

0REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie chimique.

Optimisation et Dimensionnement d'une filière de
traitement des eaux non conventionnelles clarifiées
pour la production d'hydrogène par électrolyse

Réalisé par :

Mlle. KHELIFA Naila
Mlle. MAKHLOUF Ferial

Encadré par

Dr. HADJI Moundir
Pr- M^r : W. NACEUR

Année universitaire 2021/2022

Résumé

L'un des enjeux majeurs de la production de l'hydrogène par électrolyse est la disponibilité d'une eau de qualité Ultra-pure. L'objectif de ce travail, est la mise au point et la comparaison (efficacité énergétique) d'un système d'osmose inverse par simulation, pour le traitement de 1000m³/h d'eau de mer et eau de rejet clarifiée, en vue d'obtenir un permeat finale avec un TDS de l'ordre de quelques ppm. Les travaux démontrent clairement la capacité d'un système d'osmose inverse à double passe et un seul étage à atteindre une salinité inférieure 2 mg/l, et ce dans les deux cas. La réussite de ce processus ne peut être possible que par un choix judicieux et adéquat des membranes RO dédié traitement de l'eau de mer et l'eau de rejet.

Mots clé : production d'hydrogène, électrolyse, osmose inverse, eau ultra-pure.

الملخص:

من الشروط الاساسية في انتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي هو توفر مياه نقية عالية الجودة. الهدف من هذا العمل، هو تطوير و مقارنة (كفاءة الطاقة) لنظام التناضح العكسي عن طريق المحاكاة، لمعالجة 1000 م³/ الساعة من مياه البحر و مياه الصرف المصفاة، للحصول على ماء مصفى مع مجموع المواد الصلبة الذائبة ذات بضع اجزاء في المليون، يوضح العمل بوضوح قدرة نظام التناضح العكسي احادي المرحلة و مزدوج التميرير لتحقيق ملوحة اقل من 2 ملجم / لتر في كلتا الحالتين . نجاح هذه العملية لا يمكن ان يكون ناجحا الا من خلال اختيار حكيم ومناسب لأغشية التناضح العكسي المخصصة لعلاج مياه البحر ومياه الصرف الصحي.

انتاج الهيدروجين، التحليل الكهربائي، مياه نقية عالية الجودة، التناضح العكسي، مياه غير تقليدية:

الكلمات المفتاحية : إنتاج الهيدروجين ، التحليل الكهربائي ، التناضح العكسي ، الماء النقي للغاية.

Abstract:

One of the major challenges in the production of hydrogen by electrolysis is the availability of ultra-pure quality water. The objective of this work is the development and comparison (energy efficiency) of a reverse osmosis system by simulation, for the treatment of 1000m³/h of seawater and clarified waste water, with a view to to obtain a final permeate with a TDS of the order of a few ppm. The work clearly demonstrates the ability of a single-stage, double-pass reverse osmosis system to achieve salinity below 2 mg/l in both cases. The success of this process can only be possible through a judicious and adequate choice of RO membranes dedicated to the treatment of seawater and waste water.

Key words: hydrogen production, Electrolysis, reverse osmosis, ultra-pure water.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier ALLAH tout puissant de m'avoir donné la santé, le courage et la volonté pour mener à terme ma formation de master.

Un grand remerciement à nos encadreurs Pr-Mr WAHIB NACEUR et Mr HADJI de l'université Blida 1, leurs orientations tout au long de la réalisation de ce travail, pour ses précieux conseils et ses encouragements.

J'adresse aussi mes remerciements à tous nos enseignants qui ont donnés les meilleurs d'eux-mêmes durant le cycle de notre formation.

Mes sentiments de reconnaissance et mes remerciements les plus respectueuses vont aussi à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, à tous mes enseignants.

Dédicace

D'un profond amour et d'une immense gratitude je dédie ce travail à ma mère et mon père qui me sont les plus chères, à qui tous les mots du monde ne pourront rendre le meilleur de ce qu'ils m'ont donné, Pour leur amour, leur patience et encouragements qu'ils m'ont offert durant toute ma vie.

Qu'Allah Le Tout Puissant me les garde.

A mon cher frère Brahim et ma chère sœur Soumia et ma belle-sœur Manel.

A tous les étudiants de master 2 génie chimique de la promotion 2021/2022.

Dédicace :

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour
A mes chers parents, pour leur soutien, leur aide et surtout
leur amour.*

Qui ont consacré leur vie à mon éducation et ma réussite.

A mon cher et mon unique frère Yassine.

A mes chères sœurs Wafia et Lidia.

A ma famille Makhlouf.

*A mon binôme Naila à qui je souhaite une vie pleine de
bonheur et de succès.*

*Je remercie infiniment mes collègues pour leur esprit de
coopération.*

A toutes mes amies Nour, Chaïma, Safa, Lamia ...

A toute la promotion génie chimique (2021/2022).

A tous ceux que je connais de près et de loin

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
Liste des tableaux.....	4
Liste des figures.....	7
Liste des abréviations	10
Liste des éléments chimiques	11
CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	13
I.1. Introduction.....	13
I.2. Disponibilité de l'eau	13
I.3. Eau de mer.....	13
I.4. Eau de rejet	13
I.5. Opération de séparation membranaire	14
I.5.1. Principe de fonctionnement.....	14
I.5.2. Différents procédés de séparation membranaire	14
I.5.2.1. L'ultrafiltration (UF).....	15
I.5.2.2. La nano filtration	15
I.5.2.3. L'osmose et osmose inverse (OI).....	16
I.5.2.4. Microfiltration	16
I.5.3. Comparaison entre osmose inverse et Ultrafiltration.....	17
I.5.3.1. Les similitudes entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse	17
I.5.3.2. Prétraitement d'OI et UF :	17
I.5.3.3. Différence entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse.....	17
I.5.4. Configurations des membranes :	18
I.5.4.1. Module à fibre creuse :	18
I.5.5. Colmatage :.....	19
I.5.5.1. Méthode de nettoyage des membranes.....	20
I.5.5.2. Procédure de nettoyage des membranes d'osmose inverse :.....	21
I.6. Conclusion	22
CHAPITRE II : PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU ULTRA PURE	23
II.1. Introduction	23
II.2 Eau ultra pure	23
II.3. Les techniques de production d'eau ultra pure	23
II.3.1.L'installation de l'osmose inverse :	24
a-Déchloration.....	24
b- Produits antiscalin (Séquestrant).....	24

c- Préfiltre :	25
d- Pompe :	25
II.3.1.1. Différents montages de l'osmose inverse	26
a- Système di- étages en série production	26
b- Système di- étages hybrides rejet- production :	26
II.3.2. Obtention d'eau ultra pure par électrodéionisation	27
II.3.2.1. Description de procédé :	27
II.3.2.2. Consommation énergétique	28
II.3.2.3. Prétraitement d'EDI avec deux passages d'osmose inverse	28
II.4. Procède de production d'hydrogène	29
II.4.1. Etat de l'art sur les technologies des électrolyseurs d'eau	30
II.3.2. Electrolyseur de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM)	32
II.3.2.1. Description générale	32
a- L'électrolyte	33
b- Le catalyseur	33
II.4.2.2. Principe de fonctionnement	34
II.4.2.3. Rôles et propriétés des différents composants d'électrolyseur PEM	35
a- La membrane Nafion (Du Pont de Nemours Co)	35
b- Assemblage membrane électrodes (AME)	36
II.4.2.4. Avantages de l'électrolyseur PEM	37
II.4.2.5. Inconvénients de l'électrolyseur PEM	38
II.4.2.6. Applications de l'électrolyseur PEM	38
II.5. Nouvelles applications d'Hydrogène	38
II.5.1. Synthèse chimique	38
II.5.2. Carburant	38
II.5.2.1. Combustion dans un moteur	38
II.5.2.2. Pile à combustible	39
CHAPITRE III : METHODOLOGIE	40
III.1. Introduction	40
III.2. Présentation du logiciel WAVE 1.82	40
Parmi les avantages de ce logiciel :	40
III.2.1. Les technologies de traitement d'eau sur le logiciel WAVE	41
III.2.2. Les équations de conception d'un système RO sur logiciel WAVE	41
III.3. Les Interfaces du logiciel WAVE	45
III.4. caractéristiques de l'eau mer et eau rejet clarifiée (paramètres d'alimentations)	48
III.5 Ultrafiltration des eaux usées:	52

CHAPITRE IV : SELECTION DES MEMBRANES.....	54
IV.1. L'eau de mer	54
IV.2. Eau de rejet	60
CHAPITRE V : CONFIGURATIONS DE L'UNITE ET VARIATION DU TAUX DE CONVERSION	64
V.1.Introduction :	64
V.2. Eau de mer	64
V.2.1. Variation du taux de conversion : un seul pass et un seul étage	64
a- Effet sur la salinité du permeat	65
b- Effet sur la conductivité du permeat.....	66
c- Effet sur la pression d'alimentation :	67
d- Effet sur l'énergie spécifique.....	69
V.2.2. Variation du taux de conversion : double passes et un seul étage.....	70
a- Effet sur la salinité du permeat	72
b- Effet sur la conductivité du permeat.....	73
d- Effet su l'énergie spécifique :	75
V.2. Eau de rejet :	76
V.2.1. Variation du taux de conversion : un seul pass et un seul étage	76
a- Effet sur la salinité du permeat	77
b- Effet sur la conductivité du permeat.....	78
c- Effet sur la pression d'alimentation :	79
d- Effet su l'énergie spécifique :	80
V.2.2. Variation du taux de conversion : double passes et un seul étage.....	81
a- Effet sur la salinité du permeat	82
b- Effet sur la conductivité du permeat.....	83
c- Effet sur la pression d'alimentation	83
d- Effet su l'énergie spécifique	84
CHAPITRE VI : COMPARAISON.....	86
VI.1.Introduction	86
VI.2. Dimensionnement des unités : eau de mer et eau de rejet	86
VI.3 TDS finale :.....	87
VI.4. La Pression d'alimentation :	88
VI.5 Energie spécifique :	89
CONCLUSION.....	91
PERSPECTIVES	92
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	93

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différence entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse.....	17
Tableau II.1 : Réaction et porteurs de charge pour différents types d'électrolyseurs d'eau...	31
Tableau II.2 : Données techniques actuelles sur les différentes familles d'électrolyseurs.....	31
Tableau II.3 : comparaison technologies alcaline et PEM.....	32
Tableau III.1 : Équations de conception pour projeter les performances du système d'osmose inverse : performances des éléments individuels.....	42
Tableau III.2 : Équations de conception pour projeter les performances du système OI : performances moyennes du système.....	43
Tableau III.3 : symbol definition.....	44
Tableau III.4 : Les paramètres de flux d'alimentation.....	49
Tableau III.5 : La composition de flux d'alimentation.....	49
Tableau III.6 : Les paramètres de flux d'alimentation.....	50
Tableau III.7: La composition de flux d'alimentation.....	51
Tableau III.8 : le paramètre flux d'alimentation d'Ultrafiltration.....	51
Tableau III.9 : La composition de flux d'alimentation.....	51
Tableau III.10: dimensionnent de la membrane SFP-2860 XP.....	53
Tableau III.11 : Les caractéristiques de la membrane SFP-2860XP.....	53
Tableau IV.1 : Caractéristiques des membranes RO-SW présélectionnées pour l'étude (cas d'une eau de mer).....	55
Tableau IV.2 : le nombre d'élément et le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO-SW pour traiter un débit de 1000 m ³ /jour (1 pass & 1 stage).....	56
Tableau IV.3 : Respectivement la salinité totale, la pression d'alimentation ainsi que l'énergie spécifique et la conductivité pour chaque membrane (RO-SW) dans le cas d'une configuration basique avec un taux de conversion de 40%.....	58
Tableau IV. 4 : Caractéristiques des membranes RO-BW présélectionnées pour l'étude (cas d'eau de rejet).....	60

Tableau IV.5 : le nombre d'élément et le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO-BW pour traiter un débit de 1000m ³ /jour (1 pass & 1 stage).....	61
Tableau IV.6 : Respectivement la salinité totale, la pression d'alimentation ainsi que l'énergie spécifique et la conductivité pour chaque membrane (RO-BW) dans le cas d'une configuration basique avec un taux de conversion de 40%.....	62
Tableau V.1 : TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	65
Tableau V.2 : conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	67
Tableau V.3: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	68
Tableau V.4: Energie spécifique en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	69
Tableau V.5: le nombre d'élément et le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO-SW pour traiter un débit de 1000m ³ /jour (2 pass & 1 stage).....	71
Tableau V.6 : TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	72
Tableau V.7 : conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	74
Tableau V.8: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	74
Table V.9 : Energie spécifique on en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	75
Tableau V.10: TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	77
Tableau V.11: conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	78
Tableau V.12: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-BW sélectionnées.....	79

Tableau V.13 : l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	80
Tableau V.14 : le nombre d'élément et le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO-BW pour traiter un débit de 1000m ³ /jour (2 pass & 1 stage).....	81
Tableau V.15 : TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.....	82
Tableau V.16: conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-BW sélectionnées.....	83
Tableau V.17: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-BW sélectionnées.....	84
Tableau V.18 : l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW.....	84
Tableau VI.1 : nombre d'élément en fonction type d'élément pour les membranes RO-BW et RO-SW.....	86
Tableau VI.2 : salinité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW et RO-SW.....	87
Tableau VI.3 : pression d'alimentation pour les deux systèmes RO	89
Tableau VI.4 : l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW et RO-SW.....	89

Liste des figures :

Figure 1.1 : Représentation schématique de la séparation par membrane sélective.....	14
Figure 1.2 : Rétention des différents types de solutés selon le procédé membranaire-pression d'utilisation.....	15
Figure I.3 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse.....	16
Figure1.4 : Modules à fibres creuses.....	19
Figure 1.5 : Accumulation des différentes matières sur, dans et au voisinage de la membrane lors d'un écoulement tangentiel.....	20
Figure II.1 : les différents montages en série et en hybride	27
Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'électrodéionisation.....	28
Figure II.3 : Procédé de prétraitement d'EDI avec deux passages d'RO.....	29
Figure II.4 : Répartition des modes de production d'hydrogène actuels.....	29
Figure II.5 : Procède de production d'hydrogène.....	30
Figure II.6 : Schéma de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse PEM.....	33
Figure II.7 : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM.....	35
Figure II.8: Formule chimique du Nafion.....	36
Figure II.9 : Mécanisme de fonctionnement d'une pile à combustible.....	39
Figure III.1 : Fenêtre 1 ; choix de la technologie, du débit et du type d'eau.....	46
Figure III.2 : Page 2 ; caractéristiques de l'eau d'alimentation.....	47
Figure III.3: Page 3 ; choix des membranes et configuration de l'unité.....	48
Figure III.4 : configuration basique pour la sélection des membranes UF.....	52
Figure III.5: Dimension de la Membrane de type SFP – 2860 XP.....	52
Figure IV.1 : configuration basique pour la sélection des membranes RO.....	54
Figure IV.2 : Histogramme du nombre d'éléments nécessaire pour 1000m ³ /h (1 pass & stage).....	57

Figure IV.3 : histogramme de la salinité totale (TDS) et de la conductivité en fonction des éléments.....	59
Figure IV.4 : pression d'alimentation en fonction énergie spécifique pour chaque membrane et un taux de conversion de 40%.....	59
Figure IV.5 : Histogramme du nombre d'éléments nécessaire pour 1000m ³ /h (1 pass & stage).....	62
Figure IV.6 : histogramme de la salinité totale (TDS) et de la conductivité en fonction des éléments.....	63
Figure IV.7 : pression d'alimentation en fonction énergie spécifique pour chaque membrane et un taux de conversion de 40%.....	63
Figure V.1 : configuration basique pour la sélection des membranes RO.....	65
Figure V.2 : variation du TDS en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW.....	66
Figure V.3 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW.....	67
Figure V.4 : variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW.....	68
Figure V.5: variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW.....	70
Figure V.6: configuration 2 passe pour la sélection des membranes RO.....	71
Figure V.7: Histogramme du nombre d'éléments nécessaire pour 1000m ³ /h (2 pass & 1stage).....	72
Figure V.8 : variation du TDS en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW.....	73
Figure V.9 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW.....	74
Figure V.10: variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW.....	75

Figure V.11 : variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW.....	76
Figure V.12 : variation du TDS en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-BW.....	77
Figure V.13 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-BW.....	78
Figure V.14 : variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-BW.....	79
Figure V.15: variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW.....	80
Figure V.16: Histogramme du nombre d'éléments nécessaire pour 1000m ³ /h (1 pass & 2 pass).....	81
Figure V.17 : variation du TDS en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW.....	82
Figure V.18 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW.....	84
Figure V.19 : variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW.....	84
Figure V.20 : variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW.....	85
Figure VI.1: variation de salinité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW et RO-SW.....	88

Liste des abréviations

Symboles	signification
A°	ångström
Ans	années
Cm	centimètre
DBO	Demande biologique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
DPRO	Double passe osmose inverse
EDI	Electrodéionisation
G	gramme
GDL	Gaz diffusion layer
K	kelvin
Km	kilomètre
Kw	kilowatt
L	Litre
m ³	Mètre cube
MF	Microfiltration
NF	nanofiltration
Nm	nanomètre
OI	Osmose inverse
pH	Potentiel hydrogène
PEM	Proton echange membrane
PPb	Partie par billion
Q	débit
SOE	Solide oxide electrolyte
SPE	Solide polymère electrolyte
TDS	Total des solides dissus
UF	Ultrafiltration
µg	microgramme
µm	micromètre
µs	micro
ΔP	Différente de pression

Liste des éléments chimiques

Élément	nomenclature
B	Bore
Ba ²⁺	Ion Baryum
Br ⁻	Ion brome
Ca ²⁺	Ion calcium
Cl ⁻	Ion chlorure
Cl ₂	Dichlore
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO ₃ ⁻²	Ion carbonate
F ⁻	Ion fluor
H ⁺	Ion Hydrogène
H ₂ O	L'eau
HSO ₃ ⁻	Hydrogénosulfite
K ⁺	Ion de potassium
KOH	Hydroxyde de potassium
Mg ²⁺	Ion magnésium
Na ⁺	Ion sodium
Na ₂ CO ₃	carbonate de sodium
NaOH	Hydroxyde de sodium
OH ⁻	Hydroxyde
PO ₄ ³⁻	Orthophosphate
Pt	Platine
SO ₄ ²⁻	Ion sulfate
Sr ²⁺	Ion strontium
TiO ₂	dioxyde de titane

Introduction générale

La sécurité énergétique et l'un des piliers fondamentaux à l'épanouissement et l'émergence d'une nation. L'Algérie dont la sécurité énergétique est fortement dépendante des énergies fossile, ambitionne à une alternative par une production d'hydrogène en adéquation avec les normes et les aspects environnementaux et écologique. Une multitude de techniques permettent de produire cette source d'énergie qui est l'hydrogène (soit bleu ou bien vert), l'une des techniques la plus probante (la plus viable) est la production d'hydrogène à partir d'électrolyse. Cependant cette technique représente un inconvénient et qui est la disponibilité d'une source d'eau de qualité ultra-pure pour la faisabilité de ce processus.

Afin de ne pas privé la population d'une eau de qualité potable ou bien de qualité d'irrigation, il est judicieux de puiser à partir d'une eau plus abondante et de moindre qualité pour la production d'une eau ultra-pure tel que l'eau de mer et l'eau de rejet. En effet ceci représente un challenge technique, et pour ce faire nous avons opté pour un traitement d'eau de mer et d'eau de rejet par un système d'osmose inverse.

L'objectif de ce travail est d'évaluer et comparer la possibilité de produire une eau avec une salinité de quelques ppm à partir de l'eau de mer et l'eau de rejet, dans un premier lieu par un criblage et une sélection de membranes de type RO-SW dédiée à l'eau de mer et de type RO-BW dédiée à l'eau de rejet (saumâtre) et dans un deuxième lieu, une optimisation de la configuration du système RO.

Le travail est basé sur une approche méthodologique comme suit :

- Synthèse bibliographique.
- Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ultra pure.
- Méthodologie.
- Sélection de la membrane.
- Configurations.
- Comparaison

CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Face aux demandes croissantes de l'eau de qualité acceptable avec un coût minimal, le recours aux techniques membranaires est plus en plus important pour résoudre le problème.

Dans ce premier chapitre nous présentons une étude bibliographique, dont la majeure partie porte sur les différents aspects des membranes, à savoir leurs Principe de fonctionnement, leurs différents procédés de séparation et leurs différentes configurations des modules membranaires

I.2. Disponibilité de l'eau

L'hydrosphère terrestre représente 1,38 milliard de Km^3 d'eau, 97,5% de celle-ci est de l'eau de mer avec des océans couvrant environ 71% de la surface de la Terre. Parmi les 2,5% de l'hydrosphère étant de l'eau douce, 69,5% est sous forme de glace ou permanente couverture neigeuse dans l'Arctique, l'Antarctique et les régions montagneuses. Les 30,1 % restants sont des eaux souterraines estimées à 10 millions de km^3 . Enfin, les lacs et rivières représentent 0,4 % des ressources en eau douce. [1]

I.3. Eau de mer

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates).

La salinité des mers ouvertes sur les masses océaniques (Atlantique, Manche, Mer du Nord, pacifique) est de l'ordre est de 35 g.L^{-1} , cette valeur est considérée comme la salinité standard de l'eau de mer. Des variations plus ou moins importantes autour de cette valeur moyenne existent en fonction du bilan précipitation-évaporation. [1]

I.4. Eau de rejet

Selon REJSEK (2002), les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels.

Les eaux usées sont composées d'environ 99% d'eau et 1% de matières solides en suspension, colloïdales et dissoutes. [2]

I.5. Opération de séparation membranaire

I.5.1. Principe de fonctionnement

De façon générale, une membrane peut être comme étant une couche mince permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert (figure 1.1) [3] ; les critères de séparation des particules, des molécules ou encore des ions peuvent être d'ordre (Audinos et Isoard, 1986). [4]

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

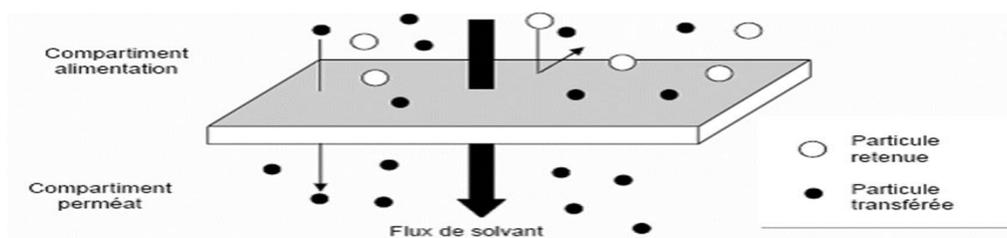


Figure 1.1 : Représentation schématique de la séparation par membrane sélective (Adapté après Mallevalle et al 1996). [4]

La filtration sur membrane est un procédé de séparation physique. Cette opération, qui se déroule en phase liquide, a pour objet de purifier, concentrer ou fractionner des espèces dissoutes ou en suspension dans un solvant par passage au travers d'une membrane. A l'issue de cette opération, nous obtenons d'une part le retentât, également appelé concentrât, qui est composé des molécules et/ou des particules retenues par la membrane, et d'autre part le perméat. [5]

I.5.2. Différents procédés de séparation membranaire

Il existe quatre principaux procédés membranaires à gradient de pression, la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nano-filtration (NF) et l'osmose inverse (OI) (figure I.2). Ces procédés se distinguent par la taille moyenne des pores de membranes mises en œuvre mais aussi par les gammes de pression transmembranaire utilisées pour réaliser la séparation. [6]

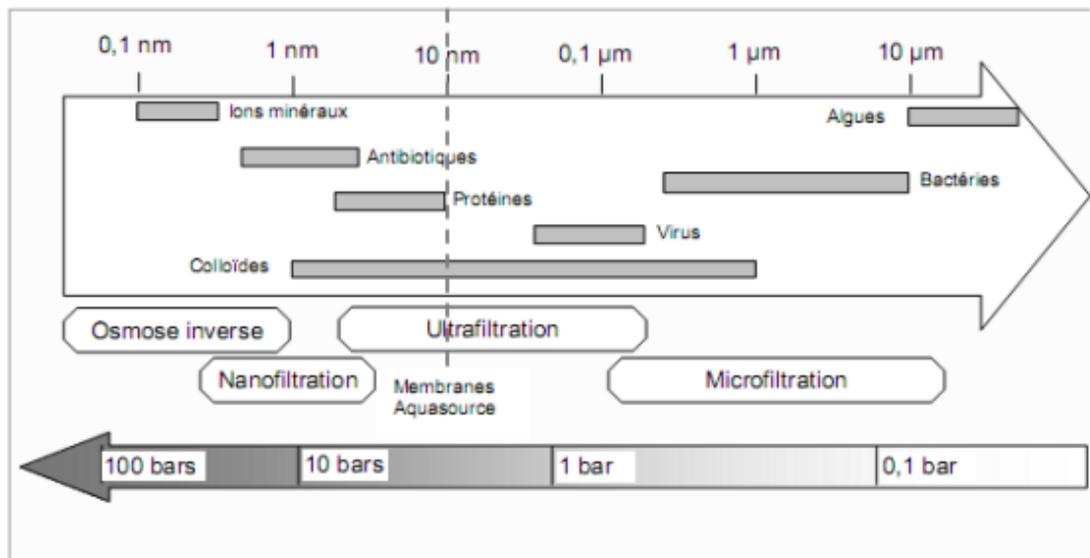


Figure 1.2 : Rétention des différents types de solutés selon le procédé membranaire-pression d'utilisation. [3]

I.5.2.1. L'ultrafiltration (UF)

L'ultrafiltration utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes) (MAUREL Alain – 1993). Pour cette raison, cette technique est utilisée pour l'élimination de macrosolutés présents dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel (électronique) ou médical.

I.5.2.2. La nano filtration

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10 Å) d'où son nom. Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane. Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus (MAUREL Alain – 1993).

I.5.2.3. L'osmose et osmose inverse (OI)

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Le phénomène d'osmose est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires.

L'osmose inverse, Aussi appelée OI, utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau et arrêtent tous les sels. Cette technique est utilisée pour :

- ✚ Le dessalement des eaux de mer.
- ✚ Le dessalement des eaux saumâtres.
- ✚ La production d'eau ultra pure.
- ✚ La production d'eau de procès.

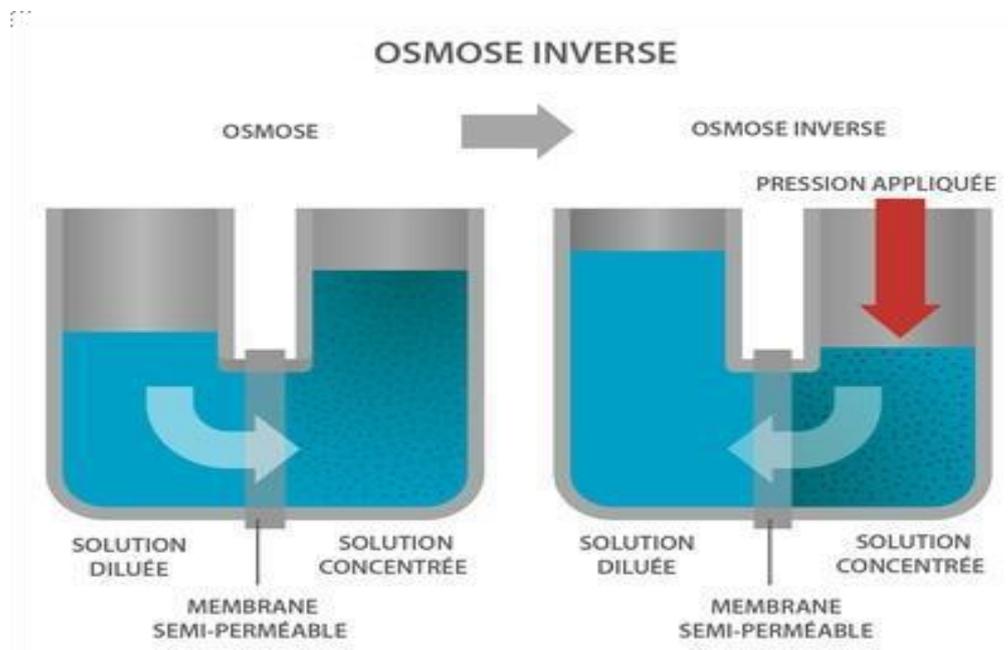


Figure I.3 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse.

I.5.2.4. Microfiltration

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10 μm . Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexassions, précipitation ou floculation.

I.5.3. Comparaison entre osmose inverse et Ultrafiltration

I.5.3.1. Les similitudes entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse

OI et UF sont des technologies de filtration membranaire dans lesquelles ;

Les deux sont des techniques de purification de l'eau basées sur la séparation / filtration physique.

Les deux utilisent des membranes dans la procédure de filtration.

Les deux configurations du système sont préparées dans une fibre creuse revêtue de la membrane.

Dans les deux procédures, les particules, y compris les substances organiques et inorganiques, les ions, les microbes et les petites particules de poussières ou de germes sont filtrés et retenus.

Les membranes utilisées dans les deux techniques sont en cellulose ou en carbone synthétique.

I.5.3.2. Prétraitement d'OI et UF :

Le prétraitement des flux de processus pour éliminer ces particules problématiques peut également réduire la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir une pression adéquate dans un système UF/OI. [6]

I.5.3.3. Différence entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse

Tableau I.1 : Différence entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse.

Ultrafiltration vs osmose inverse	
L'ultrafiltration est le processus par lequel l'eau est filtrée à travers un filtre à membrane pour séparer les molécules présentes dans l'échantillon d'eau.	L'osmose inverse est le processus par lequel l'eau passe à travers une membrane semi-perméable contre le gradient de concentration, ce qui est facilité par une pression élevée.
Poids moléculaire des particules séparées	
103 -106 Da	> 300 Da
Avantages	
Il n'utilise pas de produits chimiques pour purifier. Il est basé sur le processus simple de séparation des tailles. Il peut être utilisé pour éliminer les particules et les microorganismes. Il peut être automatisé.	Rentabilité. Peut filtrer presque toutes les particules, y compris les ions et les métaux lourds. Peut être utilisé pour éliminer les particules radioactives des échantillons d'eau. L'utilisation de produits chimiques est minimisée.

I.5.4. Configurations des membranes :

Il existe plusieurs types de configuration c'est-à-dire plusieurs géométries et de manières dont la membrane est montée et orientée par rapport à l'écoulement de l'eau. Cette configuration est cruciale pour déterminer la performance globale du processus. Les modules membranaires couramment utilisés sont : le module plan, le module tubulaire, le module spiralé et le module à fibres creuses. [7]

I.5.4.1. Module à fibre creuse :

Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

- Configuration Int-Ext (schéma a) : l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres ; il y a écoulement tangentiel canalisé entre les fibres.
- Configuration Ext-Int (schéma b et c) : l'eau à traiter circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres ; l'écoulement entre les fibres est libre.

L'écoulement à l'intérieur de ces fibres devrait être laminaire. Pour ces membranes, les risques d'obstruction sont très élevés et elles ne peuvent être utilisées que pour le traitement d'une eau avec peu de solides en suspension.

Les fibres creuses supportent les rétro lavages. Il est à noter que les modules le plus utilisés dans le domaine du traitement de l'eau au sens large sont les modules à fibres creuses (UF et MF) ainsi que les modules spirales (NF et OI). [7]

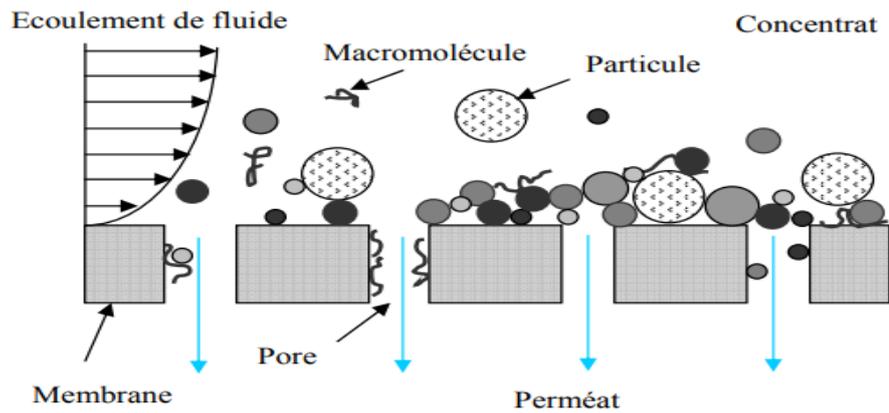


Figure 1.5 : Accumulation des différentes matières sur, dans et au voisinage de la membrane lors d'un écoulement tangentiel. [12]

I.5.5.1. Méthode de nettoyage des membranes

Il y a différentes méthodes pour nettoyer les membranes, tels qu'un rinçage "vers l'avant", un rinçage "vers l'arrière" et un rinçage à l'air. · Lorsqu'un rinçage "vers l'avant" (forward flush) est effectué, les membranes sont rincées avec l'eau d'alimentation ou le perméat, l'eau circulant dans le même sens que lors de la filtration. On utilise un débit plus rapide que lors de la phase de production, il y a de ce fait des turbulences et les particules qui sont absorbées sur les membranes sont libérées et rejetés. Les particules qui sont absorbées dans les pores de la membrane ne sont pas éliminées, seul un rinçage "vers l'arrière" permet de les éliminer. · Un rinçage "vers l'arrière" (backward flush) s'effectue dans le sens inverse du procédé de filtration. Le perméat est envoyé sous pression du côté de l'alimentation du système, on utilise un débit deux fois supérieur à celui utilisé lors de la filtration. Si ce rinçage ne suffit pas il faut alors effectuer un nettoyage avec des produits chimiques. · Lors d'un procédé de nettoyage chimique, les membranes sont trempées dans une solution d'eau de javel, de peroxyde d'hydrogène ou d'acide chlorhydrique. Les membranes trempent d'abord dans la solution pendant quelques minutes et ensuite on effectue un rinçage (vers l'avant ou vers l'arrière) ce qui permet de rincer les contaminants. · Une nouvelle méthode de nettoyage est le rinçage à l'air (= rinçage air/eau) (air flush). Il s'agit d'un rinçage "vers l'avant" durant lequel de l'air est injecté dans le tuyau. Le fait d'utiliser de l'air (alors que la vitesse de l'eau reste la même) crée un système de nettoyage beaucoup plus turbulent.

I.5.5.2. Procédure de nettoyage des membranes d'osmose inverse :

Instructions générales pour le nettoyage :

Le nettoyage se déroule en deux étapes :

1°/ - un réactif alcalin et complexant associé à un mouillant et des dispersants pour extraire les biofilms et les matières organiques.

2°/ - une solution d'acides organique et inorganique ainsi que des dispersants nécessaires au nettoyage des dépôts de fer et des dépôts inorganiques.

Procédure :

Remplir le réservoir de nettoyage avec la quantité nécessaire d'eau osmosée ou adoucie et faire fonctionner l'agitateur et la pompe de recirculation du réservoir, vérifier l'absence de fuite. Vérifier la température de solution Cette solution de nettoyage peut idéalement être chauffée à 35° C pour une meilleure efficacité. Si la température de solution est inférieure au niveau recommandé, ajuster en chauffant pour atteindre la température optimale. Au début de ce nettoyage il est recommandé de mettre à l'égout sans recirculation environ 20% de la solution initialement préparée. A la fin, évacuer cette solution de nettoyage et rincer très correctement jusqu'à eau claire avec de l'eau osmoses ou adoucie filtrée et sans chlore libre. Faire circuler la solution pendant une quinzaine de minutes puis arrêter la pompe de circulation pendant la même durée. Si au cours du nettoyage le pH remonte au-dessus de 3 rajouter du Proteclean RO LP15 mais sans dépasser une concentration de 20%, au-delà renouveler le bain, quand le pH reste stable entre 2 et 3 le nettoyage peut être considéré comme terminé.

À la fin évacuer cette solution de nettoyage et rincer très correctement avec de l'eau.

N.B. : Il est important de consulter la documentation du fournisseur des membranes pour vérifier la compatibilité vis-à-vis du pH, du débit et de la pression.

Bien rincer les membranes avec une eau de bonne qualité, exempte de chlore libre (eau osmosée ou eau adoucie filtrée) entre chaque étape du nettoyage et avant de remettre l'unité en service : vérifier pour cela le pH qui devra être voisin du pH de l'eau de rinçage (± 0.5 unité pH). [13].

I.6. Conclusion

Dans ce premier chapitre ont été posées les bases théoriques de notre travail. Après un rappel de différentes généralités concernant les procédés de séparation membranaire, certains concepts fondamentaux, Les propriétés particulières de la ultrafiltration et L'osmose inverse ont également été exposées, Nous avons vu que la ultrafiltration a la particularité de présenter une sélectivité gouvernée à la fois par des effets de taille et de charge, mais OI est le plus fines de tous les systèmes de filtration membranaire donc OI éliminant plus des particules.

CHAPITRE II : PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU ULTRA PURE

II.1. Introduction

L'hydrogène est actuellement utilisé en raison de ses propriétés chimiques dans l'industrie pétrolière et dans l'industrie chimique. Cette molécule présente cependant un intérêt énergétique majeur qui n'est pas exploité aujourd'hui. Il peut être utilisé pour la production d'énergie sur le réseau, ou dans les transports, et c'est une solution pour le stockage de l'énergie, notamment de l'électricité, ce qui sera le défi des systèmes énergétiques du 21^e siècle. L'hydrogène comme vecteur énergétique représente ainsi un enjeu scientifique, environnemental et économique. Grâce aux progrès de la technologie de l'électrolyse, il peut être produit de façon décarbonée, économique et contribuer aux objectifs qui est fixée en matière de développement des énergies renouvelables, réduction des émissions de gaz à effet de serre et des polluants et de réduction des consommations d'énergie fossile.

Dans ce deuxième chapitre en va présenter d'une manière introductive un outil de production d'hydrogène avec de l'énergie électrique un outil très importants qui se dit l'électrolyseur, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ultra pure est utilisée lorsque l'on désire obtenir de l'hydrogène extrêmement pur.

Pour cela en utilise un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (Electrolyseur PEM « Proton Exchange Membrane ») à savoir leur principe de fonctionnement et les différents composants de cellule.

II.2 Eau ultra pure

Une définition théorique de l'eau ultra pure pourrait être celle d'une « eau » ne contenant que des molécules H₂O, en équilibre avec des ions H⁺ et OH⁻. Dans la pratique, on appelle généralement « eau ultra pure », une eau contenant moins de 1 µg/kg (ppb) d'impuretés ioniques ainsi qu'un très faible taux de particules et contaminants microbiens (Sadler, 1993). En fait, la notion d'eau « ultra pure » est relative, chaque industrie a en effet ses normes qui évoluent en permanence.

De ce fait, la conductivité de l'eau ultra-pure est d'environ 0,054 mS/cm à 25°C, équivalente à une résistivité de 18,3. [14]

II.3. Les techniques de production d'eau ultra pure

Pendant les dernières années, les recherches se sont centrées sur le développement de technologies de traitement de l'eau qui n'utilisent pratiquement pas de produits chimiques, afin

d'éviter des rejets avec des charges polluantes élevées. De nombreux procédés industriels ont besoin d'eau d'une très grande qualité (eau ultra pure).

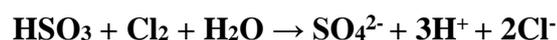
Actuellement on utilise deux systèmes qui se complètent. Ce sont l'osmose inverse (RO) et l'électrodéionisation (EDI), pour obtenir de l'eau d'une grande qualité, en éliminant pratiquement la totalité des réactifs chimiques employés dans les procédés d'échange ionique.

II.3.1.L'installation de l'osmose inverse :

Un système d'osmose inverse d'inverser Double Pass (DPRO) est lorsque l'eau de perméat est introduite dans une deuxième unité de RO pour produire une eau plus pure. Deux ou double stade RO est lorsque le flux concentré ou de rejet est dirigé vers un deuxième système RO pour récupérer l'eau, respectivement. Les systèmes d'osmose inverse sont conçus pour purifier l'eau en rejetant environ 99 % du Total des solides dissous de l'eau d'alimentation.

a-Déchloration

C'est une étape très importante, elle est utilisée pour éliminer le chlore libre résiduel afin d'éviter l'oxydation des membranes. Parmi les produits les plus utilisés pour la déchloration d'une eau, le dioxyde de soufre, le charbon actif et le bisulfite de sodium. Actuellement, plusieurs stations utilisent la déchloration par le bisulfite de sodium pour protéger les membranes d'osmose inverse en polyamide et fibre creuse. La réaction de neutralisation du chlore par le bisulfite de sodium est la suivante :



b- Produits antiscalin (Séquestrant)

L'ajout d'un séquestrant est très utilisé comme étant une étape de prétraitement des eaux très dures ; précédant le système d'osmose inverse, il est conçu pour éviter la formation de dépôts au voisinage de la membrane afin de minimiser les risques de colmatage. Ce prétraitement dépend du type ou de la combinaison des séquestrant ainsi que de la température, il peut être efficace pour contrôler la précipitation du Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , SO_4^{2+} , PO_4^{3-} et F^- .

Les produits antiscalins sont des substances chimiques inhibiteurs de dépôts à l'entrée du système d'osmose inverse, et ce en évitant la formation des cristaux. Durant les deux dernières décennies, de nouveaux séquestrant sont apparus, dans lesquels les substances actives sont des mélanges de polycarboxylates et de polyacrylates, tels que les acides, les polymaleiques et les polyacryliques.

Shammiri et al ont indiqué que l'antiscalin ne permet pas d'inhiber la formation de dépôts mais il retarde leur formation jusqu'à la saumure où il affecte la solubilité du dépôt.

Plusieurs auteurs ont expliqué le mécanisme d'action des produits antitartres. En effet,

Gloede et al, ont rapporté que les composés antitartre (anticalcaire) sont des substances à surface active qui interfèrent avec les réactions de précipitation de trois manières différentes telles que :

- ❖ L'inhibition de seuil : c'est la capacité d'un anticalcaire à garder des solutions super saturées de sels.
- ❖ La modification du cristal : c'est la propriété d'un anticalcaire à changer la configuration du cristal, résultant en un calcaire doux et non-adhérent.
- ❖ La dispersion : c'est la capacité de certains anticalcaires à adsorber sur des cristaux ou des particules colloïdales et à donner une charge fortement anionique, ce qui tend à séparer les cristaux.

Le choix du produit anticalcaire et son dosage sont donc basés sur la nature des minéraux.

En effet, il est important de trouver le traitement adéquat en identifiant l'anticalcaire adapté pour l'utilisation et la dose nécessaire à ajouter.

c- Préfiltre :

Dans un osmoseur classique, on trouve trois filtres et une membrane. Le préfiltre et le filtre antisédiments s'occupent des particules solides présentes dans l'eau brute (sable, rouille, etc.). Le filtre à charbon retient tout ce qui participe à la mauvaise odeur ou désagréable goût de l'eau, en raison des produits chimiques tels que le chlore ou encore les pesticides. Enfin, la membrane filtre tout le reste, nitrates, calcaire et autres bactéries et virus, pour ne laisser passer que les molécules d'H₂O.

d- Pompe :

L'osmose inverse fonctionne par utilisant une technologie de filtration avancée qui élimine les ions dissous de l'eau. L'osmose est une force élémentaire qui attire l'eau vers une eau à plus forte teneur en sel. Il s'agit d'un processus par lequel les ions dissous sont éliminés de l'eau. Cette force élémentaire peut être surmontée par une pression appliquée avec

l'utilisation de pompes et de membranes semi-perméables, qui forcent l'eau à travers la membrane et filtrent le sel dissous de l'eau.

II.3.1.1. Différents montages de l'osmose inverse

a- Système di- étages en série production

Un système membranaire di- étagé en série production, est formé par un ensemble de trains dont la production de chaque étage alimente le train suivant et ainsi de suite, de sorte que l'alimentation de chaque train a des caractéristiques identiques aux celles du perméat du train précédent. Les concentrâts de l'ensemble de trains sont collectés pour donner à la fin, le concentrât total du système, qui sera relié à un système de récupération de l'énergie. Le perméat du système est celui du dernier train. A chaque augmentation du nombre d'étages, la qualité s'améliore, la concentration diminue et le taux d'élimination s'élève considérablement.

Ce type de système est utilisé pour le dessalement des eaux de mer, où bien lorsqu'une qualité élevée est exigée.

b- Système di- étages hybrides rejet- production :

Les systèmes hybrides se montent en série rejet et en série production en même temps. D'une manière globale : monter un train (ensemble de modules en parallèle) en rejet d'un train précédent, vise à améliorer le rendement quantitatif (conversion), tandis que son montage en production vise à améliorer le rendement qualitatif (taux de rejet).

Il existe une multitude de solutions pour ce type de systèmes, dont les objectifs à atteindre et l'outil efficace d'optimisation sont les seules capables de la concevoir d'une manière adéquate.

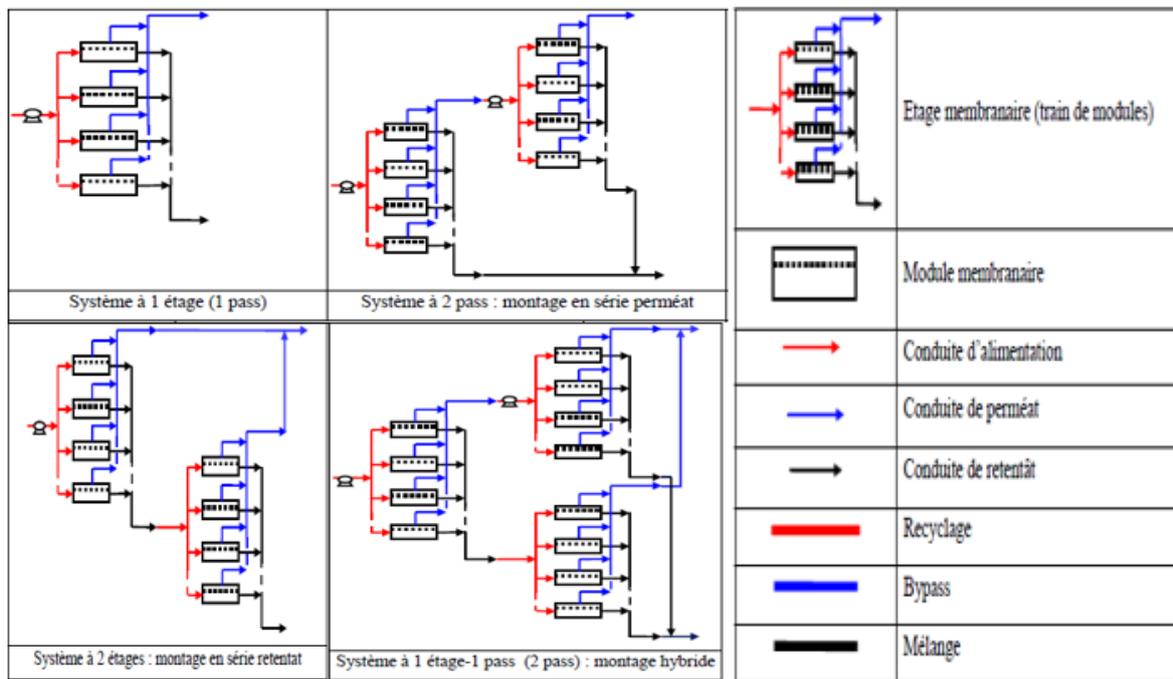


Figure II.1 : les différents montages en série et en hybride

II.3.2. Obtention d'eau ultra pure par électrodéionisation

L'électrodéionisation (EDI ou CEDI) est une technologie qui combine deux techniques de purification de l'eau : l'électrodialyse et l'échange ionique. Bien que l'électrodéionisation ait déjà été décrite par Kollman en 1957, ce n'est qu'en 1987 qu'elle est introduite dans les procédés de production d'eau d'une grande pureté pour l'industrie pharmaceutique, microélectronique et la production d'énergie dans les chaudières à haute pression.

II.3.2.1. Description de procédé :

Un équipement d'EDI consiste essentiellement en une chambre contenant une résine cationique forte et une anionique forte d'échange ionique, empaquetées dans un espace (cellule) entre une membrane d'échange cationique et une membrane d'échange anionique ; de sorte que seul les ions puissent passer à travers les membranes.

L'eau d'entrée passe à travers le mélange de résines d'échange ionique et en même temps, une source externe de courant l'alimente en courant continu à travers des électrodes (cathode et anode).

Le voltage du courant continu crée une circulation à travers la résine qui entraîne les cations vers la cathode et les anions vers l'anode. Sur la route des ions vers la membrane, ceux-ci peuvent passer dans des chambres du concentré, mais ils ne peuvent plus

s'approcher de l'électrode. Ils sont bloqués par la membrane contiguë, qui contient une résine avec la même charge fixe.

D'autre part, les membranes d'échange ionique éliminent électriquement les ions de l'eau d'entrée et les font passer vers le concentré qui sort des deux membranes d'échange ionique, en produisant ainsi de l'eau déionisée de grande qualité. [15]

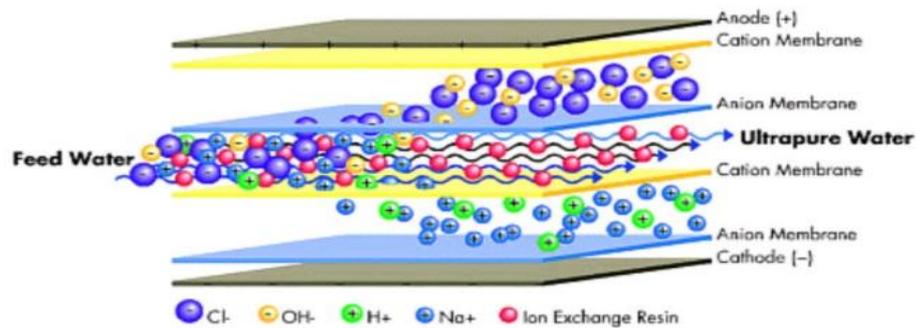


Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'électrodéionisation. [15]

II.3.2.2. Consommation énergétique

Le coût de fonctionnement d'un système d'EDI est fondé sur la puissance électrique fournie au système. Cependant, il faut presque toujours envisager que la plus grande partie du coût total du fonctionnement correspond à la puissance électrique consommée par l'équipement d'OI employé pour le prétraitement. Le coût moyen de l'énergie électrique consommée par l'EDI est d'environ 0,3 kW/m³ d'eau traitée. [15]

II.3.2.3. Prétraitement d'EDI avec deux passages d'osmose inverse

Comme indiqué dans la figure (II.3) en annexe, le procédé exige une ligne de traitement qui commence par une ultra filtration, en protection des membranes d'osmose inverse. Le rejet du premier passage est rejeté (il peut être desséché à travers un évaporateur à vide, si l'on souhaite obtenir zéro rejet). Le perméat est conduit au deuxième passage de l'osmose, après réajustement du pH à travers du NaOH. Ainsi, le CO₂ libre réagit avec le NaOH et forme du Na₂CO₃, et le perméat qui découle du deuxième passage alimente l'EDI.

À la fois le rejet du deuxième passage et celui de l'EDI, auront une salinité sensiblement inférieure à celle de l'eau brute. C'est pourquoi ils sont recyclés en tête de l'installation, en obtenant ainsi un rendement global de l'eau d'apport de l'ordre de 77%.

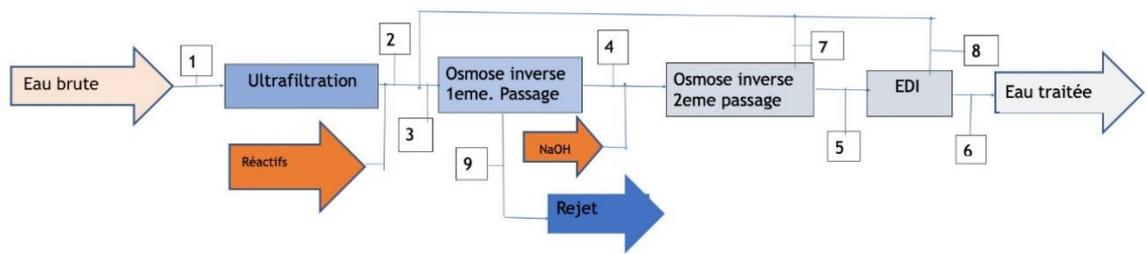


Figure II.3 : Procédé de prétraitement d'EDI avec deux passages d'RO. [15]

II.4. Procède de production d'hydrogène

Actuellement, la production d'hydrogène par les procédés maîtrisés est réalisée à 95% en utilisant des ressources fossiles (figure II.4), en particulier par vaporeformage du gaz naturel «48%». Le vaporeformage du gaz naturel consiste à faire réagir l'hydrocarbure avec de la vapeur d'eau dans une gamme de température comprise entre 973 K et 1373 K. Cette réaction a lieu en deux étapes qui produisent finalement de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. La moyenne des seules émissions de dioxyde de carbone liées à la consommation de méthane par ce procédé est de 9 kg d'hydrogène. La production d'hydrogène à partir d'autres ressources fossiles « hydrocarbures 30% et charbon 18% » est réalisée principalement par le procédé d'oxydation partielle. Le composé carboné réagit avec de l'oxygène et de la vapeur d'eau pour réaliser une combustion incomplète, produisant du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et de l'hydrogène. Les émissions de CO_2 de ce type de procédés contribuent fortement à l'augmentation de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère. [16]

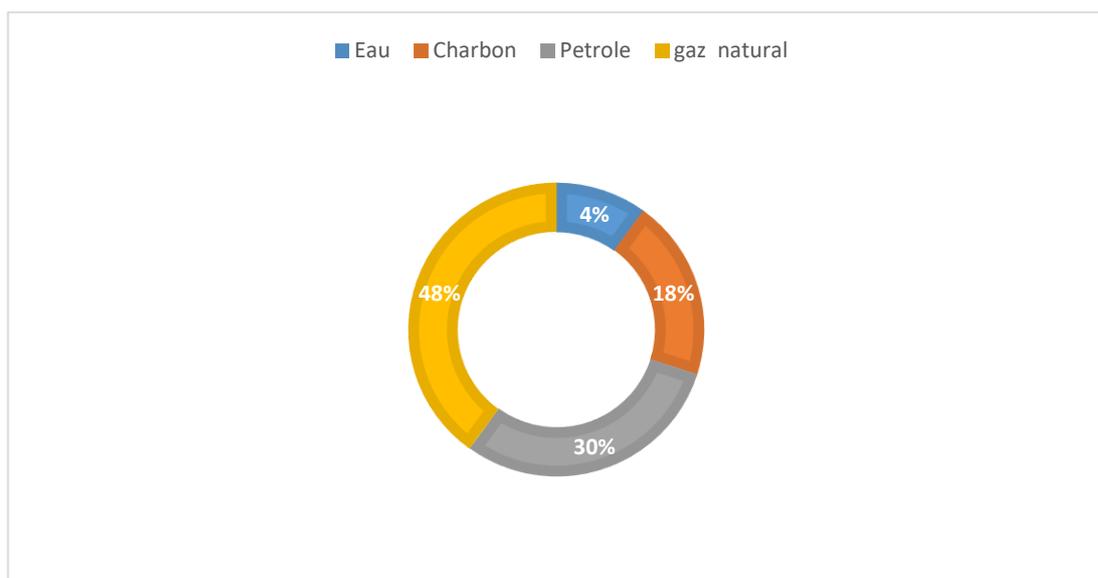


Figure II.4 : Répartition des modes de production d'hydrogène actuels. [16]

Les différentes méthodes de synthèse de l'hydrogène vont fortement dépendre de sa source et sont décrits ci-dessous :

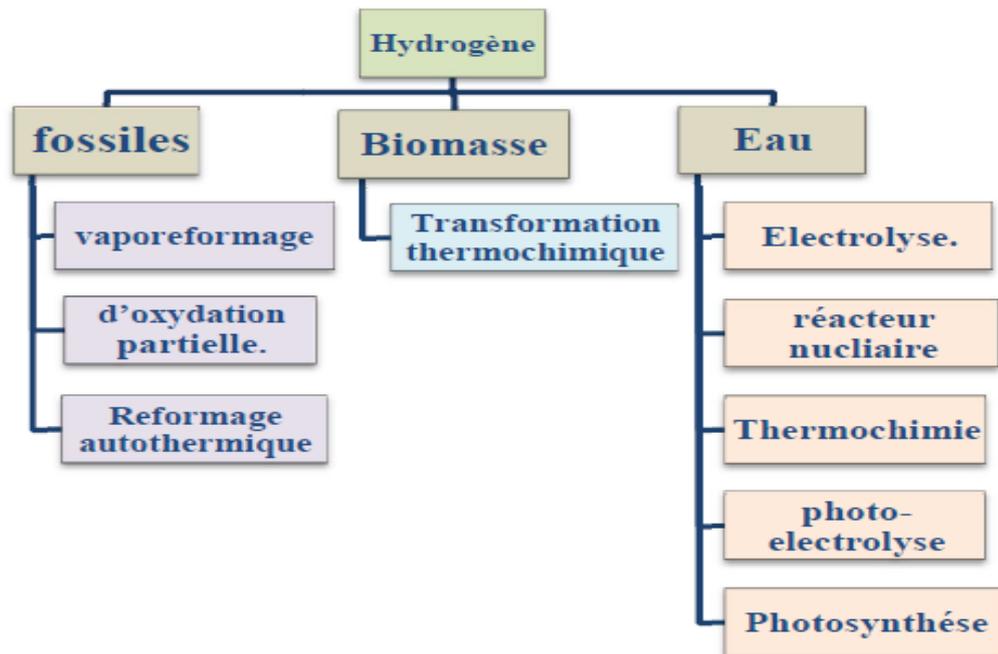


Figure II.5 : Procède de production d'hydrogène. [17]

II.4.1. Etat de l'art sur les technologies des électrolyseurs d'eau

Il existe trois technologies d'électrolyseur d'eau. Chacune d'elle dépend de la nature de l'électrolyte utilisé.

- Les électrolyseurs alcalins qui utilisent un électrolyte liquide, généralement une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH).
- Les électrolyseurs à oxyde solide (SOE : Solid Oxide Electrolyser) utilisent un électrolyte en céramique.
- Les électrolyseurs PEM (Proton exchange membrane) qui utilisent un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de proton (typiquement du Nafion).

Le Tableau issu de [SMO-2010] donne les deux demi-réactions pour chaque électrode et les porteurs de charges pour les différents types d'électrolyseurs.

Tableau II.1 : Réaction et porteurs de charge pour différents types d'électrolyseurs d'eau [18]

Technologie	Electrode négative	Porteur de charge	Electrode positive
Electrode alcaline	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	OH^-	$2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Electrolyseur PEM	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	H^+	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Electrolyse haute température	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$	O^{2-}	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$

Dans le Tableau II.2, nous trouvons les principales données techniques de ces trois familles d'électrolyseurs [ASS-2008] [RAB-2008] [PET-2011] [HOL-2009] [GRI-2005].

Tableau II.2 : Données techniques actuelles sur les différentes familles d'électrolyseurs [18]

	Type d'électrolyse		
	Alcaline	PEM	SOE
Température de fonctionnement (°C)	40 - 90	20 - 100	700 - 1000
Pression de fonctionnement (bars)	3 - 30	1 - 400	50
Consommation électrique (kWh/Nm ³ de H ₂)	4 - 5	6	3 - 3.5
Rendement énergétique (%)	70 - 90	80 - 90	80 - 90
Durée de vie (ans)	15 - 20	15 - 20	??
Etat de développement	Commercialisé	Développement	Recherche

Ce dernier tableau montre que l'électrolyse alcaline et PEM se retrouvent dans les mêmes gammes de températures de fonctionnement. Ces deux procédés se retrouvent donc en concurrence. De plus, à ce jour, ce sont les deux seules technologies que nous trouvons sur le marché. Nous allons dans le Tableau II.3 comparer les principales caractéristiques de ces deux technologies [NEW-2008] [ASS-2007] [RAB-2008].

Tableau II.3 : comparaison technologies alcaline et PEM [18]

	Type d'électrolyse	
Caractéristiques	Alcaline	PEM
Electrolyte	Solution aqueuse (principalement KOH)	Membrane polymère solide (Nafion)
Densité de courant (A/cm²)	<0.4A/cm ²	2 A/cm ²
Fiabilité	Utilisation commerciale éprouvée.	Haute fiabilité dans le temps (utilisation spatiale, sous-marins)
Avantages	Actuellement le coût le plus bas avec de bons rendements	Électrolyte solide (pas de pièces mobiles, pas de liquide corrosif) ; fortes densités de courant ; conception compacte ; grande production de gaz sous pression ; peut fonctionner à haut ΔP
Inconvénients	Faible densité de courant ; électrolyte liquide ; maintenance ; auxiliaires souvent nécessaires pour la compression du gaz.	Le coût élevé des membranes polymères et des catalyseurs en métal noble ; processus de fabrication compliqués et coûteux

II.3.2. Electrolyseur de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM)

II.3.2.1. Description générale

PEM est le plus populaire et la plupart des électrolyseurs modernes sont construits selon ce concept. L'électrolyseur PEM est un dispositif électrochimique qui permet de transformer directement l'énergie électrique en énergie chimique hydrogène et oxygène en partant d'un passage électrochimique comme tous les autres électrolyseurs avec des différences dans le concept la composition et le principe de fonctionnement.

Leur électrolyte est une membrane solide permettant la conduction des ions. Donc ces électrolyseurs utilisent le concept bipolaire. Le platine est le catalyseur le plus utilisé pour ces électrolyseurs. Un catalyseur est appliqué de chaque côté de la membrane. Il est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène (faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène), et convertir l'énergie électrique en énergie chimique.

L'électrolyse de l'eau en milieu acide a lieu au sein d'un système électrochimique : la cellule électrochimique. Les différents éléments constituant cette cellule sont présentés sur le Figure (II.6).

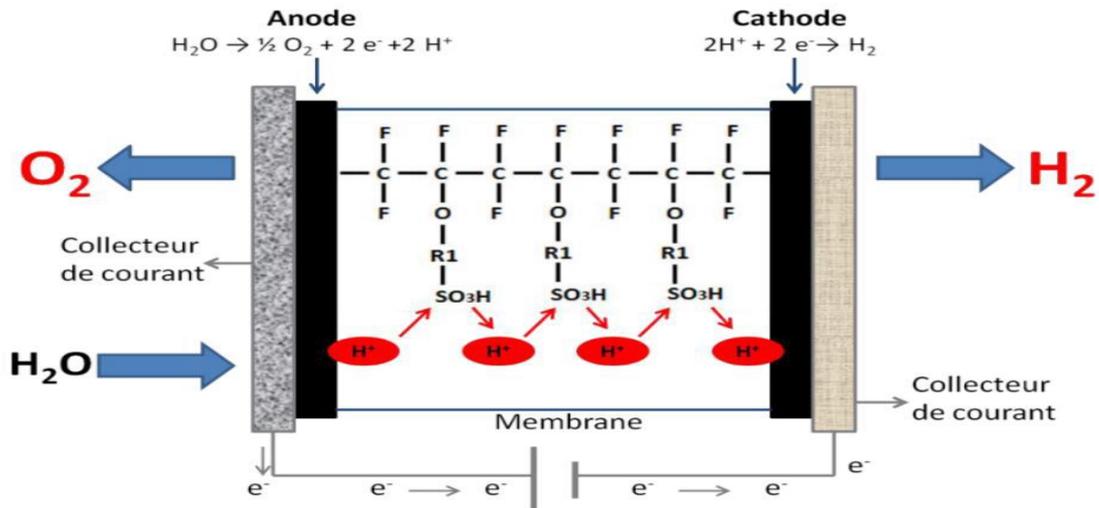


Figure II.6 : Schéma de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse PEM. [19]

Cette cellule est plus communément appelée cellule d'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) mais peut aussi être désignée par le terme de cellule SPE (Solid Polymère Electrolyte).

La cellule est composée de deux électrodes (l'anode et la cathode), d'une membrane et de deux collecteurs de courant. Les différents éléments composant la cellule vont être détaillés après. [19]

a- L'électrolyte

Dans l'électrolyseur de type PEM la membrane polymère permet aux ions H^+ de passer du côté anode de la membrane au côté cathode ; elle sépare également les gaz hydrogène et oxygène. L'hydrogène est produit à l'anode et l'oxygène est produit à la cathode. Le polymère le plus souvent utilisé comme matériau constitutif de la membrane est le Nafion TM de Du Pont. Un catalyseur de platine est appliqué de chaque côté de la membrane afin de faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène. [20]

b- Le catalyseur

Afin de convertir l'énergie électrique en énergie chimique, un catalyseur est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène. Le platine (Pt) est le catalyseur le plus commun pour cette réaction. Un catalyseur meilleur marché qui fonctionnerait aussi bien que le platine serait le bienvenu, cependant celui-ci reste à inventer. Si des catalyseurs moins efficaces sont utilisés sur la cathode, il se produira une plus grande perte de tension. L'efficacité énergétique de l'électrolyse de l'eau se situe entre 50 et 80 %, mais ces valeurs ne prennent en compte que le rendement lors de la conversion d'énergie électrique en énergie chimique. [20]

c- La membrane

La membrane est l'élément le plus nécessaire à toute l'opération d'électrolyse PEM car il est le moyen de la conduction protonique et des opérations électrochimique de l'électrolyseur. Actuellement, la membrane la plus utilisée est la membrane dite Nafion commercialisée et Fabriquée par Du Pont de Nemours. [20]

II.4.2.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM consiste à séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau par rapport d'énergie électrique, à des températures relativement basses, typiquement inférieure à 100°C.

Dans une cellule d'électrolyse de l'eau, le courant électrique est utilisé pour effectuer la dissociation de l'eau en ses constituants élémentaires que sont l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂) moléculaires. En milieu acide, cette réaction se décompose en deux demi-réactions :

Anode :



Cathode :



La demi-réaction (II.1) se produit à l'anode et la demi-réaction (II.2) se produit à la cathode. En milieu acide, les protons solvates sont transférés de l'anode à la cathode par migration à travers l'électrolyte (membrane polymère) sous l'effet du champ électrique.

De manière générale, l'électrolyse de l'eau permet la production de gaz d'une grande pureté, en comparaison avec d'autres procédés tels que le reformage d'hydrocarbures pour la production d'hydrogène, bien que l'électrolyse soit actuellement plus coûteuse. Elle est représentée dans la Figure (II.7). [21]

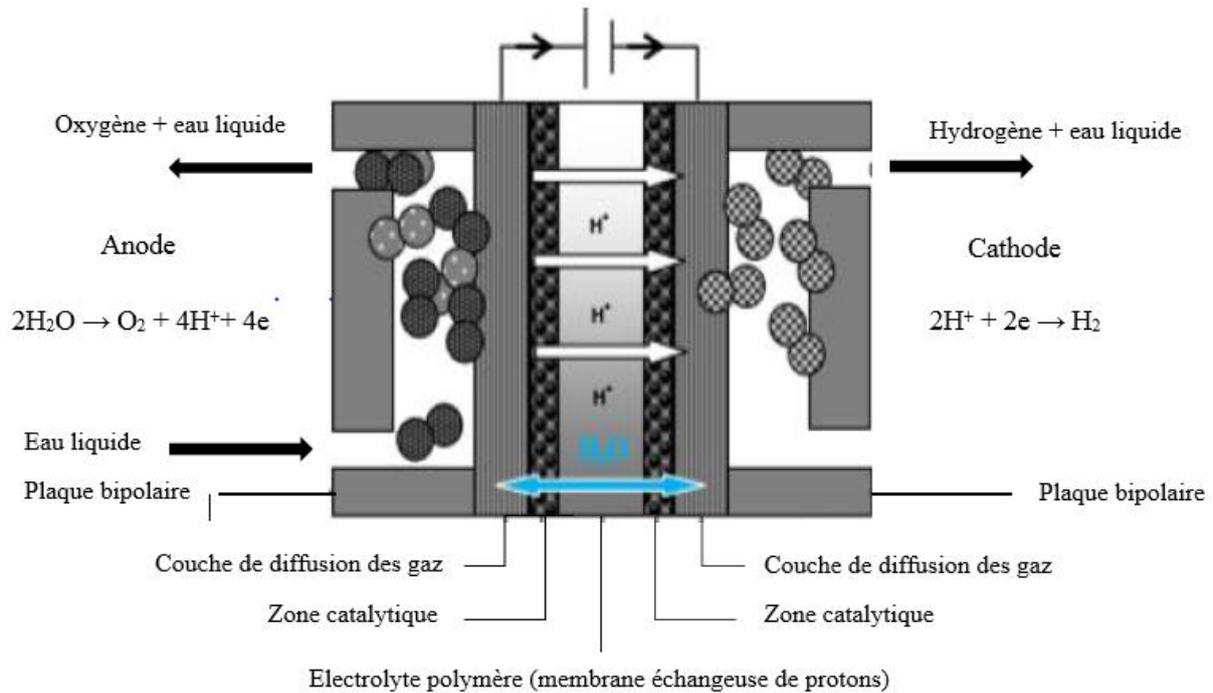


Figure II.7 : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur d'eau de type PEM. [21]

II.4.2.3. Rôles et propriétés des différents composants d'électrolyseur PEM

a- La membrane Nafion (Du Pont de Nemours Co)

La membrane Nafion est actuellement le matériau polymère commercial possédant ces caractéristiques, ce qui fait de lui le matériau le plus utilisé dans les cellules d'électrolyse PEM. La formule chimique du monomère est détaillée (Figure II.8), sa température de transition vitreuse est de 117 °C, ce qui s'avère être une limitation pour l'utilisation de ce matériau à haute température. La conduction protonique de ce matériau provient de la présence des groupements sulfonés SO_3H lorsqu'il est hydraté. Ce type de matériau membranaire est très coûteux : c'est pourquoi de nombreuses recherches sont réalisées afin de créer de nouveaux matériaux polymères moins onéreux ayant des températures d'utilisation plus élevées pour remplacer le Nafion. [19]

La membrane joue le rôle d'un conducteur protonique puisque la migration des ions H^+ est assurée par la transformation des groupements sulfoniques en ions SO_3^- . Elle nécessite d'être constamment humidifiée sous peine de voir sa conductivité diminuer. [20]

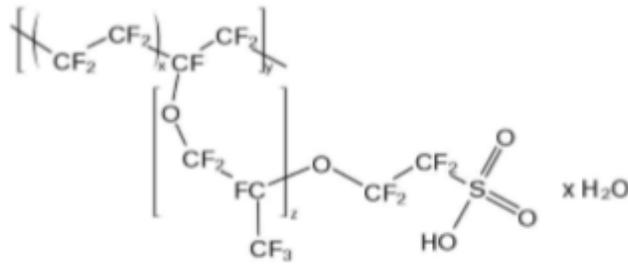


Figure II.8: Formule chimique du Nafion.

b- Assemblage membrane électrodes (AME)

L'assemblage membrane électrodes (AME) est le cœur de la cellule d'électrolyse de l'eau. En son centre est située la membrane qui sert d'électrolyte conducteur de protons mais aussi de séparateur physique entre l'anode et la cathode. Pour la confection d'un AME, les matériaux d'électrodes préalablement choisis sont déposés sur la membrane. De nombreuses contraintes doivent être prises en compte lors de cette confection. Les matériaux catalytiques doivent permettre l'évacuation des gaz formés. Les électrodes doivent donc être poreuses tout en gardant une conductivité électronique suffisante afin de permettre les transferts électroniques. Chaque électrode est directement connectée à un collecteur de courant. Ils permettent le transport électronique entre les matériaux composant l'électrode et l'extérieur de la cellule PEM. En générale, des supports en titane poreux (TiO_2) sont utilisés à l'anode alors que des couches de carbone (gaz diffusion layer (GDL)) servent à la cathode. Lors du fonctionnement de la cellule, trois réactions de transport/transfert ont lieu simultanément :

- ✓ Le transfert électronique.
- ✓ Le transport du réactif (H_2O) jusqu'aux sites catalytiques.
- ✓ Le transport des gaz formés.

Pour optimiser ces différents phénomènes de transport/transfert électronique et fluide, la structuration géométrique de l'AME (chemins de percolation, et porosité) et la connexion physique des électrodes aux collecteurs de courants doivent être optimales. Des monomères de Nafion sont souvent ajoutés dans la composition des matériaux d'électrodes pour favoriser les chemins de percolation et conférer une meilleure tenue mécanique aux interfaces électrodes/membrane et électrodes/collecteurs de courant. [19]

c- Les électrodes

Les électrodes sont chacune le siège d'une réaction électrochimique. A l'anode a lieu l'oxydation de l'eau, et à la cathode la réduction de l'eau. Du fait que les réactions qui ont lieu ne soient pas les mêmes, les matériaux composant les électrodes seront différents. Toutefois, les deux électrodes seront composées d'un matériau électro catalytique. Le choix des électro catalyseurs dépend de nombreux paramètres tels que :

- ✓ Leurs activités électro catalytiques vis-à-vis des réactions concernées.
- ✓ La sélectivité pour une réaction donnée.
- ✓ La stabilité chimique vis-à-vis du milieu électrolytique.
- ✓ La stabilité électrochimique vis-à-vis du potentiel de fonctionnement de la cellule.
- ✓ Le coût d'élaboration et de mise en forme dans la cellule.
- ✓ La conductivité électronique.
- ✓ La stabilité mécanique.
- ✓ La morphologie (taille des cristaux, cristallinité, réseaux...). [19]

De nombreuses études ont été réalisées afin de corrélérer les propriétés physiques et chimiques des électro catalyseurs avec leurs propriétés catalytiques. Les études portant sur les matériaux anodiques seront plus amplement détaillées par la suite puisque ceux-ci constituent le cœur du travail présenté dans ce manuscrit. [19]

II.4.2.4. Avantages de l'électrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM a plusieurs d'avantages comme :

✓ Ils sont plus propres pour l'environnement notamment pour ce qui est de l'électrolyte pour les électrolyseurs alcalins.

En effet, ces derniers utilisent l'hydroxyde de potassium comme électrolyte qui est corrosif, irritant et sa préparation dégage des vapeurs toxiques de chlore et d'hydrogène.

✓ Les densités de courant sont plus élevées, leur permettant d'avoir des masses et volumes inférieurs à production de gaz équivalente

✓ Excellent rendements. [22]

II.4.2.5. Inconvénients de l'électrolyseur PEM

L'électrolyseur possède des inconvénients comme :

- ✓ Le coût élevé des membranes polymères.
- ✓ Des catalyseurs en métal noble.
- ✓ Processus de fabrication compliqués et coûteux.
- ✓ Le coût élevé des catalyseurs.
- ✓ Stock inférieur au MW. [23]

II.4.2.6. Applications de l'électrolyseur PEM

Les applications des électrolyseurs PEM sont principalement la génération d'hydrogène sur des sites de stockage alimentant des piles à combustible. Ces systèmes peuvent alors servir d'énergie de secours pour des stations de télécommunications, des sites isolés (projet Myrte en Corse, Areva), ou pour des stations-service hydrogène alimentant de petites flottes de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible (ISE, Freiburg, Allemagne).

Certains acteurs tels que CETH2 (Paris, France) sont principalement axés sur la production d'hydrogène ultra pur pour des applications médicales ou de recherche en laboratoire. [20]

II.5. Nouvelles applications d'Hydrogène

II.5.1. Synthèse chimique

L'hydrogène est une matière de base pour l'industrie chimique. Il est souvent utilisé dans la synthèse d'ammoniac (NH_3), les amines, le méthanol, l'eau oxygénée, la fabrication d'engrais, l'hydrogénation des acides gras (graisses alimentaires, savons, etc.). (Association Française de l'Hydrogène et les Piles à combustible). (Rousseau 2013)

II.5.2. Carburant

II.5.2.1. Combustion dans un moteur

L'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie pour le transport est en cours de développement. Il est possible de l'utiliser dans un moteur à combustion bien qu'il faut modifier la conception et la taille de ce dernier à recevoir un carburant gazeux (Association Française de l'hydrogène). L'hydrogène liquide est également utilisé dans l'aérospatiale dans les fusées avec sa combustion par l'oxygène. Dans le moteur Vulcain de la fusée Ariane V. (Collier Jr, Hoekstra et al. 1997)

II.5.2.2. Pile à combustible

L'hydrogène est converti en électricité grâce aux piles à combustible. Dans ce système, deux électrodes sont émergées dans un électrolyte et compartimenté par une membrane échangeuse d'ions. L'anode et la cathode sont respectivement alimentées par de l'hydrogène et de l'oxygène pour assurer séparément l'oxydation de l'hydrogène et la réduction de l'oxygène (Figure 1). La pile à combustible fournit de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Ces piles à hydrogène sont en cours d'amélioration chez les fabricants automobiles (Pile à combustible à membrane échangeuse d'ions – PEMFC). Malgré le manque de stations de réapprovisionnement en 8 hydrogène, certains modèles sont déjà proposés à la vente aux particuliers (Mercedes classe B F-Cell, Honda FCX Clarity, etc.) (Association française d'hydrogène).

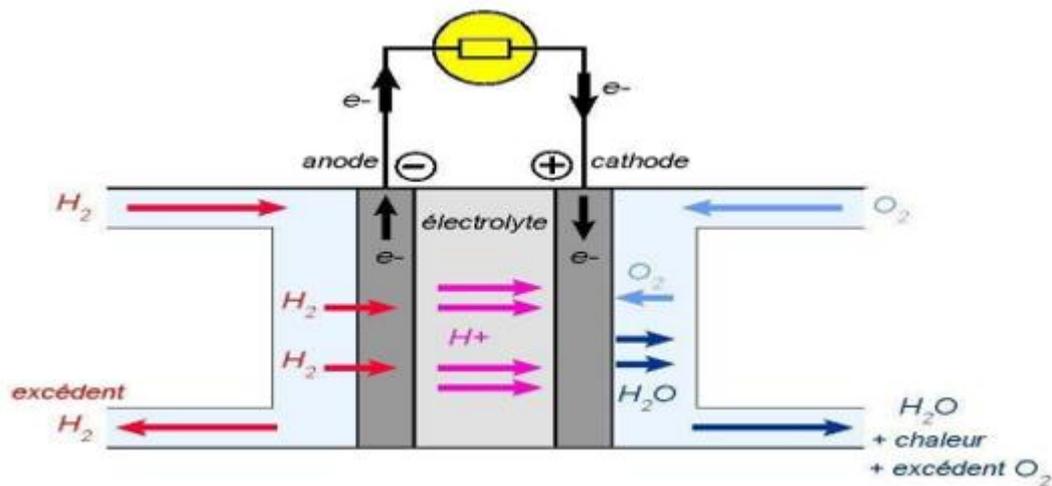


Figure II.9 : Mécanisme de fonctionnement d'une pile à combustible

CHAPITRE III : METHODOLOGIE

III.1.Introduction

Le travail consiste à effectuer une série de simulations systématique de traitement d'eau de mer ainsi qu'une eau issue des rejets clarifiés par la technique d'osmose inverse, ceci dans le but d'atteindre une eau de qualité ultra-pure. La simulation a été réalisée avec le logiciel spécialisé dans le traitement d'eau "WAVE : *Water Application Value Engine*" de l'industrie DUPONT *Water Solutions*. Dans un premier lieu, il s'agit de sélectionner (criblage) les membranes RO les plus efficaces en terme de réduction de la salinité et d'efficacité énergétique (l'énergie spécifique). Après l'étape de criblage des membranes, la deuxième étape consiste à déterminer les configurations optimales d'un système de traitement d'eau RO. Le but recherché étant une comparaison de la faisabilité de production d'eau de qualité ultra-pure pour la production d'hydrogène à partir de l'eau mer et une eau de rejet clarifiée. Il est important de mentionner qu'une partie des travaux a été dédiée à une brève simulation d'un prétraitement de l'eau de rejet par ultrafiltration.

III.2. Présentation du logiciel WAVE 1.82

Le logiciel WAVE est un logiciel lancé par DUPONT *Water 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 en augmentant la productivité du système. WAVE permet d'estimer les performances des technologies d'ultrafiltration (UF), d'Osмосe inverse (OI) et d'échange d'ions (IX) dans les systèmes de traitement des eaux, individuelles soient-elles ou combinées. De même Le logiciel WAVE permet d'effectuer une étude technico-économique et une estimation du cout de l'eau traitée (OPEX). 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 principales en combinaison ainsi que des technologies connexes.
- Utilisation d'algorithmes améliorés et efficaces.
- Interface Simple et prise en main rapide des processus de traitement.
- Présence de base de données pour tous les produits et processus.

III.2.1. Les technologies de traitement d'eau sur le logiciel WAVE



III.2.2. Les équations de conception d'un système RO sur logiciel WAVE

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

constante de proportionnalité est le coefficient de perméabilité membranaire, connu comme valeur A. L'équation familière de la perméation de l'eau a la forme :

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

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

$$N_A = B (C_{FC} - C_P) \quad \text{Eq 2}$$

Où:

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

C_p = concentration du perméat

Tableau III.1 : Équations de conception pour projeter les performances du système d'osmose inverse : performances des éléments individuels

objet	Equation	Nbr Eq
Flux de perméat	$Q_i = A_i \bar{\pi}_i S_E (TCF) (FF) \left(P_{fi} - \frac{\Delta P_{fci}}{2} - P_{pi} - \bar{\pi} + \pi_{pi} \right)$	3
Pression osmotique moyenne côté concentrât	$\bar{\pi} = \pi_i \left(\frac{C_{fc}}{C_f} \right) \overline{pf}$	4
Pression osmotique moyenne côté perméat	$\bar{\pi} = \pi_i (1 - R_i)$	5
Rapport : moyenne arithmétique côté concentrât pour alimenter la concentration pour l'élément i	$\frac{C_{fci}}{C_{fi}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C_{ci}}{C_{fi}} \right)$	6
Rapport : concentrât pour alimenter la concentration pour l'élément i	$\frac{C_{ci}}{C_{fi}} = \frac{1 - Y_i (1 - R_i)}{(1 - Y_i)}$	7
Pression osmotique de l'eau d'alimentation	$\pi_f = 1.12(273+T) \sum m_i$	8

Facteur de correction de température pour membrane RO et NF	$TCF = EXP \left[2640 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right]; T \geq 25^\circ C$	9
	$TCF = EXP \left[3020 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T} \right) \right]; T \leq 25^\circ C$	10
Facteur de polarisation de concentration pour les éléments de 8 pouces	$pf_i = EXP[0.7Y_i]$	11
récupération du système	$Y = 1 - \left[(1-Y_1)(1-Y_2)\dots(1-Y_n) \right] = 1 - \prod_{i=1}^n (1-Y_i)$	12
Concentration du perméat	$C_{pj} = B(C_{fcj})(pf_i)(TCF) \frac{S_E}{Q_i}$	13

Nbr Eq : Nombre d'équation

Tableau III.2 : Équations de conception pour projeter les performances du système OI : performances moyennes du système.

objet	Equation	Nombre d'équation
Débit total de perméat	$Q = N_E S_E \bar{A} \bar{\pi} (TCF) (FF) \left[P_f - \frac{\Delta P_{fc}}{2} P_p - \pi_f \right] \left[\frac{C_{fc}}{C_f} p_f - (1-\bar{R}) \right]$	14
Rapport : concentration moyenne entre le côté concentrât et la charge pour le système	$\frac{C_{fc}}{C_f} = \frac{-\bar{R} \ln \left(1 - \frac{Y}{Y_L} \right)}{Y - (1-Y_L) \ln \left(1 - \frac{Y}{Y_L} \right)} + (1-\bar{R})$	15
Limitation de la récupération du système	$Y_L = 1 - \frac{\pi_f (\bar{pf}) (\bar{R})}{\bar{pf} - \Delta P_{fc} - P_p}$	16
Rapport approximatif log-moyen de la concentration côté concentrât sur alimentation pour le système	$\frac{C_{fc}}{C_f} = - \frac{\ln(1-Y)}{Y}$	17
récupération moyenne des éléments	$Y_i = 1 - (1-Y)^{1/n}$	18
Facteur de polarisation moyen	$\bar{pf} = EXP[0.7\bar{Y}_i]$	19
Pression osmotique moyenne côté concentrât pour le système	$\bar{\pi} = \pi_i \left(\frac{C_{fc}}{C_f} \right) \bar{pf}$	20

chute de pression moyenne du système côté concentrât pour les éléments de 8 pouces ; 2 étapes	$\overline{\Delta P}_{fc} = 0.04 \overline{q}_{fc}^2$	21
	$\Delta P_{fc} = \left[\frac{0.1 \left(\frac{Q}{1440} \right)}{Y N_{VR}} \right] \left(\frac{1}{N_{VR}} + 1 - Y \right)$	22
	$\Delta P_{fc} = 0.01 n \overline{q}_{fc}^{1.7}$	23
Élément individuel de 8 pouces ou chute de pression côté concentrât à un étage	$\overline{A}(\pi) = 0.125; \pi \leq 25$	24
	$\overline{A}(\pi) = 0.125 - 0.011 \left(\frac{\pi - 25}{35} \right); 25 \leq \pi \leq 200$	25
	$\overline{A}(\pi) = 0.070 - 0.0001 (\pi - 200); 200 \leq \pi \leq 400$	26
Perméabilité de la membrane en fonction de la pression osmotique moyenne côté concentrât	$C_p = B C_{fc} \overline{pf} (TCF) \left(\frac{N_E S_E}{Q} \right)$	27

Tableau III.3 : symbol definition

Q_i : premeat flow of Element i (gpd)	\sum_j : summation of all ionic species
$A_i \pi_i$: membrane permeability at 25°C for Element i, a function of the average concentrate-side osmotic pressure (gfd/psi)	Y : system recovery (expressed as a fraction) = permeate flow/feed flow
S_E : membrane surface area per element (ft ²)	$\prod_{i=1}^n$: multiplication of n terms in a series
TCF : temperature correction factore for membrane permeability	N_E : number of Element in system
FF : membrane fouling factor	Q : system permeate flow (gpd)
P_{fi} : feed pressur of eleement i (psi)	n : number of elements in system
ΔP_{fci} : concentrate-side pressure drop for Element i (psi)	\overline{Q}_i : average element permeate flow (gpd) = Q/N_E
P_{pi} : permeat pressur of Element i (psi)	$\overline{A}\pi$: average membrane permeability at 25°C: a function of the average concentrate-side osmotic pressure (gfd/psi)
$\overline{\pi}_i$: arevage concentrate-side osmotic pressure (psi)	\overline{C}_{fc} : average concentrate-side concentration for system (ppm)
π_{fi} : feed osmotic pressur of Element i	\overline{R} : average fractional salt rejection for system
π_{pi} : permeate side osmotic ressur of Element i	$\overline{\pi}$: average concentrate-side osmotic pressure for system (psi)
Pf_i : concentration polarization factor for Element i	$\overline{\Delta P}_{fc}$: average concentrate-side system pressure drop (psi)
R_i : salt rejection fraction for Element i $= \frac{\text{feed conc} - \text{perm conc}}{\text{feed conc}}$	Y_L : limiting (maximum) system recovery (expressed as a fraction)

C_{fci} : average concentrate-side concentration for Element i (ppm)	\overline{Y}_i : average element recovery (expressed as a fraction)
C_{fi} : feed concentration for Element i (ppm)	\overline{pf} : average concentration polarization factor
C_{ci} :concentrate concentration for Element i (ppm)	\overline{q}_{fc} : arithmetic average concentrate-side flowrate (gpm) [= (1/2)(feed flow + concentrate flow)]
Y_i : recovery fraction for Element i	N_v : number of six-element pressure vessels in system ($\approx N_E/6$)
π_f : treated feedwater osmotic pressure (psi)	N_{v1} : number of pressure vessels in first stage of 2-stage system ($\approx 1/3 N_v$)
T : feedwater temperature ($^{\circ}C$)	N_{v2} : number of pressure vessels in second stage of 2-stage system ($\approx N_v/3$)
m_j : molal concentration of j th ion species	N_{vR} : stage ratio ($=N_{v1}/N_{v2}$)

III.3. Les Interfaces du logiciel WAVE

La manipulation du logiciel Wave DOW est simple, ne nécessitant pas beaucoup de paramètres d'entrée (input) et permet de générer des résultats très fiables. L'interface est claire, comme le montre la figure (III-1), il suffit donc de connaître la qualité de l'eau à filtrer, tel que la composition ionique de l'eau à traiter, la nature de l'eau, la température, le pH et enfin la turbidité, ainsi que le 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, possède une base de données actualisée sur les membranes (RO, NF et UF), ce qui permet d'effectuer une simulation sur une large gamme de membrane avec des caractéristiques variées et de ce fait, choisir la membrane la plus adéquate selon les objectifs et les besoins.

Les figures (III.1), (III.2) et (III.3), représentent respectivement l'interface du logiciel pour le choix de la technologie, l'introduction des caractéristiques de l'eau a traitée et enfin la configuration de l'unité

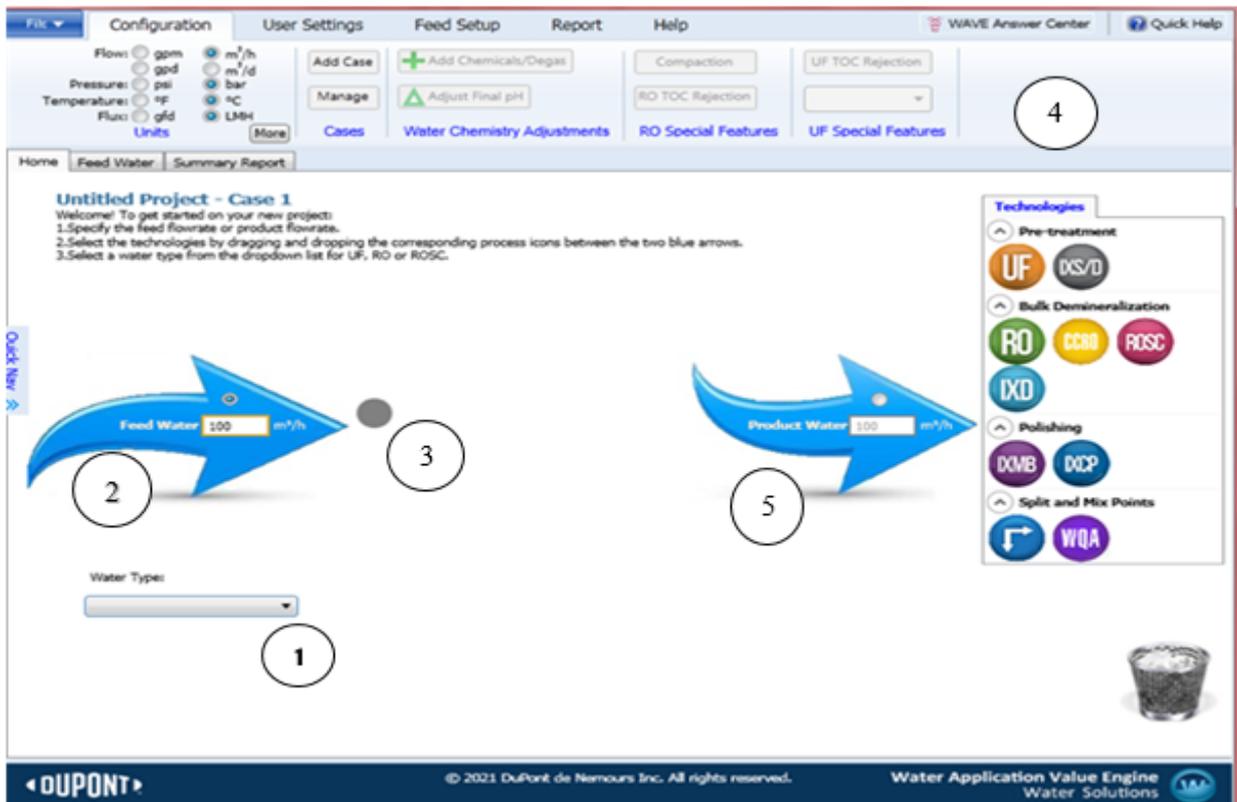


Figure III.1 : Fenêtre 1 ; choix de la technologie, du débit et du type d'eau

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

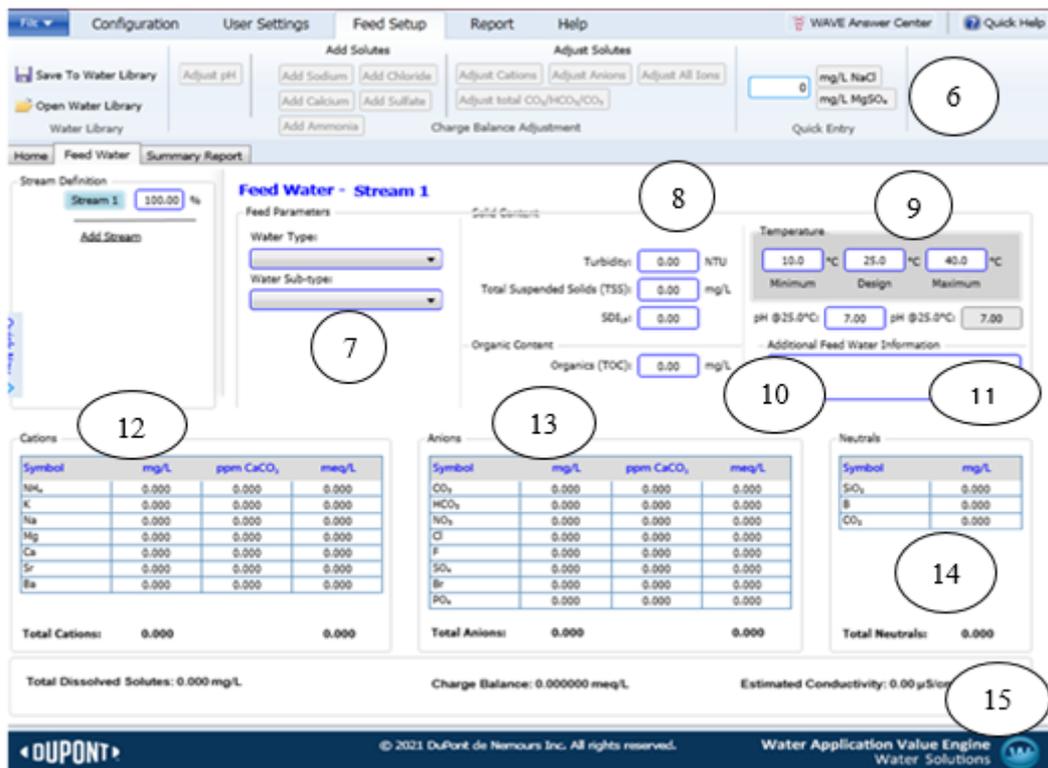


Figure III.2 : Page 2 ; caractéristiques de l'eau d'alimentation

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

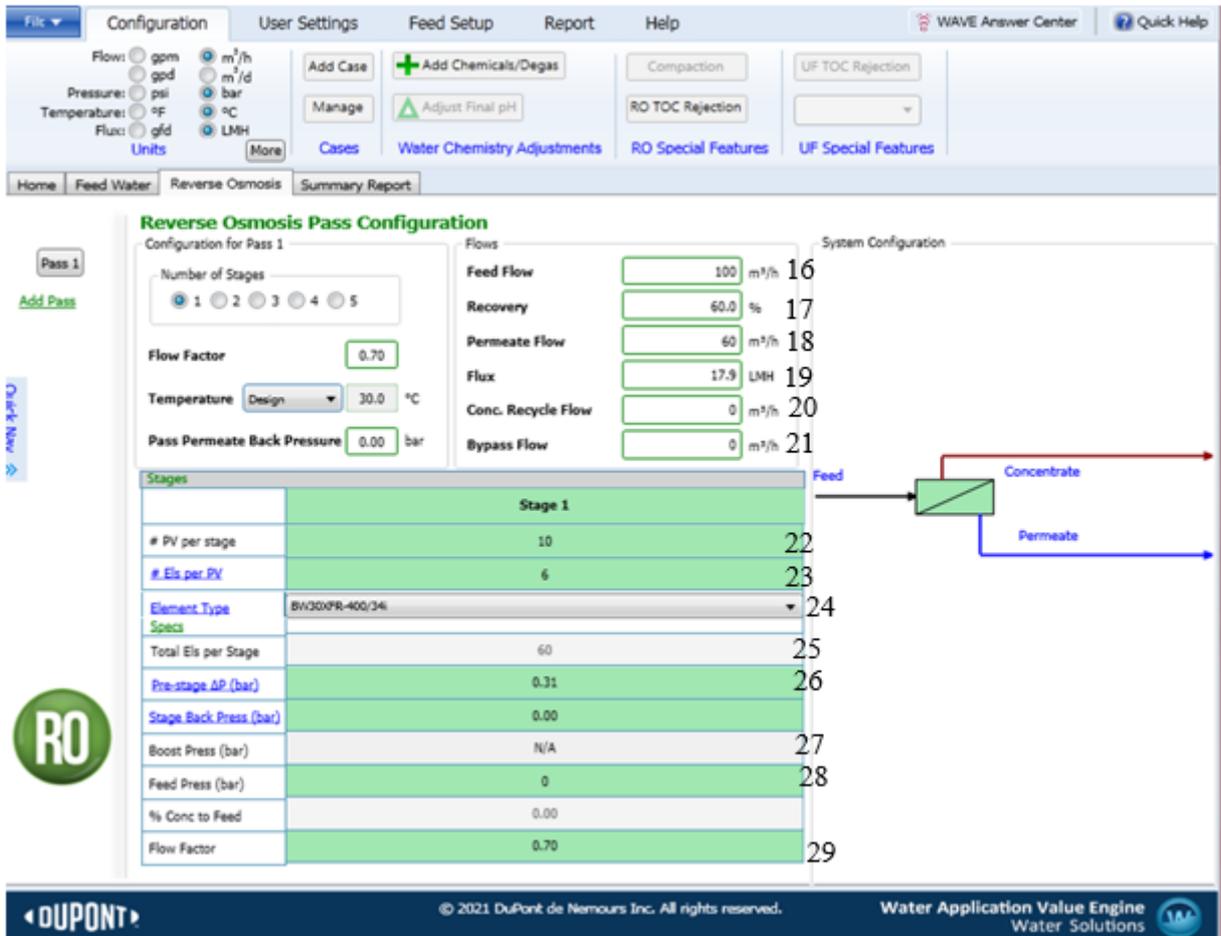


Figure III.3: Page 3 ; choix des membranes et configuration de l'unité

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

III.4. caractéristiques de l'eau mer et eau rejet clarifiée (paramètres d'alimentations)

Les paramètres d'alimentation représentent les données nécessaires à la faisabilité de la simulation.

a- Pour l'eau de mer :

Tableau III.4 : Les paramètres de flux d'alimentation : [24]

La turbidité	0 NTU
Matières en suspension totales (TSS)	0 mg/l
L'indice de colmatage	0
Carbone organique total	0 mg/l
La température maximum	40 °C
La température minimum	5 °C
La température de design	25 °C
pH	8-11

Tableau III.5 : La composition de flux d'alimentation :

Alimentation		Concentration (mg/l)
Cations	K ⁺	408,410
	Ca ²⁺	421,694
	Na ⁺	11032,981
	Mg ²⁺	1313,669
	Sr ²⁺	8,135
Anions	CO ₃ ⁻²	14,675
	HCO ₃ ⁻	107,255
	Br ⁻	68,855
	Cl ⁻	19804,216
	F ⁻	1,330
	SO ₄ ⁻²	2775,629
Neutres	SiO ₂	1,00
	B	4,594
	CO ₂	0,430
Total anions		22771,960
Total cations		13184,890
Total neutres		6,024
TDS		35984,132

b- Pour les rejets :

Tableau III.6 : Les paramètres de flux d'alimentation [24]

Turbidité	≤0.1 NTU
Matières en suspension totales (TSS)	0 mg/l
L'indice de colmatage	0
carbone organique total	3 mg/l
la température maximum	35 °C
la température minimum	25 °C
la température de design	30 °C
pH	6,80-6,83

Tableau III.7: La composition de flux d'alimentation

Alimentation		Concentration (mg/l)
Cations	Na ⁺	175.0
	Mg ⁺²	13.00
	Ca ⁺²	52.00
	NH ₄	44.00
	K	15.00
Anions	CO ₃ ⁻²	0.11
	HCO ₃ ⁻	156.81
	Cl ⁻	325.0
	SO ₄ ⁻²	72.200
	NO ₃	50.00
	F	0.700
Neutres	SiO ₂	8.00
	CO ₂	28.71
Total anions		604.82
Total cations		299.00
Total neutres		36.710
TDS		911.607

Tableau III.8 : les paramètres de flux d'alimentation d'Ultrafiltration

La turbidité	1 NTU
Matières en suspension totales (TSS)	0 mg/l
L'indice de colmatage	0
Carbone organique total	20 mg/l
La température maximum	35 °C
La température minimum	25 °C
La température de design	30 °C
pH	6,80-6,83

Tableau III.9 : La composition de flux d'alimentation

Alimentation		Concentration (mg/l)
Cations	NH ₄	44.00
	K	15.00
	Na	175.0
	Mg	13.00
	Ca	52.00
	Sr	0.00
	Ba	0.00
Anions	CO ₂	0.11
	HCO ₂	156.81
	NO ₃	50.00
	Cl	325.00
	SO ₄	72.20
	F	0.700
	Br	0.00
	PO ₄	0.0
Neutres	SiO ₂	8.00
	CO ₂	28.71
	B	0.00
Total anions		604.82
Total cations		299.00
Total neutres		36.71
TDS		911.79 mg/l

III.5 Ultrafiltration des eaux usées:

Le prétraitement :

L'ultrafiltration est une alternative à la filtration conventionnelle pour la clarification des eaux, avec une amélioration sensible de l'efficacité de traitement (abattement de la turbidité à 0,1 NTU) qui est obtenue quelle que soit la qualité de l'eau brute traitée.

L'ultrafiltration assure l'élimination des matières en suspension, carbone organique total (diminuer de 20 à 18 mg/l), particules minérales, particules vivantes, turbidité et SDI jusqu'aux colloïdes.

Dans cette étape, L'ultrafiltration clarifie et désinfecte l'eau en une seule étape avec un débit de 1000 m³/h.

la membrane sélectionné est SFP - 2860 XP avec taux de conversion 99.5%.

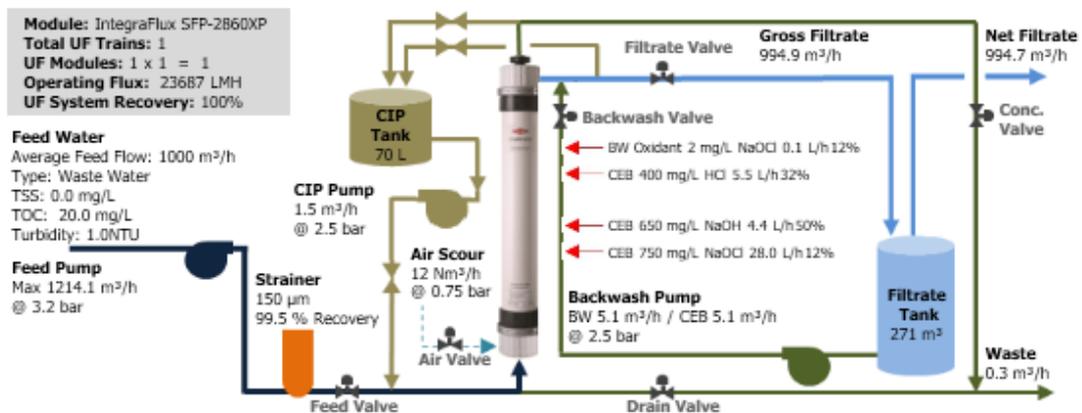


Figure III.4 : configuration basique pour la sélection des membranes UF

➤ Membrane type Intergralux SFP-2860 XP :

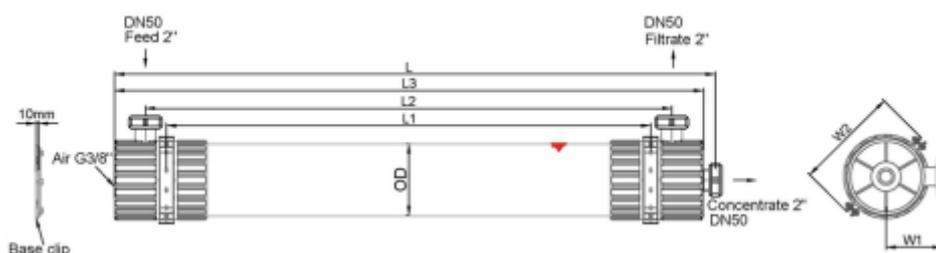


Figure III.5: Dimension de la Membrane de type SFP – 2860 XP

Tableau III.10: dimensionnement de la membrane SFP-2860 XP

produit	Unité	Langueur				Diamètre	Larguer	
		L	L1	L 2	L3	D	W1	W2
SFP-2860XP	SI (mm)	1860±3	1500	1630±3	1820±3	225	180	342
	US (inch)	73.2±0.1	59.1	64.2±0.1	71.7±0.1	8.9	7.1	13.5

Tableau III.11 : Les caractéristiques de la membrane SFP-2860XP :

Propretés	Valeur
Surface active	51 m ²
Débit de perméat stabilisé	8.5 m ³ /jour
Température de fonctionnement maximale	40°C
Pression de fonctionnement maximale	4.75 bar
Turbidité d'alimentation maximale	1 NTU
Gamme de pH	2 – 11

CHAPITRE IV : SELECTION DES MEMBRANES

IV.1. L'eau de mer

L'objectif de ce travail est de déterminer la membrane la plus efficace en termes de réduction de la salinité totale de l'eau de mer ainsi que l'eau clarifiée issue des installations d'épurations.

Une bonne membrane doit exhiber à la fois une bonne capacité à réduire la salinité totale mais aussi démontrer une bonne efficacité en termes de consommation d'énergie. Dans cette étape, douze (12) membranes d'osmose inverse ont été présélectionnées sur la base d'une configuration basique (un seul passe et un seul étage) avec un débit d'alimentation de 1000 m³/h (figure IV.1), le taux de conversion sélectionné dans ce cas est de 40%.

Il est important de noter que les membranes présélectionnées dans le cas de l'eau de mer sont de type SW c.à.d. des membranes destinées à l'eau de mer (TDS \geq 25 000 ppm)

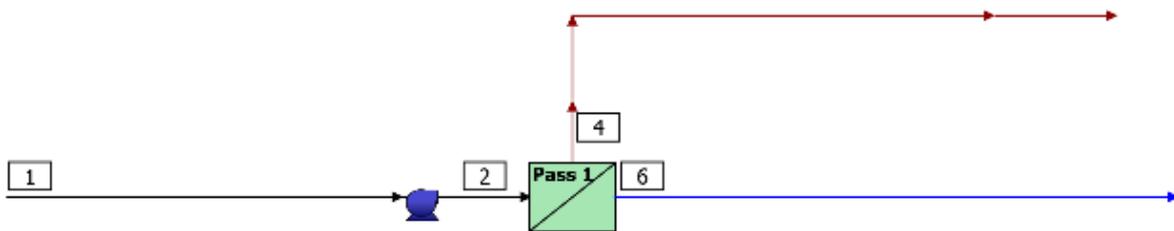


Figure IV.1 : configuration basique pour la sélection des membranes RO. (1) l'eau brut, (2) l'eau sous pression d'alimentation, (4) retentât, (6) perméat.

Le principal critère de sélection, est la salinité la plus faible combinée à une consommation d'énergie minimale.

Le tableau IV.1, représente les caractéristiques des membranes d'osmose inverse présélectionnées.

Tableau IV.1 : Caractéristiques des membranes RO-SW présélectionnées pour l'étude (cas d'une eau de mer). [25]

El m	Nom commercial	Caractéristiques						
		Surf act m ²	Q (m ³ /j)	T° Max (°C)	P Max (bar)	Turbidité maximale	Gramme de pH	Rejet (%)
E11	SW30XFR-400/34	37.1	28.3	45	83	1 NTU	2 - 11	99.8
E12	SW30HRLE-4040	7.90	6.10	45	83	1 NTU	2- 11	99.95
E13	SW30XHR-440	40.8	24.9	45	83	1 NTU	2- 11	99.82
E14	SW30HR-380	35,0	22.6	45	69	1 NTU	2- 11	99.7
E15	SW30-4040	7.40	7.30	45	69	1 NTU	2- 11	99.4
E16	SW30-2540	2.80	2.60	45	69	1 NTU	2- 11	99.4
E17	SW30HRLE-400	37.1	28.3	45	83	1 NTU	2 - 11	99.8
E18	SW30XLE-400	37,1	33,9	45	83	1 NTU	2 – 11	99.8
E19	SW30HRLE-440	40,8	30,9	45	83	1 NTU	2 – 11	99,7
E11 0	SW30XLE-440	41,0	37,4	45	83	1 NTU	2 – 11	99.8
E11 1	SW30HRLE-370/34	34.3	23,7	45	83	1 NTU	2 – 11	99,75
E11 2	SW30XHR-400	37,2	26,4	45	83	1 NTU	2 – 11	99.75

Les membranes présélectionnées représentent une large gamme de surface active allant de 2,8 à 41 m² correspondant à des débits variants de 2,6 à 37,4 m³/j. La température maximale de fonctionnement, la gamme de pH ainsi que la turbidité sont identiques pour toutes les membranes.

La pression maximale de fonctionnement est de 69 et 83 bar pour la plus part des membranes, la membrane Seamaxx représente la plus faible pression de fonctionnement qui est de 41 bar. Le taux de rejet du sel stabilisé varie de 99.95% (SW30HRLE-4040) à 99.4% (SW30-4040 et SW30-2540).

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

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

$$\text{Nombre d'élément} = \frac{Q_{\text{totale}}}{Q_{\text{élément}}} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Nombre de PV} = \frac{\text{nombre d'élément}}{6} \quad (\text{IV.2})$$

Q_t = débit total

Q_{ei} = débit élément

PV= nombre de tube de pression

Le tableau IV.2, représente respectivement le nombre d'élément ainsi que le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO pour atteindre un débit de 1000m³/j.

Tableau IV.1 : Caractéristiques des membranes RO-SW présélectionnées pour l'étude (cas d'une eau de mer). [25]

Eléments	Nom commercial	Débit en m³/jour	Nombre d'éléments	Nombre de PV
E11	SW30XFR-400/34	28.3	848	141
E12	SW30HRLE-4040	6.1	3934	655
E13	SW30XHR-440	24.9	964	161
E14	SW30HR-380	22,6	1020	170
E15	SW30-4040	7.3	3288	548
E16	SW30-2540	2.6	9231	1539
E17	SW30HRLE-400	28.3	848	141
E18	SW30XLE-400	33,9	708	118
E19	SW30HRLE-440	30,9	641	107
E110	SW30XLE-440	37,4	641	107
E111	SW30HRLE-370/34	23,7	1013	169
E112	SW30XHR-400	26,4	909	152

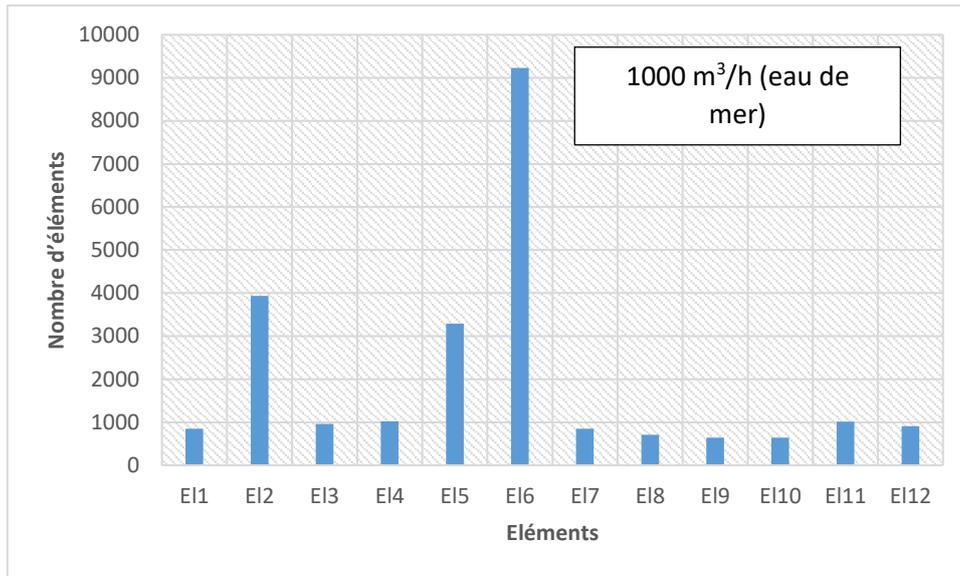


Figure IV.2 : Histogramme du nombre d'éléments nécessaires pour 1000m³/h (1 pass & stage)

Selon la figure (IV.2), afin de traiter un débit de 1000 m³/h, il est nécessaire d'introduire au moins 9231 membranes de type SW30-2540 (EI6) dans le système RO avec un seul passe et un seul étage, ce qui correspond à 1536 tubes de pression. D'un autre côté, le système RO constitué de la membrane SW30XLE-440 nécessite uniquement 641 membranes (107 PV). Cette différence du nombre d'éléments est due au fait que les membranes ont des caractéristiques de surface active très variées.

En ce qui concerne les autres membranes représentées dans la figure (IV.2), le nombre nécessaire pour atteindre les 1000 m³/h varie entre 708 et 3288. A cette étape, Il est particulièrement important de noter, que le nombre d'éléments à introduire dans un système est d'une importance primaire pour la viabilité d'un projet, effectivement plus le nombre des membranes est élevé et plus le système est complexe. Mais d'un autre coté le choix de la membrane doit répondre à un objectif qui est une réduction drastique de la salinité pour la production d'eau de qualité Ultra-pure, il s'agit donc de trouver le meilleur compromis entre une qualité d'eau recherchée et un système RO optimale (nombre de membrane et efficacité énergétique)

Dans ce même sillage, Le tableau (IV.3) représente respectivement la salinité totale, la pression d'alimentation, l'énergie spécifique et la conductivité, des membranes d'osmose inverse présélectionné avec une configuration basique.

Tableau IV.3 : Respectivement la salinité totale, la pression d'alimentation ainsi que l'énergie spécifique et la conductivité pour chaque membrane (RO-SW) dans le cas d'une configuration basique avec un taux de conversion de 40%

Eléments	Nom commercial	TDS (mg/l)	Conductivité (µs/cm)	PA* (bar)	ENRs**KWh/m ³
EI1	SW30XFR-400/34	201,1	0,402	50	4,35
EI2	SW30HRLE-4040	190,0	0,380	50,8	4,42
EI3	SW30XHR-440	174,8	0,359	50,5	4,39
EI4	SW30HR-380	132,4	0,265	67,8	5,90
EI5	SW30-4040	290,1	0,580	50,9	4,43
EI6	SW30-2540	574,9	1,150	50,2	4,37
EI7	SW30HRLE-400	192,5	0,385	50,8	4,42
EI8	SW30XLE-400	192,6	0,385	51	4,44
EI9	SW30HRLE-370/34	156,6	0,313	54	4,70
EI10	SW30XLE-440	192,0	0,384	51,1	4,45
EI11	SW30HRLE-440	196,7	0,393	50,5	4,39
EI12	SW30XHR-400	150,4	0,301	52,7	4,58

*pression d'alimentation ** énergie spécifique

Dans le contexte de réduction de la salinité, il est à noter que les membranes EI7, EI8, EI10 et EI11 ont quasiment le même TDS qui est de ≈ 192 mg/l. La membrane EI2 représente le TDS le plus faible qui est de 190,0mg/l, d'un autre côté la membrane EI6 ne permet d'atteindre qu'une salinité de 574,9 mg/l. Les différentes membranes présélectionnées permettent d'obtenir un contraste relativement important de la salinité tel que démontré dans la figure (IV.3), ceci est principalement dû aux caractéristiques intrinsèques des membranes dont le plus important est le taux de rejet. D'autres parts, on remarque que la membrane EI4 avec la plus faible salinité représente une pression d'alimentation de 67,8 bar, qui est relativement élevée par rapport aux autres membranes. Il est difficile d'établir une corrélation entre la pression d'alimentation et le TDS pour les différentes membranes. Cependant l'énergie spécifique varie de manière proportionnelle avec la pression d'alimentation, ceci est illustré dans la figure (IV.4).

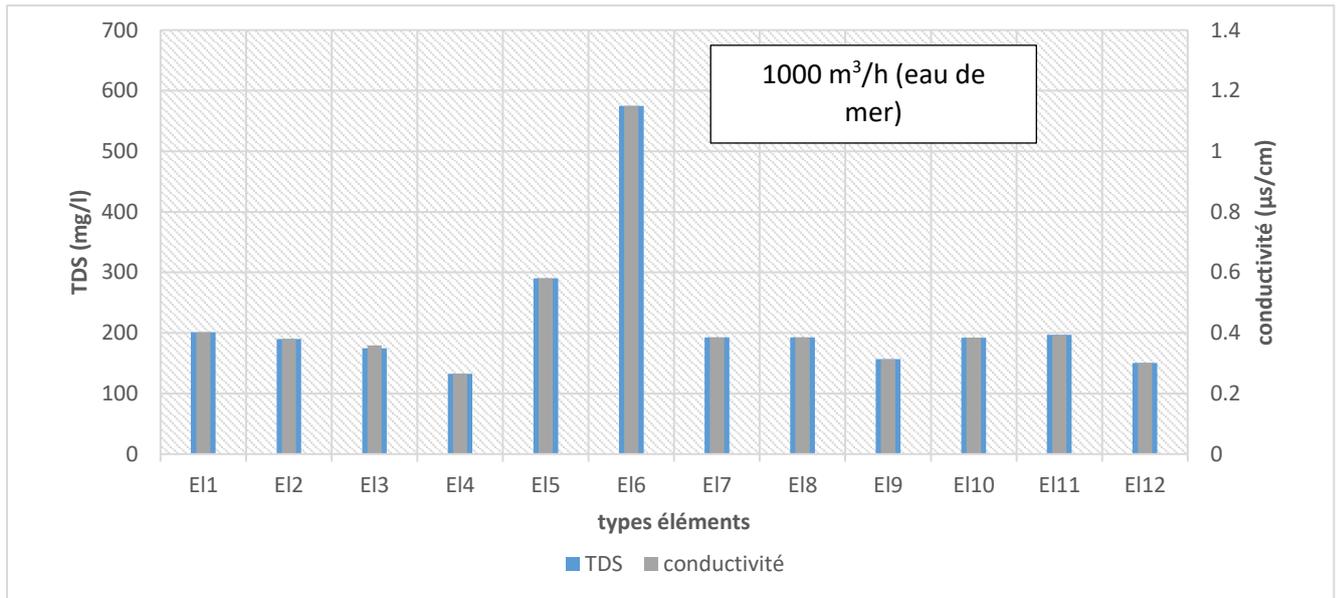


Figure IV.3 : histogramme de la salinité totale (TDS) et de la conductivité en fonction des éléments

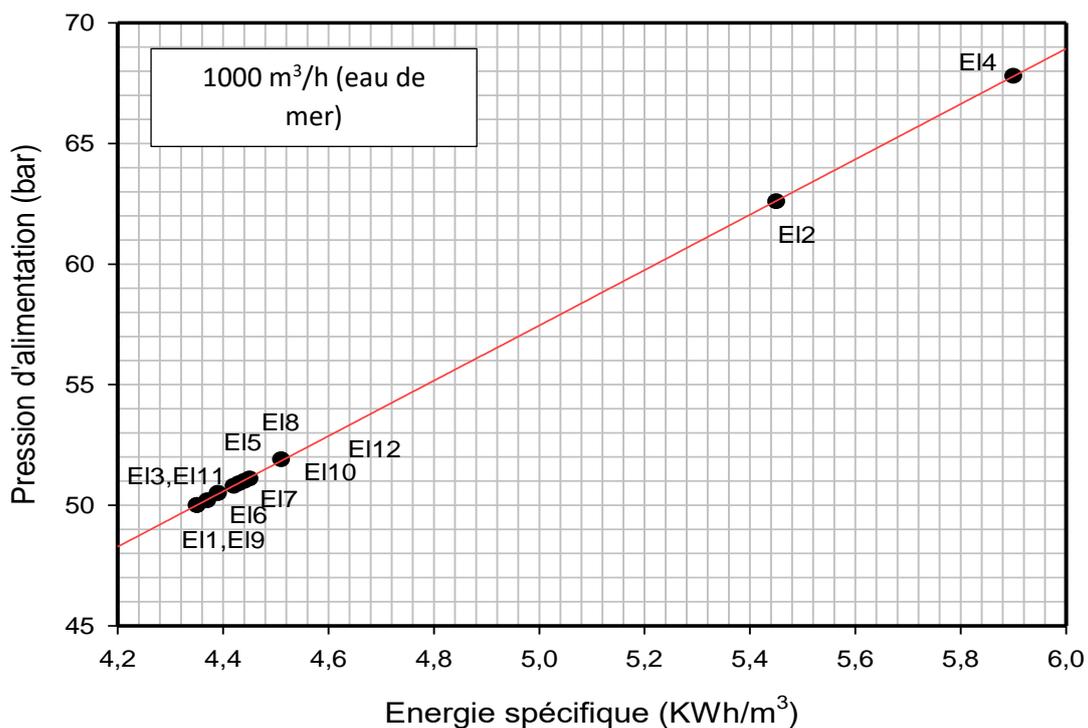


Figure IV.4 : pression d'alimentation en fonction énergie spécifique pour chaque membrane et un taux de conversion de 40%.

Etant donné que l'eau ultra-pure, est généralement estimé en terme de conductivité il est donc plus judicieux d'exprimer la salinité totale en fonction de la conductivité. La relation entre le TDS et la conductivité est donné la relation (IV.3)

$$\text{TDS}(\text{mg/l}) = 0.5 \cdot 1000 \cdot \mu \quad (\text{IV.3})$$

μ : conductivité ($\mu\text{s/cm}$). [25]

Pour la suite du travail quatre membranes RO-SW seront sélectionnées sur la base des critères suivants :

- Une membrane représentant la plus faible salinité (Element 4)
- Une membrane respresentant la plus faible energie specifique (Element 1)
- Une membrane représentant la plus surface active (Element 10)
- Une membrane intermediaire (element 6)

IV.2. Eau de rejet

La démarche précédente est suivie dans le cas d'une eau de rejet clarifiée avec une salinité totale de 911.607 (mg/l). Il est important de noter que l'eau de rejet clarifiée provient d'un prétraitement par ultrafiltration (voir chapitre III).

Dans le cas de l'eau de rejet, les membranes présélectionnées sont de type BW c.à.d. des membranes destinées à l'eau saumâtre.

Le tableau IV. 4, represente les caratéristiques des membranes d'osmose inverse présélectionnées dans le cas d'une eau de rejet.

Tableau IV. 4 : Caractéristiques des membranes RO-BW présélectionnées pour l'étude (cas d'eau de rejet)

Elm	Nom commercial	Caractéristiques						
		Surf act m ²	Q (m ³ /j)	T°Max (°C)	PMax (bar)	Turbidité maximale	Gramme de pH	Rejet (%)
El 1*	Eco pro-400i	37,0	43,5	45	41	1 NTU	2 - 11	99,70
El 2*	XLE-440i	41,0	53,0	45	41	1 NTU	2 - 11	99,00
El 3*	BW30HRLE-440 i	41,0	48,0	45	41	1 NTU	2 - 11	99,30
El 4*	BW30XFR-400/34i	37,0	43,5	45	41	1 NTU	2 - 11	99,65
El 5*	BW30HR-440 i	41,0	48,0	45	41	1 NTU	2 - 11	99,70
El 6*	BW30XFRLE400/34i	37,0	43,5	45	41	1 NTU	2 - 11	99,30
El 7*	BW30-400	37,0	40,0	45	41	1 NTU	2 - 11	99,50
El 8*	BW30-400/34i	37,0	40,0	45	41	1 NTU	2 - 11	99,50
El 9*	NF270-400/34i	37,0	47,0	45	41	1 NTU	3 - 11	97,00
El 10*	SG30-400/34i	37,0	38,6	45	41	1 NTU	2 - 11	97,00
El 11*	Fortilife™ CR100	37,0	43,5	45	41	1 NTU	2 - 11	99,70
El 12*	RO-390-FF	36,23	51,8	45	41	1 NTU	3 - 11	99,50

El* : Eléments pour l'eau d'usée

Les membranes présélectionnées representes une large gamme de surface active allant de 36.23 à 41 m² correspondants a des débits variants de 38 ,6 à 53 m³/j. la température

maximale de fonctionnement, la gamme de pH ainsi que la turbidité sont identiques pour toutes les membranes.

La pression maximale de fonctionnement est de 41 bar pour toutes les membranes. Le taux de rejet du sel stabilisé varie de 99,7 (Eco pro-400i et Fortilife™ CR100) à 97 % (NF270-400/34i). le taux de rejet des autres membranes se situe aux alentours de 99.5 et 99.7%

Compte tenu de la différence des membranes en termes de surface active et de débit d'alimentation, il est nécessaire d'ajuster le nombre de membranes pour atteindre un débit de 1000m³/h.

Le tableau (IV.5), représente respectivement le nombre d'élément ainsi que le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO pour atteindre un débit de 1000m³/j.

Tableau IV.5 : le nombre d'élément et le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO-BW pour traiter un débit de 1000m³/jour (1 pass & 1 stage)

Eléments	Nom commercial	Débit en m³/jour	Nombre d'éléments	Nombre de pv
El 1*	Eco pro-400i	43,5	552	92,0
El 2*	XLE-440i	53,0	546	91,0
El 3*	BW30HRLE-440 i	48,0	500	84,0
El 4*	BW30XFR-400/34i	43,5	552	92,0
El 5*	BW30HR-440 i	48,0	500	84,0
El 6*	BW30XFRLE-400/34i	43,5	552	92,0
El 7*	BW30-400	40,0	600	100
El 8*	BW30-400/34i	40,0	600	100
El 9*	NF270-400/34i	47,0	540	90,0
El 10*	SG30-400/34i	38,6	622	104
El 11*	Fortilife™ CR100	43,5	559	94,0
El 12*	RO-390-FF	51,8	540	90,0

Selon figure (IV.5) Pour atteindre un débit de 1000 m³/h, il est nécessaire d'introduire au moins 622 membranes de type SG30-400/34i (El10) dans le système RO à un passe et à un étage, ce qui correspond à 104 tube de pression. En revanche, un système RO comprenant la membrane BW30HRLE-440i ne nécessite que 500 membranes (84 PV). Pour les autres membranes représentées sur la figure IV.5, le nombre nécessaire pour atteindre 1000 m³/h est compris entre 540 et 600.

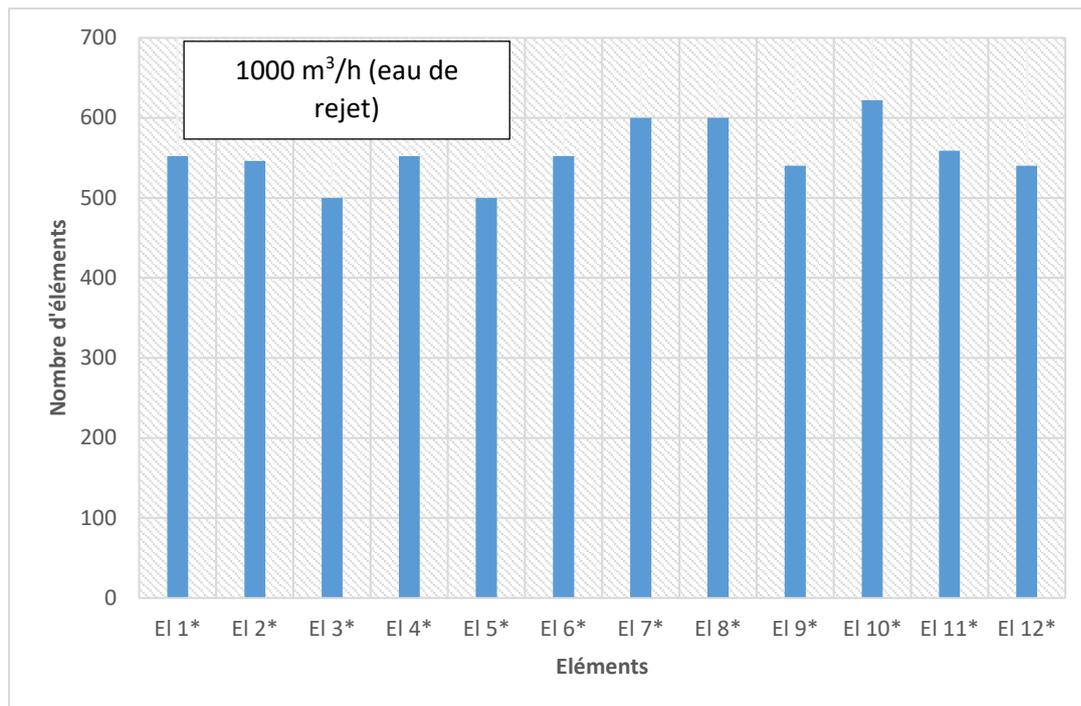


Figure IV.5 : Histogramme du nombre d'éléments nécessaire pour 1000m³/h (1 pass & stage)

Dans ce même sillage, Le tableau (IV.6) Représente respectivement la salinité totale, la pression d'alimentation, l'énergie spécifique et la conductivité, des membranes d'osmose inverse de type BW présélectionnée.

Tableau IV.6 : Respectivement la salinité totale, la pression d'alimentation ainsi que l'énergie spécifique et la conductivité pour chaque membrane (RO-BW) dans le cas d'une configuration basique avec un taux de conversion de 40%.

Eléments	Nom commercial	TDS (mg/l)	Conductivité(µs/cm)	P _A (bar)	ENRs (KWh/m ³)
EI 1*	Eco pro-400i	20,42	0,048	4,4	0,38
EI 2*	XLE-440i	83,14	0,166	4,1	0,36
EI 3*	BW30HRLE-440 i	35,02	0,070	4,9	0,43
EI 4*	BW30XFR-400/34i	15,12	0,030	6,1	0,53
EI 5*	BW30HR-440 i	13,87	0,028	6,6	0,58
EI 6*	BW30XFRLE-400/34i	35,56	0,071	4,4	0,38
EI 7*	BW30-400	24,39	0,049	6,7	0,58
EI 8*	BW30-400/34i	24,30	0,049	6,3	0,55
EI 9*	NF270-400/34i	605,7	1,211	2,4	0,21
EI 10*	SG30-400/34i	24,19	0,048	7,0	0,61
EI 11*	Fortilife™ CR100	13,63	0,027	6,0	0,52
EI 12*	RO-390-FF	21,99	0,044	5,8	0,50

Dans le conteste de réduction de la salinité, il est a noté que les membranes EI*7, EI*8, et EI*10 ont quasiment le même TDS qui est de ≈ 24 mg/l. la membrane EI5 représente le TDS le plus faible qui est de 13,87mg/l. d'un autre coté la membrane E*19 ne permet d'atteindre qu'une

salinité de 605,7 mg/l. Les différentes membranes présélectionnées permettent d'obtenir un contraste relativement important de la salinité tel que démontrer dans la figure IV.3.

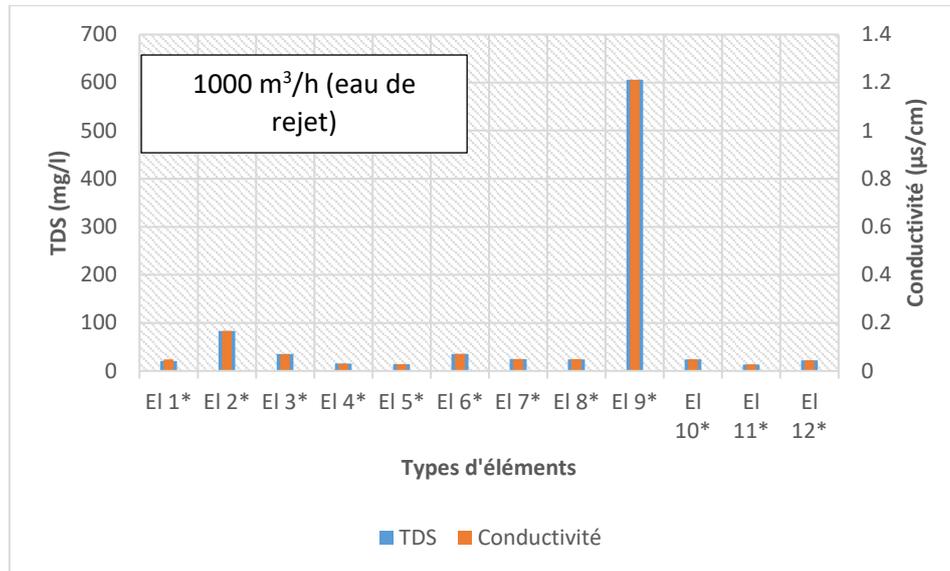


Figure IV.6 : histogramme de la salinité totale (TDS) et de la conductivité en fonction des éléments

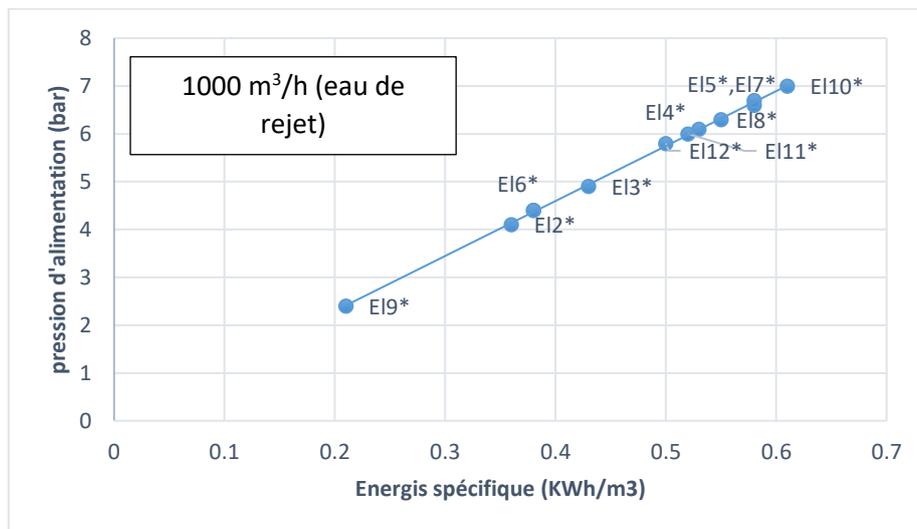


Figure IV.7 : pression d'alimentation en fonction énergie spécifique pour chaque membrane et un taux de conversion de 40%.

Pour la suite du travail quatre membranes RO-BW seront sélectionnées sur la base des critères suivants :

- Une membrane représentant la plus faible salinité (Elément 11*)
- Une membrane représentant la plus faible énergie spécifique (Elément 9*)
- Une membrane représentant la plus surface active (Elément 5*)
- Une membrane intermédiaire (Element 6*)

CHAPITRE V : CONFIGURATIONS DE L'UNITE ET VARIATION DU TAUX DE CONVERSION

V.1.Introduction :

Après l'étape de sélection des membranes basée sur des critères cités ci-dessous sur la base d'une configuration minimaliste, la deuxième étape consiste à faire évoluer le TDS du permeat vers des valeurs les plus faibles possible. Dans un premier temps il s'agit de faire varier le taux de conversion sur une configuration à un seul pass et un étage, par la suite nous passerons à une configuration à double pass et un seul étage.

Ci-dessous les membranes sélectionnées concernant l'eau de mer (RO-SW) et l'eau de rejet (RO-BW) :

Membranes type RO-SW :

- Une membrane représentant la plus faible salinité (Elément 4)
- Une membrane représentant la plus faible énergie spécifique (Elément 1)
- Une membrane représentant la plus surface active (Elément 10)
- Une membrane intermédiaire (element 6)

Membrane type RO-BW:

- Une membrane représentant la plus faible salinité (Elément 11*)
- Une membrane représentant la plus faible énergie spécifique (Elément 9*)
- Une membrane représentant la plus surface active (Elément 5*)
- Une membrane intermédiaire (Element 6*)

V.2. Eau de mer

V.2.1. Variation du taux de conversion : un seul pass et un seul étage

Il s'agit dans ce cas d'utiliser la même configuration que dans l'étape de sélection des membranes

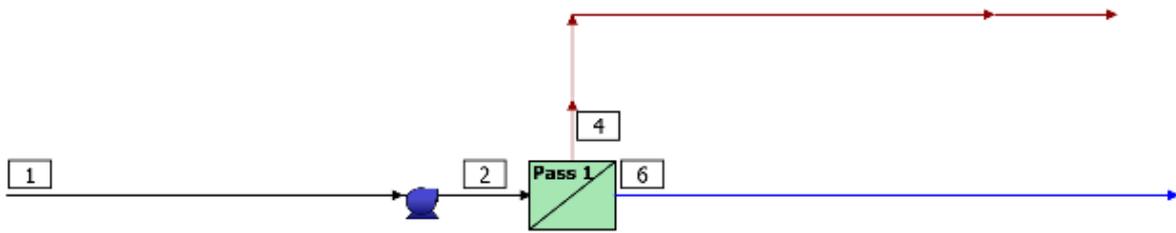


Figure V.1 : configuration basique pour la sélection des membranes RO. (1) l'eau brut, (2) l'eau sous pression d'alimentation, (4) retentât, (6) perméat

C'est un concept qui s'applique à tous les procédés à membranes : il correspond à la fraction de l'eau d'alimentation convertie en eau traitée. C'est donc le rapport entre le débit de perméat et le débit d'alimentation (Q_p/Q_a).

Les taux de conversion choisis sont de 10, 20, 30 et 40%, il est à noter qu'au-delà de 40% les pressions d'alimentation appliquées sur les membranes deviennent supérieures à la limite des membranes sélectionnées. De ce fait le logiciel nous indique un *system warning* et ce qui signifie des difficultés à converger les résultats.

a- Effet sur la salinité du perméat

Les résultats de l'effet de la variation du taux de conversion sur le TDS du perméat sont compilés dans le tableau (V.1) et la figure (V.2).

Tableau V.1 : TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

T.C *	Total dissolved solids en mg/l			
	E11	E14	E16	E110
(%)				
10	563,0	850,7	1576	543,5
20	314,0	474,4	891,5	303,3
30	235,5	353,1	668,8	225,9
40	201,1	299,8	571,0	192,0

T.C* : Taux de conversion

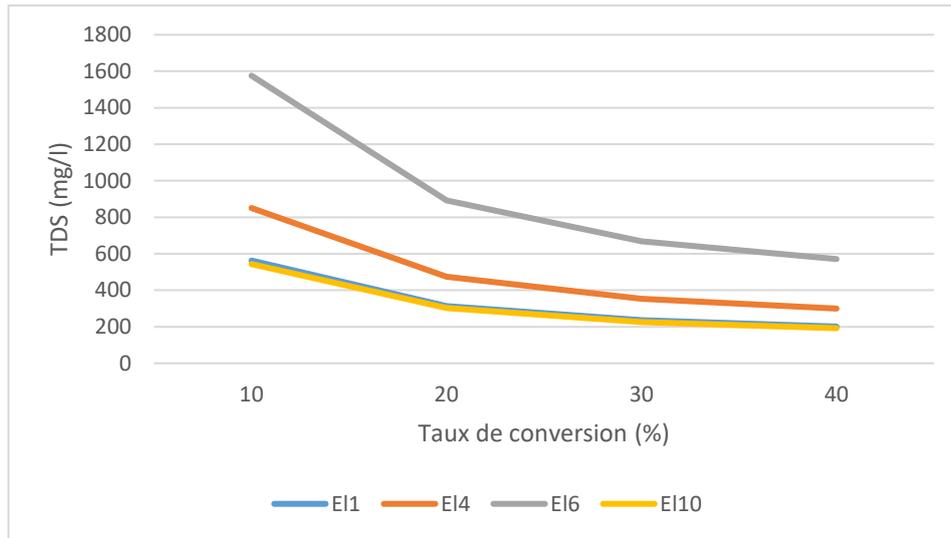


Figure V.2 : variation du TDS en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW

Selon la figure (V.2), l'augmentation du taux de conversion de 10 à 40 % résultant à une variation du TDS de 563 mg/l à 201.1 mg/l et 1576 mg/l à 571mg/l respectivement pour les membranes E11 et E16. D'un autre côté, on remarque que les deux membranes E11 et E110 sont sensiblement similaire en terme de valeur et de variation du TDS en fonction du taux de conversion. Notons aussi que la variation du TDS est d'autant plus importante lorsque le taux de conversion varie entre 10 et 20%, la variation du TDS semble moins importante lorsque le taux de conversion dépasse les 30%.

Il est important de noter que la technique d'osmose inverse est plus sensible à la variation de la salinité totale en fonction de taux de conversion par rapport à d'autres filières de traitement d'eau. [26]

b- Effet sur la conductivité du perméat

La conductivité varie de manière proportionnelle avec le TDS selon l'équation (IV.3), cela signifie que la tendance de variation de la conductivité en fonction du taux de conversion est sensiblement similaire à celle de la variation du TDS en fonction du taux de conversion.

Les résultats sont compilés dans le tableau (V.2) et la figure (V.3).

Tableau V.2 : conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

T.C * (%)	Conductivité (µs/cm)			
	E11	E14	E16	E110
10	1,126	1,701	3,152	1,087
20	0,628	0,949	1,783	0,607
30	0,471	0,706	1,338	0,452
40	0,402	0,599	1,142	0,384

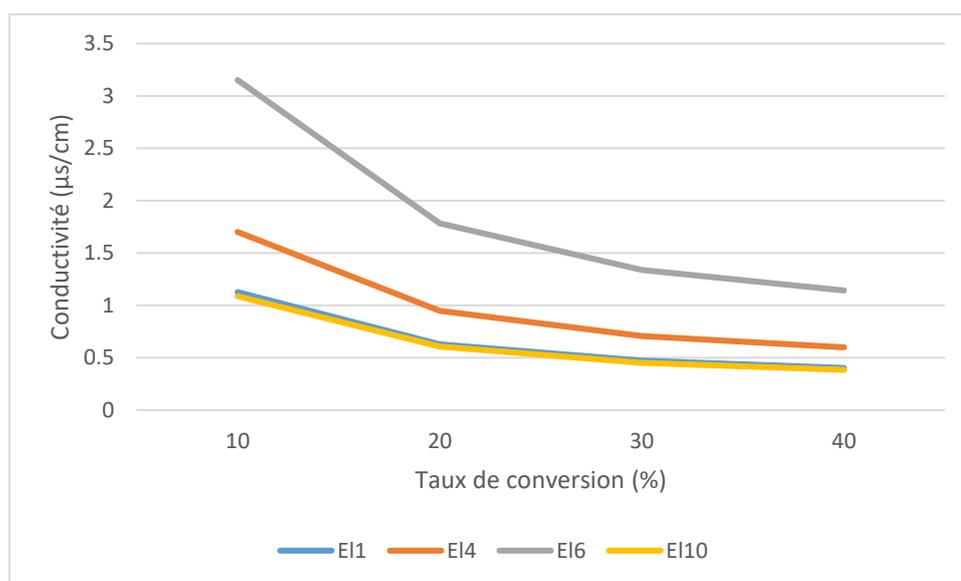


Figure V.3 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW

c- Effet sur la pression d'alimentation :

La variation du taux de conversion induit à une variation de la pression d'alimentation, certes plus le taux de conversion augmente plus le TDS diminue (tel que vu précédemment) cela signifie, que la pression osmotique est contre balancée par des pressions transmembranaires supérieure et de ce fait des pressions d'alimentations supérieure.

L'effet de la variation du taux de conversion sur la pression d'alimentation est représenté dans le tableau (V.3) et la figure (V.4)

Tableau V.3: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

T.C (%)	pression d'alimentation (bar)			
	E11	E14	E16	E110
10	30,1	30,0	29,8	30,9
20	35,7	35,4	35,7	36,5
30	42,1	41,6	42,2	43,0
40	50,0	49,3	50,2	51,1

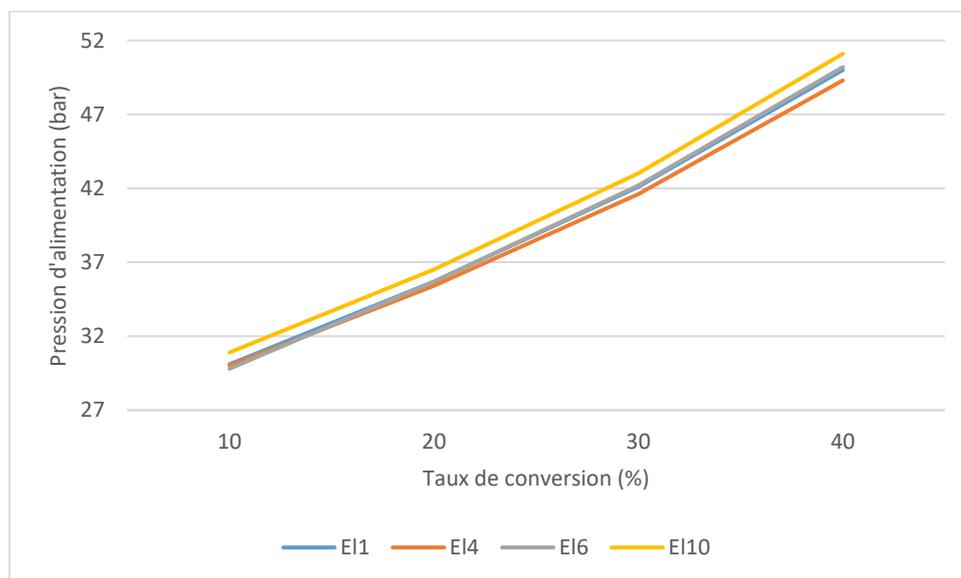


Figure V.4 : variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW.

Selon la figure (V.4), l'augmentation de taux de conversion de 10 à 40 % induit une augmentation de la pression d'alimentation. On remarque que la variation de la pression d'alimentation en fonction du taux de conversion est quasiment similaire pour les quatre membranes RO-SW sélectionnées, la pression varie d'approximativement de 30 à 50 bar lorsque le taux de conversion augmente de 10 à 40%. Il est à noter que dans cette gamme de taux de conversion, la variation entre la pression et le taux de conversion semble quasiment linéaire.

d- Effet sur l'énergie spécifique

La consommation de L'énergie spécifique (KWh par m³) est l'un des paramètres les plus importants qui permet d'évaluer l'efficacité du processus de traitement d'eau. La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs inhérents à toute la ligne du processus de traitement d'eau. Dans l'absolu et dans notre cas d'étude l'énergie spécifique calculer, dépends de la section principale de l'unité de traitement d'eau c.à.d. la pompe d'alimentation et les trains des membranes RO.

Dans ce cas précis l'énergie spécifique est calculer sur la base de la relation suivante :

$$SEC = \frac{1-R}{R} (\Delta P) + (P_f - P_0) \quad \text{Equation (V.1)}$$

Avec :

R : le taux de conversion

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

P₀ : pression du permeat

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

Sachant que le facteur de conversion est :

1 KWh/m³ correspond à 3.6.10⁶ Pascal

Tableau V.4: Energie spécifique en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

Energie spécifique en (KWh/m ³)				
T.C (%)	E11	E14	E16	E110
10	10,48	10,38	10,67	10,89
20	6,20	6,12	6,31	6,53
30	4,88	4,79	4,96	5,23
40	4,35	4,29	4,42	4,70

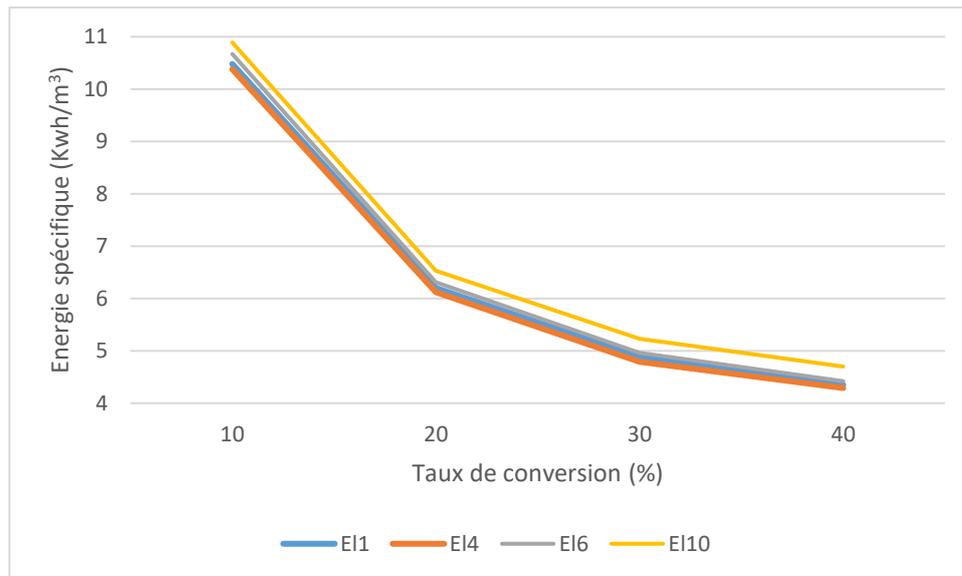


Figure V.5: variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW.

Selon La figure (V.5), on remarque une nette diminution de l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion, ceci est concordance avec l'équation (V.1). La tendance de variation de l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion est sensiblement similaire a toutes les membranes sélectionnées de plus les valeurs sont relativement proche soit une variation approximative de 10.89 à 4.70 kWh/m³ lorsque le taux de conversion augmente de 10 à 40%.

Il est a noté quand même qu'on remarque une proportionnalité entre la pression d'alimentation et l'énergie spécifique pour chaque membrane.

Dans le cas d'une configuration basique avec un seul pas et un seul étage la qualité d'eau obtenue ne réponds aux objectifs fixés d'une de qualité ultra-pure pour servir les objectifs de la production d'hydrogène par électrolyse. En effet, on notera que le TDS obtenu et ce quel que soit la membrane RO-SW sélectionnée est supérieure à 190 mg/l correspondant à une conductivité de 0,402 μ S/cm. Afin de réduire encore plus le TDS il est nécessaire de passer à une configuration deux passes cette étape est présentée dans la section suivantes.

V.2.2. Variation du taux de conversion : double passes et un seul étage

La figure ci-dessous représente le schéma d'une configuration à double passes et un seul étage utilisé pour la simulation de la variation du taux de conversion sur les différents paramètres (TDS, Conductivité, Pression d'alimentation et énergie spécifique)

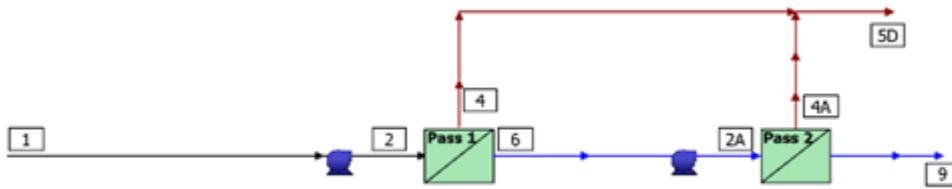


Figure V.6: configuration 2 passe pour la sélection des membranes RO. (1) L'eau brut, (2) l'eau sous pression d'alimentation 'pass1', (4) retentât, (6) permeat, (2A) l'eau sous pression d'alimentation 'pass2', (4A) retentât 'pass2', (9) produit net, (5D)

Un « pass » doit être considéré comme un système RO autonome. La différence entre un système RO à passage unique et un système RO à double passage est qu'avec un RO à double passage, le permeat du premier passage devient l'eau d'alimentation du deuxième passage (ou deuxième RO) qui finit par produire un permeat de bien meilleure qualité. Car il est essentiellement passé par deux systèmes RO.

Il est important de mentionner que le taux de conversion dans le premier passe est fixé à 40%, et que la variation du taux de conversion de 40 à 70 % ne concerne que le deuxième passe.

Tableau V.5: le nombre d'élément et le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO-SW pour traiter un débit de 1000m³/jour (2 pass & 1 stage)

Eléments	Nom commercial	Débit en m ³ /jour	Nombre d'éléments (1pass)	Nombre d'éléments (2pass)	Nombre de PV (2 passe)
EI1	sw30XFR-400/34	28.3	848	342	57
EI4	Sw30HR-380	22,6	1020	1426	71
EI6	Sw30-2540	2.6	9231	3696	616
EI10	SW30XLE-440	37,4	641	258,0	43

Le tableau (V.5) représente le nombre d'élément nécessaire pour traiter un débit de 1000m³/h d'eau de mer, pour un taux de conversion de 40% pour chaque passe. Il est clair que le nombre d'élément nécessaire dans la deuxième passe est plus faible par rapport au premier passe, ceci est due au fait que le débit d'eau entrant dans le 2ème passe est de 400 m³/h sachant que le taux de conversion est de 40%.

La surface active de chaque membrane est le paramètre qui influe sur le débit maximal et donc sur le nombre de membrane. Pour une meilleure appréciation de l'ampleur de la variation du

nombre de membrane nécessaire dans chaque passe et pour le différent type de membranes, les résultats sont compilés sur un histogramme dans la figure (V.7).

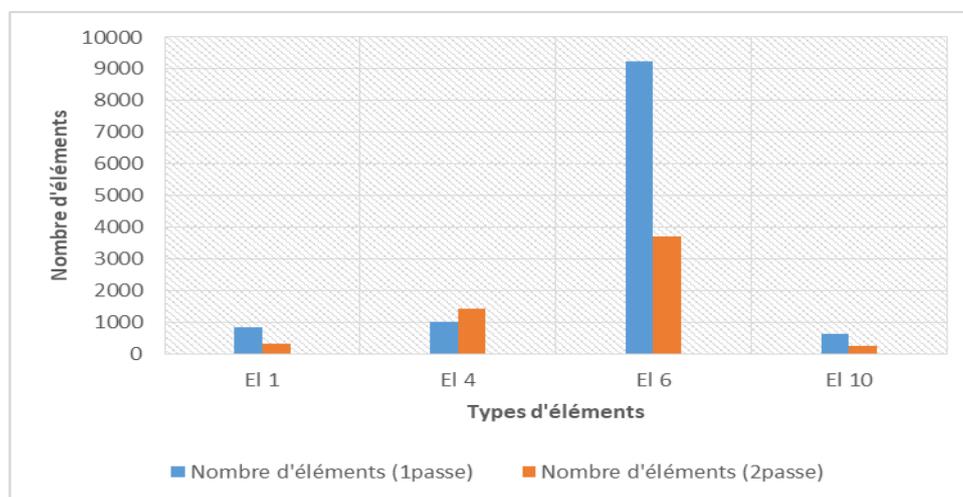


Figure V.7: Histogramme du nombre d'éléments nécessaire pour 1000m3/h (2 pass & 1stage)

a- Effet sur la salinité du permeat

Les résultats de l'effet de la variation du taux de conversion sur le TDS du permeat sont compilés dans le tableau V.6 et la figure V.8

Tableau V.6 : TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

Total dissolved solids (TDS) en (mg/l)				
TC	EI1	EI4	EI6	EI10
40	2,53	4,45	11,17	2,28
50	2,32	4,03	10,12	2,08
60	2,24		9,72	1,99
70			9,89	2,01

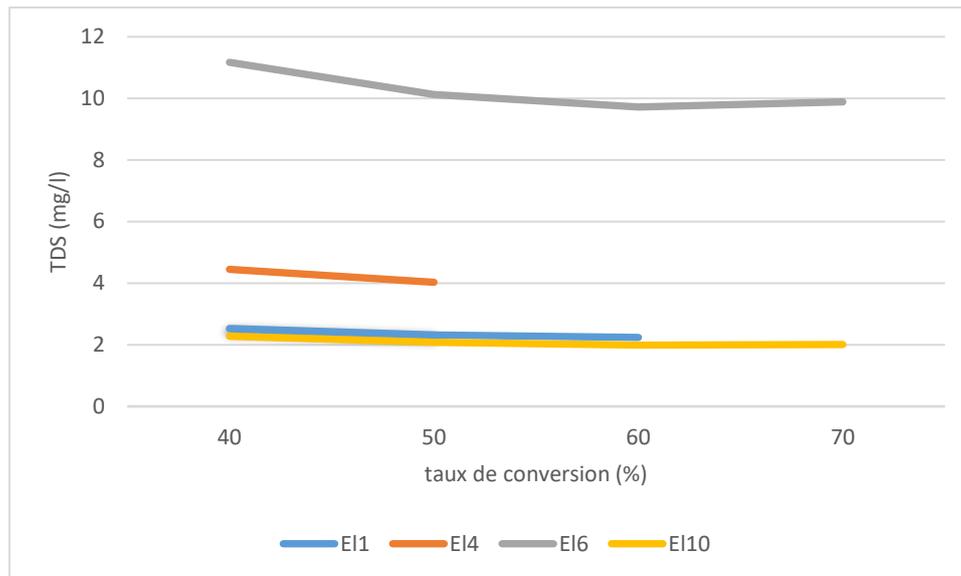


Figure (V.8) : variation du TDS en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW

Le deuxième passage permet d'obtenir un TDS de perméat finale qui est exceptionnellement faible, en effet selon le tableau V.6 et la figure (V.8), on remarque le TDS le plus faible est obtenu par l'élément 10 (SW30XLE-440) avec une valeur aux alentours de 2 mg/l. Dans le même sillage on notera qu'à ce stade, le taux de conversion n'a que très peu d'influence sur le TDS. L'élément 6 (Sw30-2540) représente le TDS le plus élevée qui varie de 11,17 à 9,7 mg/l selon le taux de conversion. Les éléments E4 et E11 ne peuvent atteindre un taux de conversion supérieure à respectivement 50 et 60%.

La membrane E10 représente des avantages supérieurs aux autres membranes de types RO-SW sélectionnées, en effet elle permet d'atteindre le plus faible TDS possible et peut résister à des taux de conversion allant jusqu'à 70% dans une deuxième passe.

b- Effet sur la conductivité du perméat

Selon l'équation (IV.3), la conductivité change proportionnellement au TDS, ce qui signifie que la tendance de la conductivité en fonction du taux de conversion est proportionnellement similaire à celle du TDS en fonction du taux de conversion. Les résultats sont résumés dans le tableau V.7 et la figure V.9.

Tableau V.7 : conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

TC	Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)			
	E11	E14	E16	E110
40	0,005	0,089	0,022	0,05
50	0,005	0,008	0,020	0,004
60	0,004		0,019	0,004
70			0,020	0,004

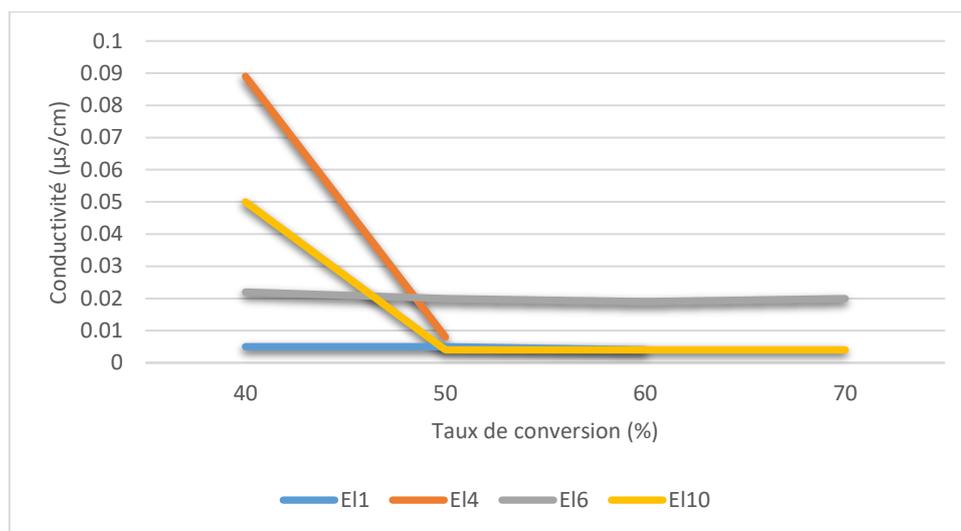


Figure V.9 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW

c- Effet sur la pression d'alimentation

L'effet de la variation du taux de conversion sur la pression d'alimentation est représenté dans le tableau (V.8) et la figure (V.10)

Tableau V.8: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

T C %	Pression d'alimentation (bar)			
	E11	E14	E16	E110
40	7,1	7,4	8,1	8,6
50	8,8	9,1	9,9	10,6
60	10,6		11,7	12,7
70			13,6	14,9

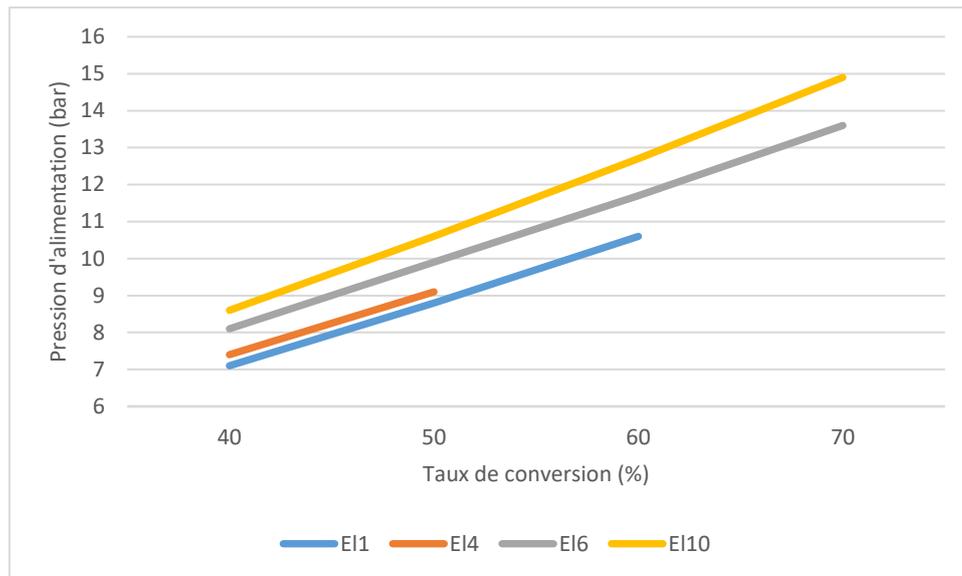


Figure V.10: variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW

Selon la figure (V.10), l'augmentation de taux de conversion de 40 à 70 % résultant une augmentation de la pression d'alimentation. La pression varie d'approximativement de 8.6 à 14.9 bar lorsque le taux de conversion augmente de 40 à 70%. Il est à noter que dans cette gamme de taux de conversion, la variation entre la pression et le taux de conversion semble quasiment linéaire.

d- Effet sur l'énergie spécifique :

Table V.9 : Energie spécifique en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

Taux de conversion %	l'énergie spécifique (KWh/m ³)			
	E11	E14	E16	E110
40	0,62	0,64	0,71	0,75
50	0,61	0,63	0,69	0,74
60	0,61		0,68	0,74
70			0,68	0,74

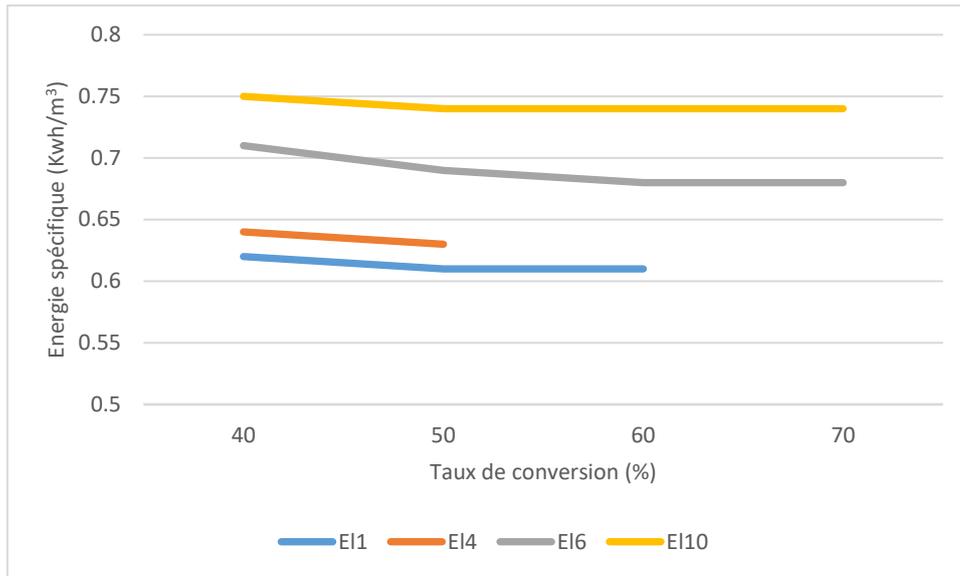


Figure V.11 : variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-SW

Selon La figure (V.11), on remarque une diminution de l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion. La tendance de variation de l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion est sensiblement similaire a toutes les membranes sélectionnées de plus les valeurs sont relativement proche soit une variation approximative de 0.61 à 0.75 kWh/m³ lorsque le taux de conversion augmente de 40 à 50%.

Dans le cas d'une configuration double passes et un seul étage, on notera que le TDS obtenu et ce quel que soit la membrane RO-SW sélectionnée est inférieure à 2.24 mg/l correspondant à une conductivité de 0,004 µS/cm.

V.2. Eau de rejet :

V.2.1. Variation du taux de conversion : un seul pass et un seul étage

Les taux de conversion choisis sont de 10, 20, 30 et 40%, il est a noté qu'au-delà de 40% les pressions d'alimentation appliquées sur les membranes deviennent supérieures à la limite des membranes sélectionnées. De ce fait le logiciel nous indique un system warning et ce qui signifie des difficultés à convergés les résultats.

a- Effet sur la salinité du permeat

Les résultats de l'effet de la variation du taux de conversion sur le TDS du permeat sont compilés dans le tableau (V.10) et la figure (V.12).

Tableau V.10: TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

TC(%)	Total dissolved solids			
	EI 5*	EI 6*	EI 9*	EI 11*
10	36,00	94,57	712,8	35,32
20	21,11	55,76	666,8	20,52
30	16,10	41,97	629,4	15,73
40	13,87	35,56	605,7	13,63

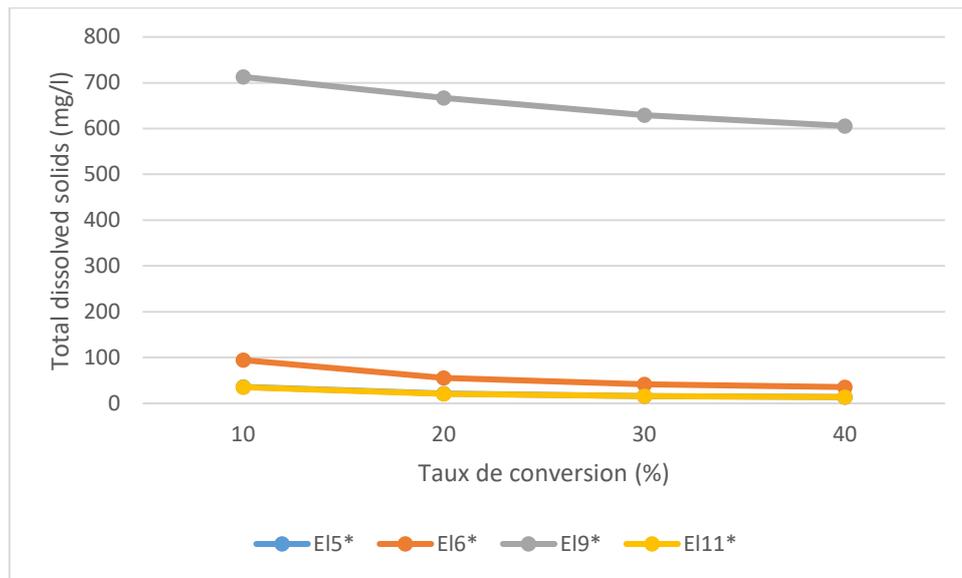


Figure V.12 : variation du TDS en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-BW

Selon la figure (V.12), l'augmentation du taux de conversion de 10 à 40 % induit à une variation du TDS de 36 mg/l à 13.87mg/l et 712.8 mg/l à 605.7 mg/l respectivement pour les membranes EI5* et EI9*. D'un autre côté, on remarque que les deux membranes EI5* et EI11* sont sensiblement similaire en terme de valeur et de variation du TDS en fonction du taux de conversion. Notons aussi que la variation du TDS est d'autant plus importante lorsque le taux de conversion varie entre 10 et 20%, la variation du TDS semble moins importante lorsque le taux de conversion dépasse les 30%.

La membrane qui démontre le plus faible autrement la plus performante en termes de réduction du TDS du permeat est la membrane EI*11 et la EI*5 (Fortilife™ CR100 et BW30HR-440i).

b- Effet sur la conductivité du permeat

La conductivité varie de manière proportionnelle avec le TDS cela signifie que la tendance de variation de la conductivité en fonction du taux de conversion est sensiblement similaire à celle de la variation du TDS en fonction du taux de conversion. Les résultats sont compilés dans le tableau (V.11) et la figure (V.13).

Tableau V.11: conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.

TC (%)	Conductivité (µs/cm)			
	EI 5*	EI 6*	EI 9*	EI11*
10	0,072	0,189	1,426	0,071
20	0,042	0,112	1,334	0,041
30	0,032	0,084	1,259	0,031
40	0,028	0,071	1,212	0,027

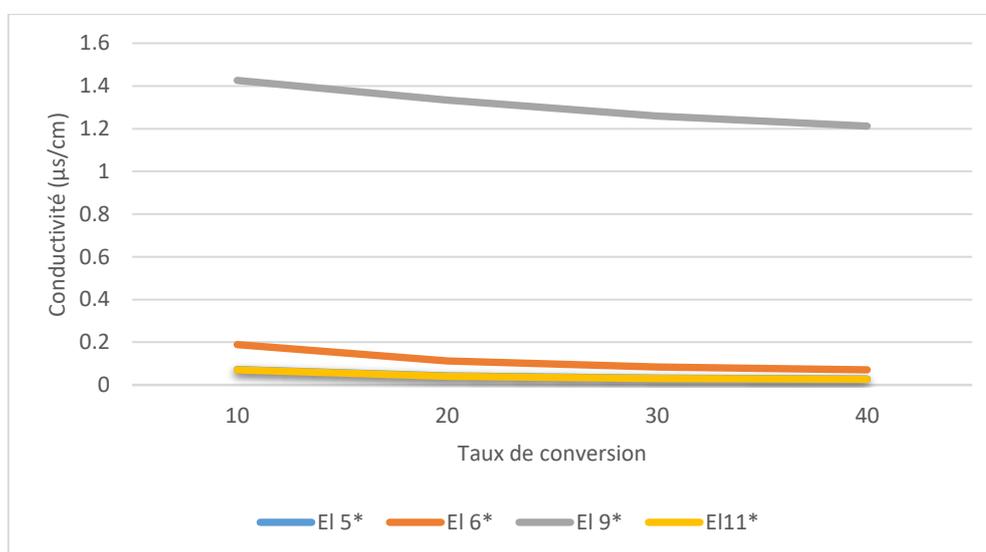


Figure V.13 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-BW

c- Effet sur la pression d'alimentation :

L'effet de la variation du taux de conversion sur la pression d'alimentation est représenté dans le tableau (V.12) et la figure (V.14)

Tableau V.12: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-BW sélectionnées

Pression d'alimentation (bar)				
TC(%)	El 5*	El 6*	El 9*	El 11*
10	3,1	2,0	1,2	2,3
20	4,2	2,8	1,6	3,4
30	5,4	3,6	2,0	4,7
40	6,6	4,4	2,4	6,0

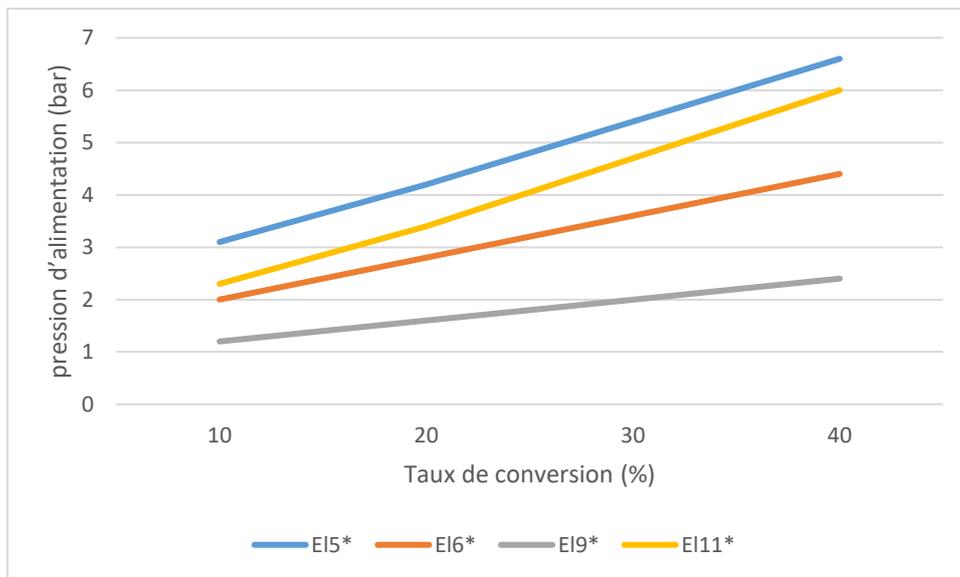


Figure V.14 : variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-BW

Selon la figure (V.14), l'augmentation de taux de conversion de 10 à 40 % se traduit par une augmentation de la pression d'alimentation. On remarque que la tendance de variation de la pression d'alimentation en fonction du taux de conversion est quasiment similaire pour les quatre membranes RO-BW sélectionnées. La membrane El*9 présente la pression d'alimentation la plus faible sur toute la gamme de variation du taux de conversion contrairement à la membrane El*5 qui exhibe une pression d'alimentation la plus élevée. Il est

a noté que dans cette gamme de taux de conversion, la variation entre la pression et le taux de conversion semble quasiment linéaire.

d- Effet su l'énergie spécifique :

La consommation de L'énergie spécifique (KWh par m³) est l'un des paramètres les plus importants qui permet d'évaluer l'efficacité du processus de traitement d'eau. La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs inhérents à toute la ligne du processus de traitement d'eau. Dans l'absolue et dans notre cas d'étude l'énergie spécifique calculer, dépends de la section principale de l'unité de traitement d'eau c.à.d. la pompe d'alimentation et les trains des membranes RO.

Tableau V.13 : l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées.

Energie spécifique en (KWh/m ³)				
TC(%)	EI 5*	EI 6*	EI 9*	EI 11*
10	1,07	0,70	0,40	0,79
20	0,73	0,48	0,27	0,60
30	0,62	0,41	0,23	0,54
40	0,58	0,38	0,21	0,52

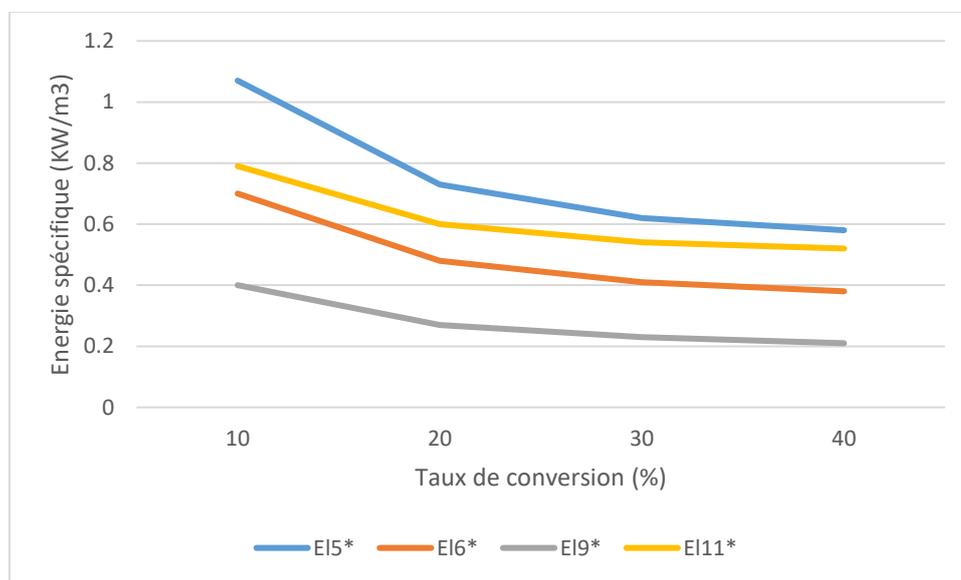


Figure V.15: variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion (configuration 1) pour les membranes RO-SW

Selon la figure (V.15), on note une variation relativement faible de l'énergie spécifique en fonction de la variation du taux de conversion et ce pour chaque membrane, on revanche il

existe un certain contraste de l'énergie spécifique entre les différentes membranes. En effet la membrane EI*5 démontre une consommation d'énergie spécifique la plus élevée qui est aux alentours de 1,07-0.55 kWh/m³, d'un autre coté la membrane EI*9 démontre une meilleure efficacité énergétique par rapport aux autres membranes.

V.2.2. Variation du taux de conversion : double passes et un seul étage

Le même schéma représentatif d'un double passe et un seul étage vu précédemment dans le cas de traitement de l'eau de mer est repris dans ce cas.

Le tableau (V.14) représente, le nombre d'éléments (membranes) de type RO-BW nécessaire dans chaque passe ainsi que le nombre de PV pour traiter un débit de 1000 m³/h d'eau de rejet

Tableau V.14 : le nombre d'élément et le nombre de tube de pression nécessaire pour chaque membrane RO-BW pour traiter un débit de 1000m³/jour (2 pass & 1 stage)

Eléments	Nom commercial	Débit en m ³ /jour	Nombre d'ELS		Nombre de pv Passe 2
			Passe 1	Passe 2	
El 5*	BW30HR-440 i	48	500	200	34
El 6*	BW30XFRLE-400/34i	43,5	552	221	37
El 9*	NF270-400/34i	47	540	205	35
El 11*	Fortilife™ CR100	43,5	559	221	37

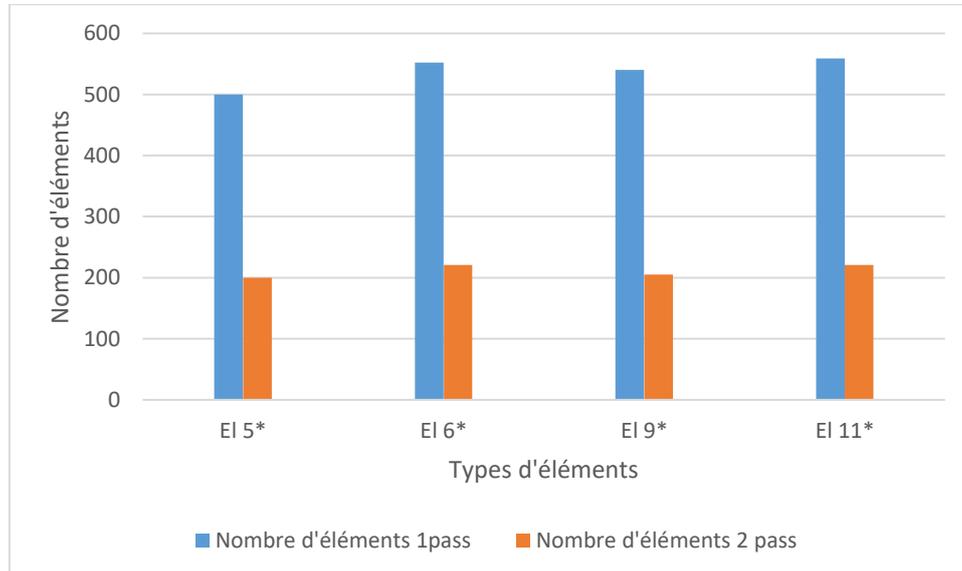


Figure V.16: Histogramme du nombre d'éléments nécessaire pour 1000m³/h (1 pass & 2 pass)

Le nombre de membranes dans chaque passe est illustré sous forme d'histogramme dans la figure (V.16)

a- Effet sur la salinité du permeat

Les résultats de l'effet de la variation du taux de conversion sur le TDS du permeat sont compilés dans le tableau (V.15) et la figure (V.17)

Tableau V.15 : TDS en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-SW sélectionnées

TC(%)	TDS (mg/l)			
	El 5*	El 6*	El 9*	El 11*
40	1,68	8,11	430,9	2,17
50	1,61	7,51	422,7	2,06
60	1,57	7,23	421,9	2,00
70	1,56	7,22	429,4	1,99

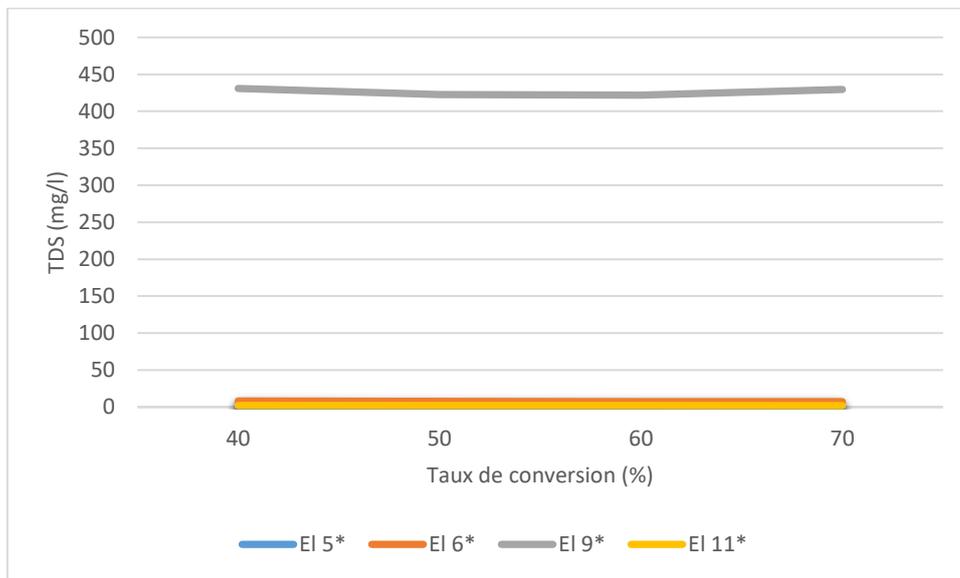


Figure V.17 : variation du TDS en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW

Selon la figure (V.17), la variation du taux de conversion de 40 à 70 % résultant à une variation du TDS de 8.11 mg/l à 7.22mg/l et 430.9 mg/l à 429.4 mg/l respectivement pour les membranes El6* et El9*. D'un autre côté, on remarque que les deux membranes El5* et El6* et El11* sont sensiblement similaire en terme de valeur et de variation du TDS en fonction du taux de conversion.

Les membranes El*5 et El*11 représente un taux de salinité très faible du permet finale ($\approx 1,6$ mg/l) en comparaison avec la membrane El*9 dans le TDS est supérieure à 400 mg/l.

l'une des remarques les plus importante est que le TDS ne subit qu'une très faible variation lorsque le taux de conversion du 2^{ème} passe varie entre 40 et 70%.

b- Effet sur la conductivité du permeat

Les résultats sont compilés dans le tableau (V.16) et la figure (V.18).

Tableau V.16: conductivité en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-BW sélectionnées

T.C (%)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
	EI 5*	EI 6*	EI 9*	EI 11*
40	0.003	0.016	0.862	0.004
50	0.003	0.015	0.845	0.004
60	0.003	0.014	0.844	0.004
70	0.003	0.014	0.859	0.003

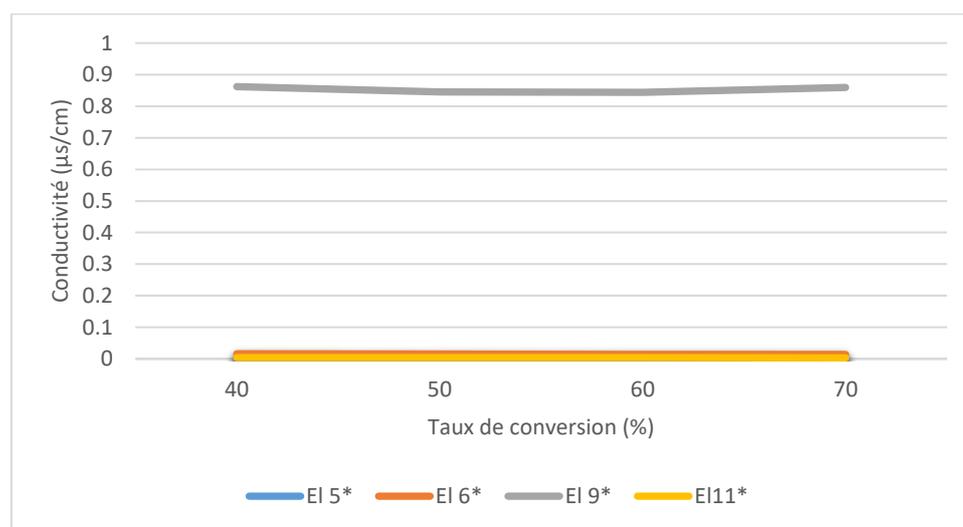


Figure V.18 : variation de la conductivité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW

Il est a noté, que la conductivité semble constante en fonction du taux de conversion.

c- Effet sur la pression d'alimentation

L'effet de la variation du taux de conversion sur la pression d'alimentation est représenté dans le tableau (V.17) et la figure (V.19)

Tableau V.17: pression d'alimentation en fonction du taux de conversion pour les membranes RO-BW sélectionnées

TC(%)	El 5*	El 6*	El 9*	El 11*
40	5,0	3,1	2,1	4,4
50	5,9	3,7	2,5	5,5
60	6,9	4,4	2,9	6,6
70	8,0	5,0	3,3	7,8

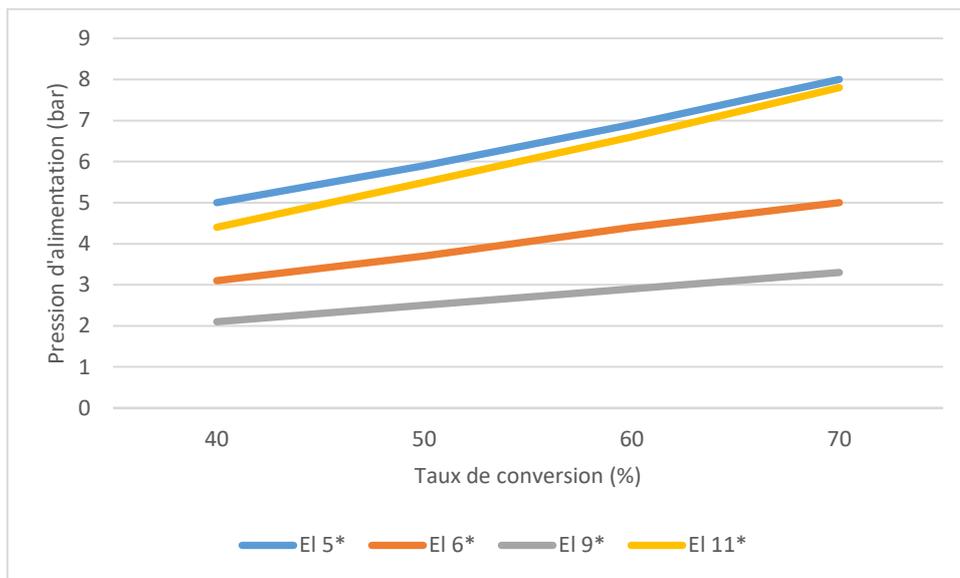


Figure V.19 : variation de la pression d'alimentation en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW

Selon la figure (V.19), l'augmentation de taux de conversion de 40 à 70% se traduit une augmentation de la pression d'alimentation. La pression varie d'approximativement de 5 à 8 bar lorsque le taux de conversion augmente de 40 à 70%. Il est a noté que dans cette gamme de taux de conversion, la variation entre la pression et le taux de conversion semble quasiment linéaire.

d- Effet su l'énergie spécifique

Tableau V.18 : l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW

TC(%)	l'énergie spécifique (KWh/m ³)			
	El 5*	El 6*	El 9*	El 11*
40	0,43	0,27	0,19	0,39
50	0,41	0,26	0,17	0,38
60	0,40	0,25	0,17	0,38
70	0,40	0,25	0,16	0,39

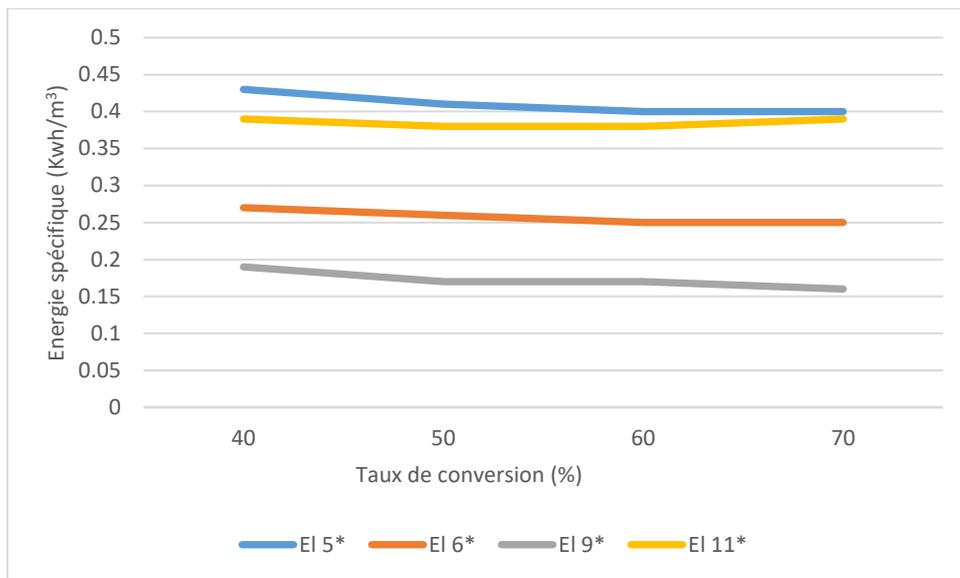


Figure V.20 : variation de l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW

Selon La figure (V.20), on remarque une diminution de l'énergie spécifique en fonction du taux de conversion. De plus les valeurs sont relativement proche soit une variation approximative de 0.43 à 0.40 kWh/m³ et de 0.19 à 0.16 KWh/m³ respectivement pour les membranes EI5* et EI9*. Lorsque le taux de conversion augmente de 40 à 70%.

Il est a noté quand même qu'on remarque une proportionnalité entre la pression d'alimentation et l'énergie spécifique pour chaque membrane.

Dans le cas d'une configuration double passes et un seul étage, on notera que le TDS obtenu et ce quel que soit la membrane RO-SW ou RO-BW sélectionnées est inférieure à 2,24 mg/l correspondant à une conductivité de 0,004 μS/cm.

CHAPITRE VI : COMPARAISON

VI.1.Introduction

Dans le chapitre V, nous avons pu atteindre un TDS finale correspondant à une eau de qualité ultra-pure uniquement dans le cas d'une configuration à double passe et un seul étage et ce pour l'eau de mer ainsi que l'eau de rejet. Dans la section qui suit, il s'agit de comparer les paramètres principaux de TDS, Pression d'alimentation et énergie spécifique dans le cas d'un traitement d'eau de mer et d'eau de rejet en vue d'obtenir une eau de qualité ultra-pure.

Dans chaque cas (eau de mer RO-SW et eau de rejet RO-BW) une membrane a été sélectionnée sur la base de l'efficacité de réduction du TDS finale démontré lors des travaux du chapitre V.

Ci-dessous les membranes sélectionnées concernant l'eau de mer (RO-SW) et l'eau de rejet (RO-BW).

- Membrane type RO-SW : SW30XLE-440 (Elément 10)
- Membrane type RO-BW : BW30HR-440i (Elément 5*)

VI.2. Dimensionnement des unités : eau de mer et eau de rejet

Dans un premier temps il s'agit de comparer la taille de l'unité de traitement d'eau de mer et d'eau de rejet pour traiter un débit de 1000m³/h. le dimensionnement tel que décrit dans le tableau VI.1 est basée sur une le nombre de membranes dans le premier, la deuxième passe ainsi que le nombre total de membranes et de PV. Les taux de conversion choisie dans ce cas précis sont de 40% et 70% respectivement pour le premier et la deuxième passe.

Tableau VI.1 : nombre d'élément en fonction type d'élément pour les membranes RO-BW et RO-SW

Type d'eau	Membrane sélectionnée	Passe 1	Passe 2	Totale	PV
Eau de mer	SW30XLE-440 (Elément 10)	641	258	899	150
Eau de rejet	BW30HR-440i (Elément 5*)	500	200	700	117

Selon le tableau VI.1. Pour de traiter un débit de 1000 m³/h il est nécessaire d'établir une unité de traitement d'eau de mer constitué d'au moins 899 membranes de type SW30XLE-440 dans le système RO cumulé (1 pass & 2 pass) ce qui correspond à 150 tubes de pression.

En revanche dans le cas d'une unité dédiée au traitement d'eau de rejet avec un débit de 1000m³/h le système RO doit être constitué de 700 membranes de type BW30HR-440i correspondant à un de 117 PV tube de pression.

Dans cette étape Il est utile de conclure que l'unité dédiée à un traitement d'eau rejet est plus économique en termes de nombre d'élément, et facto en nombre de PV et ce pour un même débit d'alimentation (1000m³/h) et de taux de conversion de 40 et 70% respectivement pour le premier et le deuxième passe.

VI.3 TDS finale :

Rappelons que l'objectif principal de ce travail est d'aboutir à une eau de qualité ultra-pure dédiée à la production d'hydrogène par électrolyse. Une eau ultra-pure qui se traduit par une salinité extrêmement faible (aux alentours de quelques ppm), il est judicieux dans ce cas de comparer les deux systèmes optimisés de traitement d'eau de mer et d'eau de rejet en terme de réduction du TDS finale en fonction du taux de conversion du deuxième passe.

Les résultats de la variation du TDS en fonction du taux de conversion sont compilés dans le tableau (VI.2) et (VI.1)

Tableau VI.2 : salinité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW et RO-SW

TC %	TDS (mg/l)	
	El 10	El 5*
40	2,28	1,68
50	2,08	1,61
60	1,99	1,57
70	2,01	1,56

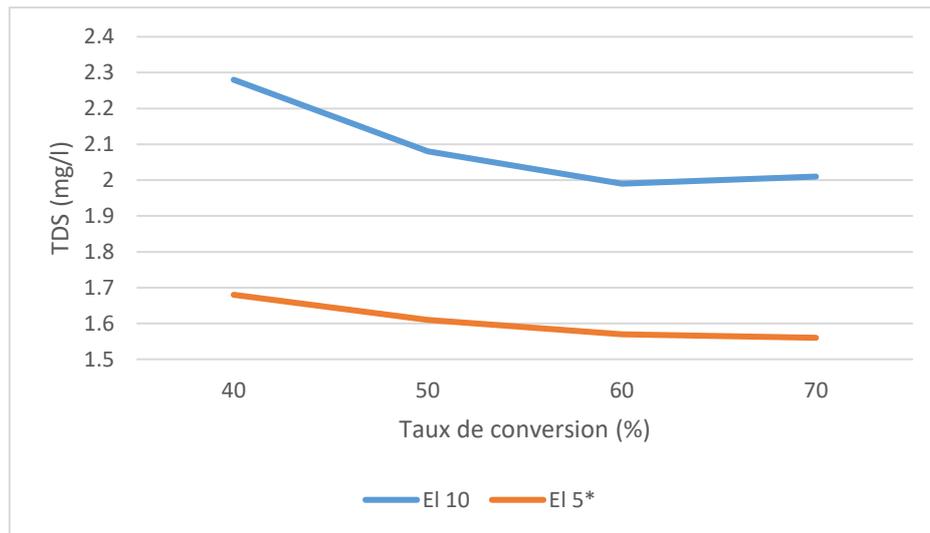


Figure VI.1: variation de salinité en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW et RO-SW

Ces résultats mettent en lumière le fait que le TDS finale ne varie que très peu (négligeable) en fonction du taux de conversion et ce dans le cas des deux systèmes de traitement d'eau de mer et d'eau de rejet. En comparant les valeurs, on remarque une légère différence de la salinité finale qui est de approximativement 2,1 et 1,6 mg/l (0,004 et 0,003 $\mu\text{S}/\text{cm}$) respectivement pour l'unité de traitement d'eau de mer et d'eau de rejet, ceci reflète clairement une efficacité remarquable des unités à produire une eau de qualité ultra-pure par le choix de membranes adéquate et une configuration a deux passes et un seul étage.

VI.4. La Pression d'alimentation :

La pression d'alimentation est un paramètre qui permet de contre balancer la pression osmotique de l'eau de mer et l'eau de rejet, elle dépend fortement de la salinité initiale de l'eau d'alimentation. Etant donné qu'il y a fort contraste de salinité entre l'eau de mer (35 g/l) et l'eau de rejet (1 g/l) ceci se répercute forcément sur un grand contraste de pression d'alimentation, les pressions d'alimentations dans le 1^{er} et 2^{ème} passe pour chacun les deux systèmes RO (eau de mer et eau de rejet) pour des taux de conversion respectivement de 40 et 70% sont compilés le tableau ci-dessous.

Tableau VI.3 : pression d'alimentation pour les deux systèmes RO

Type d'eau	Membrane	Pression d'alimentation (bar)	
		Passe 1 (R=40%)	Passe 2 (R=70%)
<i>Eau de mer</i>	SW30XLE-440 (Elément 10)	51,1	14,9
<i>Eau de rejet</i>	BW30HR-440i (Elément 5*)	6,6	8,0

Le traitement d'eau de mer requière une pression d'alimentation nettement supérieure à celle de l'eau de rejet et ce principalement dans le cas du premier passe (51,1 contre 6,6 bar), on revanche les pressions d'alimentation tendent à se rapproché dans le cas dans le cas du 2éme passe. Ceci est dû au faite que la salinité de l'eau d'alimentation au niveau du 2éme passe a été fortement réduite dans le 1^{er}. D'un autre coté la pression d'alimentation dans le cas du système eau de rejet du 2éme passe est supérieure a celle du premier ceci est dû à une augmentation du taux de conversion de 40% à 70%.

VI.5 Energie spécifique :

En dernier lieu, il est nécessaire de comparer la consommation énergétique des deux systèmes RO pour le traitement de l'eau de mer et de l'eau de rejet afin d'obtenir une eau de qualité ultra-pure.

Tableau VI.4 : l'énergie spécifique en fonction de taux de conversion pour les membranes RO-BW et RO-SW

Type d'eau	Membrane	Energie spécifique (kWh/m ³)	
		Passe 1 (R=40%)	Passe 2 (R=70%)
<i>Eau de mer</i>	SW30XLE-440 (Elément 10)	4,45	0,74
<i>Eau de rejet</i>	BW30HR-440i (Elément 5*)	0,58	0,4

Selon le tableau VI.4 le système RO de traitement de l'eau mer est nettement plus énergivore que celui du traitement d'eau de rejet 4,45 contre 0,58 kWh/m³ et dans le premier passe et 0,74 contre 0,4 kWh/m³ dans le deuxième passe. Ceci principalement due à la pression d'alimentation du système RO eau de mer qui est nettement supérieur a celui de l'eau de rejet

et par conséquent une consommation nettement supérieure. A ce stade et en terme de viabilité économique énergétique, le traitement par un système RO de l'eau de rejet semble plus approprié que celui de l'eau de mer pour la production d'eau de qualité ultra-pure dédiée à production d'hydrogène par électrolyse.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence une étude de faisabilité et de comparaison de production d'une eau de qualité ultra pure (2-3 mg/l) à partir d'une eau de mer (35g/l) et une eau de rejet clarifiée (1g/l) par logiciel de simulation WAVE. La première étape étant l'identification des membranes RO (24 membranes de RO-SW et RO-BW) dans le cas du traitement de l'eau de mer et de l'eau de rejet suivie de la détermination du nombre d'éléments nécessaire pour traiter un débit d'alimentation de 1000m³/h.

Les résultats obtenues démontrent clairement la possibilité d'obtenir une eau de qualité ultra-pure (inférieure à 2 ppm) et ce dans les deux cas (eau de mer et eau de rejet), La possibilité d'atteindre cette qualité d'eau n'est possible que par le choix d'une membrane de type SW30XLE-440 (Elément 10) pour l'eau de mer et une membrane de type BW30HR-440i (Elément 5*) pour l'eau de rejet.

La configuration de l'unité de traitement opté dans les deux cas, est une configuration à double passe et un seul étage, le fait est qu'il est impossible d'atteindre une eau de qualité ultra-pure avec une configuration minimaliste à un seul passe. Les principales différences entre l'unité de traitement de d'eau de mer et d'eau de rejet, réside premièrement dans la taille de l'unité, autrement dit le nombre d'éléments nécessaire pour traiter un débit de 1000m³/h, en effet dans le cas de l'eau mer le nombre d'éléments est de 899 contre 700 pour l'eau de rejet. D'un autre coté le traitement de l'eau de mer requière une énergie spécifique bien plus supérieure à celle de l'eau de rejet.

En conclusion, le choix de la source d'eau est vrai semblablement lié à un compromis de viabilité technico-économique et de disponibilité de l'eau d'alimentation

PERSPECTIVES

Les résultats primaires de cette étude n'ont permis que de mettre en évidence la possibilité de produire une eau de qualité ultra-pure par un système d'osmose inverse, à partir d'une eau de mer et une eau de rejet, en mettant en avant une comparaison paramétrique de la salinité finale, des pressions d'alimentation et l'énergie spécifique.

Les perspectives restent nombreuses pour la suite du travail, il est nécessaire de prendre en considération le prétraitement des différents type d'eau (eau de mer et eau de rejet) en prenant en compte une étude technico économique plus poussé de toute la ligne de traitement suivie d'un benchmark des différents fournisseurs de membranes. Dans le même sillage, il serait intéressant de poursuivre l'étude avec un approfondissement de la qualité minimale nécessaire pour la production d'eau ultra-pure afin de minimiser un surdimensionnement des unités de traitement RO.

Enfin l'enjeu de la production d'hydrogène pour la garantie de la sécurité énergétique est très important et la qualité d'eau représente le jalon primaire de cette opération, une fédération des efforts multidisciplinaire avec des partenaires socio-économique est impérative pour la réussite de ce défi.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] PHILIPPE Aptel, (2003) « Techniques de l'ingénieur », (OI, NF, UF) application en traitement des eaux, W4120
- [2] Rejsek, F. (2002) Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques. Scéren (CRDP AQUITAINE). Coll. Biologie technique. Sciences et techniques de l'environnement.
- [3] Bessiere, Y., Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtré critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage, thèse de l'Université Paul-Toulouse III, (2005).
- [4] Tamas, A.P., Etude du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface, Mémoire de l'Université Laval du Québec (Octobre 2001).
- [5] Causserand, C., Filtration membranaire (OI, NF, UF) – Caractérisation des membranes, Technique de l'ingénieur, Référence J2792, (Juin 2006).
- [6] <https://fc.univ-nantes.fr>
- [7] ANSELME et JACOB. (1996) Chapitre sur l'ultrafiltration du livre Water Treatment Membrane Processes, AWWA-Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa, édité par McGraw-Hill, New York, NY.
- [8] Maurel, A., Techniques séparatives à membranes, Techniques de l'ingénieur, J2, J2790 (Tome 1) 1993.
- [9] Duafin, G., F. René, P. Aimar, Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire, Collection Sciences et techniques agroalimentaires, Edition Lavoisier 1998, Paris.
- [10] Mohammadi, T., M. Kazemimoghadam, M. Saadabadi, Modeling of membrane fouling and flux decline in reverse osmosis during separation of oil in water emulsions, Desalination, 157 (2003) 369-375.
- [11] Aimar, P., P. Aptel, Membrane preparation, fouling emerging processes, fouling and process design, Récents progrès en génie des procédés, European Society of Membrane Science and Technology, (J. A. Howell, membrane application, Centre University of Bath).
- [12] Mallevialle, J., P. E. Ondndaal, M. R. Wiesner, Water treatment membrane process, American water works association, Lyonnaise des eaux, Mc Graw- Hill 1996.

- [13] <https://protec.pagesperso-orange.fr>
- [14] <https://fr.elgalabwater.com> > [eau-ultrapure](#)
- [15] <https://condorchem.com/fr/blog/eau-ultra-pure-electrodeionisation>
- [16] Rodrigo Rivera-Tinoco, Etude technico-économique de la production d'hydrogène à partir de l'électrolyse haute température pour différentes sources d'énergie thermique, Thèse l'école Nationale supérieure des mines de Paris 30 Mars 2009.
- [17] Khellal Bassim. Boudid fares, Etude d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque par électrolyse de l'eau, rapporteur : Dr a. ait Yala Master Université de Bouira 2015.
- [18] ANSELME et JACOB. (1996) Chapitre sur l'ultrafiltration du livre Water Treatment Membrane Processes, AWWA-Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa, édité par McGraw-Hill, New York, NY.
- [19] T. AUDICHON, "Synthèse et caractérisation de matériaux électrocatalytiques : activation anodique de l'eau dans un électrolyseur PEM", Thèse de doctorat, l'université de Poitiers UFR des sciences fondamentales et appliquées Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers - IC2MP (Diplôme National - Arrêté du 7 août 2006), École doctorale : Sciences pour l'environnement - Gay Lussac (La Rochelle) ,13-11-2014.
- [20] R. SCHMID, G. Strategist, M. Electrolysis for grid balancing. (2012).
- [21] I. RAHALI, "Optimisation du fonctionnement d'un électrolyseur à travers un convertisseur DC/DC" université Mohamed Khider, Biskra, 10-5-2017 pp 34-36.
- [22] W. DONITZ, E. Erdle, High-temperature electrolysis of water vapor-status of development and perspectives for application. Int. J. Hydrogen Energy 10, 291–295 (1985).
- [23] J.H. RUSSEL, L.J. Nuttall, A.P. Fickett, " Hydrogen generation by solid polymer electrolyte water electrolysis". Chem. Soc. Div. Fuel Chem. Prepr. 18, 24–40 (1973).
- [24] <https://sysmatec.ch>
- [25] <https://www.lenntech.fr>
- [26] <https://hmf.enseeiht.fr>

