économique qui peut être réalisée afin de remédier au problème la qualité d'eau est de faire un système de recirculation en mélangeant le condensat issu du premier étage avec une partie de l'eau de l'alimentation.

4.4.2.2 Configuration à un seul étage

Cette proposition est basée sur le fait que la qualité d'eau du perméat du premier étage (tableau 4-9) était assez convaincante, dans ce cas, le débit à atteindre est le seul critère de conceptions.

La configuration proposée est d'installer cinq (05) membranes en parallèle sous une pression de 7 bars et une température de 30 °C (figure 4-8). Dans ces conditions, les débits du perméat et de concentrât sont présentés dans le tableau 4-12.

Tableau 4-12 : Débit du perméat et du rétentat de chaque étage pour une configuration à trois étages.

N°. Membrane	Les débits (m ³ /h)		
	Alimentation	Perméat 1	Concentrât 1
1	1,20	0,46	0,74
5	6,00	2,30	3,70

Le taux de conversion de cette installation est de l'ordre de 38% chose qui rend cette configuration moins avantageuse sur le plan technique.

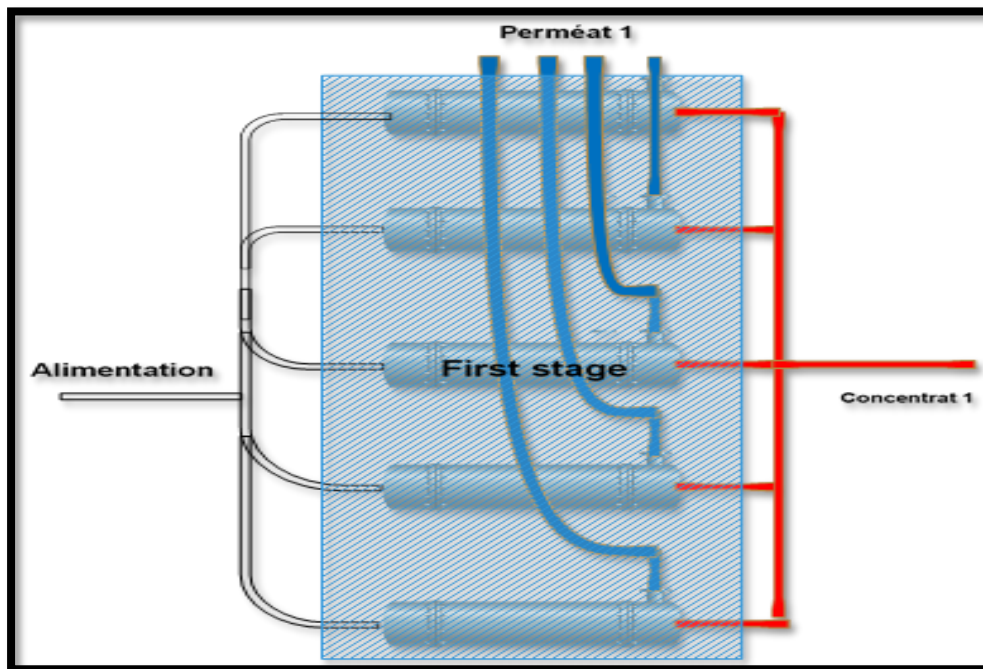


Figure 4-8 : Configuration à un seul étage

En ce qui concerne la qualité d'eau traitée, le tableau ci-dessous montre les concentrations de chaque composant.

Tableau 4-13 : Qualité d'eau traitée finale.

	Alimentation	Perméat	Concentrât
K ⁺ (mg/L)	40,71	18,73	54,18
Na ⁺ (mg/L)	1127,00	651,07	1418,00
Mg ²⁺ (mg/L)	66,88	12,28	100,30
Ca ²⁺ (mg/L)	252,50	51,84	375,50
Sr ²⁺ (mg/L)	3,16	0,62	4,72
CO ₃ ²⁺ (mg/L)	2,02	0,33	3,62
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	181,50	74,31	246,00
Cl ⁻ (mg/L)	1312,00	943,3	1538,00
F ⁻ (mg/L)	106,00	78,25	123,00
SO ₄ ⁻² (mg/L)	1086,00	23,32	1737,00
CO ₂ (mg/L)	3,20	2,70	3,93
TDS (mg/L)	4178,00	1855,00	5601,00
pH	7,70	7,50	7,70

Ces résultats montrent la bonne rétention des ions nocifs, ce qui fait de cette configuration une solutions adéquate, néanmoins, elle présente l'inconvénient du grand débit de rejet. On remarque que plus de la moitié du débit d'alimentation a été rejeté avec une concentration élevée en termes de matières en suspension c'est ce qui nécessite une recirculation ou une étude d'une utilisation en parallèle.

4.5 Conclusion

Ce chapitre porte sur l'influence des paramètres opératoires (température, pression et débit) sur les performances du procédé de traitement de l'eau de Lias par nanofiltration, en particulier le

débit de perméat et sa qualité.

Nous avons constaté que le choix de la température et de la pression d'attaque est un compromis entre le débit, qui augmente avec l'élévation de la température et de la pression, et la qualité du perméat qui s'évolue de manière inverse.

À partir de là, nous avons étudié les configurations possibles afin de répondre au débit et à la qualité finale demandés tout en prenons en considération l'influence des conditions opératoires.

Cependant, le choix final doit être en fonction, en plus de la qualité et débit du perméat, sur une étude économique basé sur la consommation énergétique du procédé.

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour but d'améliorer les performances d'une station de traitement membranaire, donc d'obtenir une eau traitée avec une bonne qualité tout en maintenant un fort débit et en augmentant le rendement de la filtration membranaire.

Pour commencer, il a fallu dans un premier temps définir la notion de traitement, ses étapes depuis le pompage de l'eau jusqu'à l'obtention du perméat, examiner ses caractéristiques pour bien comprendre le pourquoi du comment de notre problématique, et pouvoir ainsi la résoudre.

La résolution de ce problème c'est fait à partir d'une analyse chimique et thermodynamique, et d'une modélisation via le logiciel Wave.

On s'est intéressé principalement à l'influence des paramètres de la température, de la pression et du Ph.

L'idée de notre travail se repose sur le principe du changement de la qualité de l'eau. Il ressort que la variation de pression et de la température affecte le résultat de la filtration. En effet, l'augmentation de ces paramètres améliore le flux de perméation mais baisse la sélectivité de la membrane. Après avoir étudié l'influence de ces paramètres opératoire sur les performances de l'installation, tout en respectant les exigences des puits d'injection mises en place nous avons étudié les trois meilleures configurations de l'installation soit une configuration mono étagée, à deux étages et celle à trois étages, donnant une composition chimique de l'eau pour éviter les risques de colmatage et entartrage et atteindre le débit d'eau fixé de 50m³/jour.

Les résultats obtenus lors des simulations avec le logiciel Wave sont légèrement différents aux résultats expérimentaux, et ceci est du probablement aux conditions réelles de l'installation, aux erreurs liées à l'analyse qu'on ne peut pas éviter, Toutefois, ces résultats restent fiables.

En dernier lieu, on tient à préciser que tous les travaux d'ingénieurs restent incomplets devant la recherche scientifique, en outre certains points que nous n'avons pas pu aborder sont en perspectives.

Nous avons eu des idées pour résoudre certains problèmes sans pour autant les concrétiser, ce qui est le cas des rejets (le concentrât). Nous proposons ainsi quelques solutions qui peuvent être sujet d'étude, ce concentrât peut cependant passer par le processus de « Distillation solaire » pour récupérer l'H₂O, mais cette méthode doit être très bien étudiée du côté des risques environnementaux. Une autre solution est celle de diluer ce concentrât avec de l'eau de source et l'utiliser ensuite pour l'agriculture de la région. Il serait aussi très intéressant d'essayer d'autres types de membranes ainsi que d'autres techniques de prétraitement.

Références bibliographiques

AHOULÉ, Dompé Ghislain Maxime. Performances comparatives des techniques de nanofiltration et d'osmose inverse pour le traitement d'eau de consommation contaminée à l'arsenic au Burkina Faso. Thèse de Doctorat : l'Energie et l'Environnement Spécialité : Eau. Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2ie), Ecole doctorale Sciences et Technologies de l'Eau, 2016. 151 pages.

ALLIET, Marrion. ROUZINEAU, David. Nanofiltration et Osmose inverse. Tp Nanofiltration INP ENSIACET, INP ENSAT, 2016. 22 pages

ARZATE, Alfa. Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire. Revue de littérature : centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole inc. Québec, Canada, 2008. 56 pages.

BERLAND, Jean-Marc. JUERY, Catherine. Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Office International de l'eau SNIDE. Doc N°14, 2002. 71 pages.

BOUCHOUX, Antoine. Étude de la nanofiltration pour son intégration dans les procédés de production d'acides organiques. Thèse de doctorat : génie des procédés. Université Paul Sabatier, Toulouse, UFR Physique-chimie-Automatique, 2004. 209 pages.

DERDAR, Hodhaifa. Suivi de traitement de pétrole brut par analyses chimiques « sonatrach-organisation Ourhoud-Hassi Messaoud ». Mémoire de Master 2 : Chimie, Analyse spectrale en chimie. Université Abdelhafid Ibn Badis Mostaganem, 2014. 86 pages.

ELAGGOUNE, Abdelghani. GRINI, Abdelaali. Optimisation de la filtration à sable : cas de la station de traitement de l'eau potable de Hammam Debagh Guelma. Mémoire de Master 2 : hydraulique, hydraulique et technique des eaux. Université 08 Mai 1945 de Guelma, 2016. 123 pages.

FEIA, Sadok. Effet de l'injection d'eau de production sur la perméabilité des réservoirs pétroliers non cimentés. Mémoire de doctorat : Géotechnique. Université Paris-Est, Laboratoire NAVIER, 2015. 222 pages.

HAREZ, Amina. DJELAILIA, Hanane. Etude d'une station de traitement et de production d'eau potable à partir d'un forage. Mémoire de Master 2 : hydraulique, hydraulique urbaine et ressources hydraulique. Université B.M. Annaba, 2014. 90 pages.

IHADDADENE, Lilia. Etude de la corrosion et la protection des pipelines de réseau de collecte d'huile de la région TFT-secteur nord-. Mémoire de Master 2 : science et génie des procédés, génie de l'environnement. Université A.M OULHADJ-Bouira, 2018. 104 pages.

Références bibliographiques

MANNOT, Mathias. Conception d'une filière intensifiée par membrane pour le dessalement autonome d'eau de mer : étude du prétraitement et de son effet sur le biocolmatage. Thèse de doctorat : Génie des Procédés et de l'Environnement. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse), 2015. 306 pages.

MEDDAHI, Khalida. 2013. Contribution à l'étude de l'incompatibilité entre un inhibiteur de corrosion et un inhibiteur de dépôt. Mémoire de Magister : Génie des polymères option Chimie et physique des polymères. Université M'hamed Bougara-Boumerdes, Faculté des sciences de l'ingénieur, 105 pages.

METAICHE, Mehdi. Technologie membranaire. Maitre de conférence, Faculté des sciences et des sciences appliquées, Université de Bouira, 2014. 83 pages.

OUALI, Salima. Étude géothermique du Sahara de l'Algérie. Mémoire de Magister : Géophysique et traitement du signal. Université M'hamed Bouguerra Boumerdes, Faculté des hydrocarbures et de la chimie, 2006. 84 pages.

PONTIÉ, Maxime. La nanofiltration pour un dessalement sélectif. Université d'Angers & Groupe Analyses et Procédés, 2008. 53 pages.

ROMDHANE, Ahlem. Procédés de séparation membranaire pour la production en continu de nanocristaux de polysaccharides : approche expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat : Mécanique des fluides, énergétique, procédés. Université de Grenoble, 2014. 237 pages.

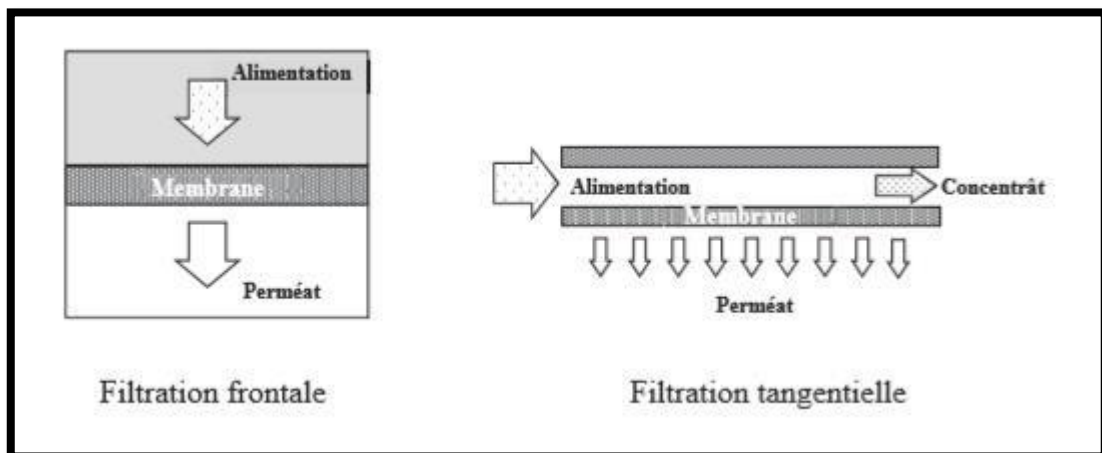
SAÏD, Ali. Synthèse de membranes minérales de nanofiltration par formation de films minces de zéolithes sur un support tubulaire en alumine : étude de l'évolution des propriétés de surface et des caractéristiques de filtration en milieu aqueux. Thèse de doctorat en cotutelle : Université de Haute Alsace et Université libanaise, 2015. 246 pages.

SONATRACH. Désulfatation des eaux de dessalag de la Sonatrach à Hassi Messaoud, septembre 2018. 30 pages.

Annexe

Type de particules	Diamètre en mm	Temps de chute		
		Densité de 2.65	Densité de 2.00	Densité de 1.10
Gravier	10	0.01s	0.02s	0.2s
Sable grossier	1	1.27s	2.09s	20.90s
Sable fin	0.1	2.11mn	3.48mn	34.83mn
Glaise	0.01	3.52h	5.80h	2.42j
Bactéries	0.001	14.65j	24.19j	241.9j

Annexe 1 : Temps des décantations des différentes particules.



Annexe 2 : Modes de filtration d'une membrane (AHOULÉ Dompé Ghislain Maxime, 2016).

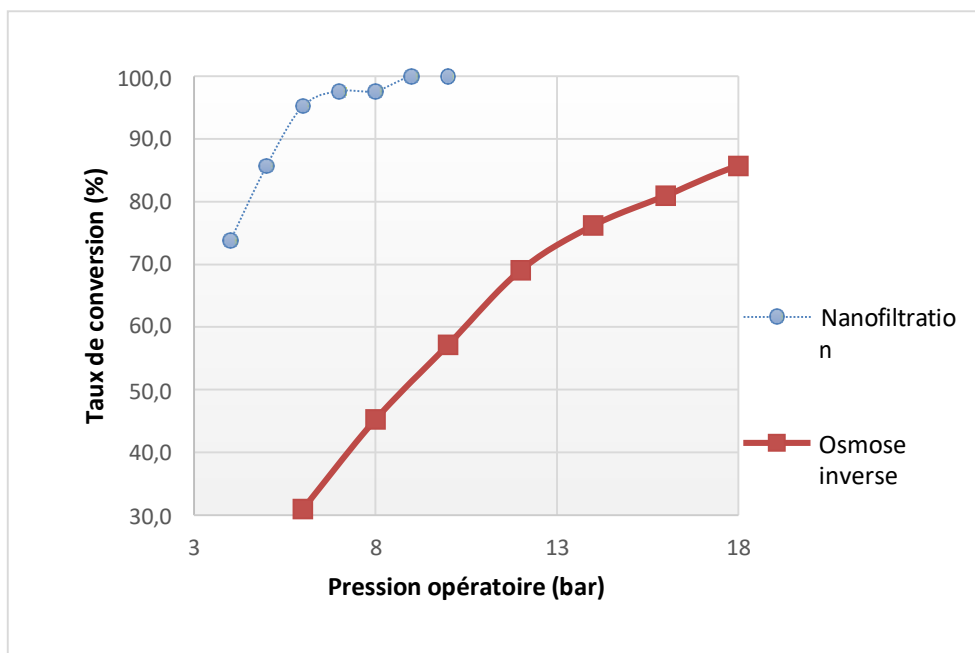
https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-BW30-4040-L-fr.pdf?fbclid=IwAR2crYehAVhUyTQVs6_WLtoqZkcgcbyngX6W4GzoOHbwwPuTzYtc72dASP0

Annexe 3 (a)

https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-BW30-4040-L-fr.pdf?fbclid=IwAR2crYehAVhUyTQVs6_WLtoqZkcgcbyngX6W4GzoOHbwwPuTzYtc72dASP0

Annexe 3 (b)

Annexe 3 : fiches techniques des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse respectivement (a) NF270-4040 , (b) BW30-4040.



Annexe 4 : Taux de conversion en fonction de la pression.

Annexe

Annexe 5 : Résultats des analyses des échantillons d'eau traitée par nanofiltration.

N°Echan	Ca ²⁺		Mg ²⁺		SO ₄ ²⁻		Na ⁺		K ⁺		Cl ⁻		HCO ₃ ⁻		TURBIDITE		pH
	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	NTU	%	
1	43,5	102,6	5,1	20,4	11	46,7	585,9	1110,3	27,7	22,2	908,8	857,0	106,14	361,4	0,487	0,0	7,7
2	44,3	104,6	6,6	26,4	20	84,8	527,0	998,7	26,0	20,9	908,8	857,0	112,24	382,2	1,78	0,2	7,5
3	46,9	110,6	9,8	39,3	20	84,8	650,1	1231,9	29,5	23,7	1086,3	100,0	167,14	100,0	0,309	0,0	7,5
4	47,2	111,5	10,7	42,8	49	207,8	619,1	1173,2	28,4	22,8	979,8	924,0	146,4	498,5	0,254	0,0	7,6
5	54,7	129,2	9,1	36,4	14	59,4	591,6	1121,1	28,0	22,5	944,3	890,5	115,9	394,6	0,115	0,0	7,4
6	56,3	132,9	9,1	36,3	9	38,2	564,4	1069,5	27,4	22,0	944,3	890,5	124,44	423,7	0,06	0,0	7,4
7	52,8	124,6	10,6	42,4	25	106,0	592,2	1122,2	29,4	23,6	979,8	924,0	118,34	402,9	0,131	0,0	7,7
8	48,6	114,8	10,2	40,9	17	72,1	588,1	1114,5	29,7	23,9	1015,3	957,5	132,98	452,8	0,086	0,0	7,7
9	50,3	118,6	14,4	57,7	18	76,3	577,4	1094,2	29,0	23,2	944,3	890,5	112,24	382,2	0,192	0,0	7,6
10	53,6	126,6	16,2	64,9	12	50,9	620,0	1174,9	29,3	23,5	1015,3	957,5	136,64	465,2	0,1	0,0	7,6
11	39,1	92,2	14,1	56,4	95	402,9	540,9	1025,0	28,5	22,9	944,3	890,5	101,5	345,6	0,361	0,0	7,4
12	53,6	126,6	12,3	49,2	44	186,6	563,2	1067,3	31,1	25,0	979,8	924,0	135,42	461,1	0,311	0,0	7,4
13	62,2	146,7	7,1	28,2	23	97,6	533,8	1011,6	27,9	22,4	1015,3	957,5	103,7	353,1	0,056	0,0	7,7
14	58,6	138,2	12,6	50,3	44	186,6	541,7	1026,5	30,5	24,5	979,8	924,0	119,56	407,1	0,092	0,0	7,4
15	39,9	94,1	17,7	70,6	95	402,9	580,1	1099,3	31,9	25,6	908,8	857,0	134,2	456,9	0,083	0,0	7,5
16	47,0	111,0	14,1	56,4	3,0	12,7	587,0	1112,4	31,0	24,8	947,9	893,9	131,2	446,5	0,173	0,0	7,5
17	56,8	134,1	17,6	70,2	2,0	8,5	576,7	1092,9	32,0	25,7	947,9	893,9	137,3	467,3	0,086	0,0	7,4
18	57,6	136,0	15,9	63,5	2,0	8,5	578,6	1096,5	31,7	25,5	947,9	893,9	146,4	498,5	0,155	0,0	7,4
19	54,4	128,3	14,5	57,9	0,0	0,0	573,9	1087,5	33,0	26,5	912,4	860,4	168,4	100,0	0,118	0,0	7,5
20	53,4	126,1	13,1	52,5	8,0	33,9	603,7	1144,0	33,7	27,0	1054,4	100,0	154,9	527,5	0,098	0,0	7,3
21	52,3	123,4	12,5	49,9	11,0	46,7	613,3	1162,2	33,6	26,9	1018,9	100,0	184,2	100,0	0,059	0,0	7,6
moyenne	51,1	120,6	12,1	48,2	24,9	105,4	581,4	1101,7	30,0	24,0	970,7	787,8	132,8	382,2	0,2	0,0	7,5

Soluté	Poids moléculaires (g/mol)	D (10^{-9} m ² /s)	Rayon hydraté (Å)	Références
Na ⁺	23	1,33	3,6	Vroenhoek & Waypa (2000)
K ⁺	39	1,96	3,31	Linde & Jönsson (1995) ; Nightingale (1959)
Mg ²⁺	24,3	0,71	4,28	Linde & Jönsson (1995) ; Nightingale (1959)
Ca ²⁺	40,1	0,92	4,1	Vroenhoek & Waypa (2000)
Cl ⁻	35,5	2,03	3,32	Vroenhoek & Waypa (2000)
SO ₄ ²⁻	96,1	1,06	3,79	Vroenhoek & Waypa (2000) ; Nightingale (1959)

Figure 0-1 : Caractéristiques de quelques solutés (AHOULE, 2016).