



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
معهد الصيانة والأمن الصناعي



Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle  
**Département: Maintenance en Électromécanique**

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Électromécanique Industrielle

**Spécialité :** Électromécanique Industrielle

**Thème :**

# Etude des systèmes de dessalement et de récupérations de l'énergie dessalement

**Présenté et soutenu par :**

**Nom :** BOUKHALKHAL      **Prénom :** ABDELHAMID

**Nom :** CHOUDER LAHCEN HABIBE ERRAHMANE      **Prénom :** LAHCEN HABIBE  
ERRAHMANE

**Devant le jury composé de :**

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
TITEH Mouloud	MAA	IMSI- Univ. Oran2	<b>Président</b>
AOUIER Yamina	MAA	IMSI-Univ. Oran2	<b>Examinateur</b>
HEROUZ KELTOUM	MAA	IMSI- Univ. Oran2	<b>Encadreur</b>

*Année 2021/2022.*

## *Dédicaces*

*A celle qui me compte dans ce monde, à celle qui a veillé sur nous toute sa vie et qui grâce à elle j'ai pu réaliser mes rêves, celle qui m'a poussé vers le chemin du savoir, à celle qui représente pour moi l'exemple du sacrifice, du dévouement et de l'honnêteté. Ma mère : la prunelle de mes yeux.*

*A celui qui a été une épaulé sur laquelle je me suis tant appuyée durant ces années de mes études pour arriver au niveau actuel. Mon père : le plus cher à mon cœur.*

*A mes chers parents : Pour leur amour, leur compréhension, leur patience, leur tendresse et leurs encouragements sont toujours pour moi sans limite, ils m'ont soutenu le long de mes études et ils ont sacrifié pour ma réussite, que dieu les préserve et les garde en bonne santé.*

*Mes chers sœurs et frères, que Dieu vous protège et vous offre un avenir radieux.*

*A tous mes ami(e)s spécialement At-tahir djaber, Dalila, et Zaggai Chaïma.*

*A toutes les personnes que j'ai aimées et qui m'ont aimé tout au long de ma vie.*

*Je dédie ce travail sur l'âme de ma deuxième mère « Mandeur Yamina », qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis.*

***ABD ELHAMID***

# *Dédicaces*

*Je dédie cette thèse à :*

*Mes parents qui m'ont beaucoup aidé pendant  
mes études, et*

*Il m'a beaucoup encouragé mentalement et  
émotionnellement.*

*Ils se sont sacrifiés pour moi tout au long de ma  
carrière*

*Les études de Dieu les protègent,*

*Toute ma famille, sans exception,*

*Tous mes chers amis de la résidence Belgaid (B53)*

*CHOUDEH Lahcen*

# *Remerciement*

*Tous d'abord nous remercions Allah notre créateur de nos avoir donné la force la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mme HARROUZ qui a proposé ce thème de mémoire pour ces conseils et ses dirigés, du début à la fin de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*Finalement nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenus et à tous ceux qui participent de la réalisation de ce mémoire, ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.*

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : Généralité sur le dessalement</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Historique .....	3
I.3 Historique du dessalement en Algérie.....	4
I.4 Généralité sur le dessalement de l'eau de mer .....	4
I.5 Principes de dessalement.....	5
I.5.1 Captation de l'eau de mer .....	5
I.5.2 Prétraitement .....	6
Coagulation –floculation.....	6
Coagulation .....	6
Floculation .....	7
Filtration.....	7
Traitement chimique .....	7
Filtration de sécurité ou microfiltration .....	7
<b>I.6 Techniques de dessalement</b> .....	8
I.6.1 Distillation .....	8
I.6.2 Distillation multi-flash.....	10
I.6.3 Distillation à multiples effets.....	10
I.6.4 Osmose inverse .....	10
I.7 Technologie des Membranes.....	14
I.7.1 Type des Membranes Selon Structure des Matériaux.....	15
I.7.2 Types des membranes selon la composition chimique .....	16
I.7.3 Durée de Vie des Membranes.....	17
I.8 Critères de choix d'un procédé de dessalement.....	17
I.8.1 Critères économiques.....	17
I.8.2 Critères techniques.....	18
I.8.3 Consommation énergétique des procédés de dessalement .....	18
I.8.4 Prix de l'eau produite par les différentes technologies de dessalement .....	19
I.9 Avantages de l'osmose inverse pour le dessalement d'eau de mer.....	20
I.10 Conclusion : .....	22

## ***Chapitre II: Récupération de l'énergie***

II.1 Introduction : .....	24
II.2 Evolution des systèmes de récupération : .....	25
II.3 Nécessité des systèmes de récupération : .....	26
II.4 Différents systèmes de récupération d'énergie : .....	26
II.4.1 Turbine : .....	26
II.4.2 Echangeur de pression : .....	28
II.4.3 Energie solaire et éolienne : .....	29
II.5 Couplage des procédés de dessalement membranaire et des technologies d'énergie renouvelable : .....	31
II.6 Modélisation du procédé d'osmose inverse .....	31
II.6.1 Installation classique d'osmose inverse.....	31
II.6.2 Installation avec récupération sur un turbo compresseur.....	32
II.6.3 Installation avec échangeur de pression.....	34
II.7 Conclusion .....	36

## ***Chapitre III : Etude Comparative des systèmes de récupération***

III.1 Introduction : .....	39
III.2 Turbine de Pelton : .....	40
III.2.1 Historique et conception : .....	40
III.2.2 Rendement à double creux : .....	41
III.3 Echangeur de pression : .....	43
III.3.1 Historique et conception : .....	43
III.3.2 Efficacité et mélange : .....	48
III.4 Conclusion .....	51
Conclusion générale .....	53
REFERENCES .....	54

## Liste des figures

Figure I.1. : Coagulation floculation. ....	6
Figure I.2. : Classification des procédés de dessalement .....	8
Figure I.3. : Dispositif expérimental de distillation .....	9
Figure I.4. : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse .....	11
Figure I.5. : Coupe d'une membrane d'osmose inverse.....	12
Figure I.6. : Fonctionnement du procédé d'électrodialyse.....	14
Figure II.1 : récupération de l'énergie du concentrat par turbine Pelton .....	27
Figure II.2. : turbo-pompe de récupération de l'énergie du concentrat.....	27
Figure II.3. : Principe de l'échangeur de pression .....	28
Figure II.4. Différentes combinaisons entre les technologies d'énergie renouvelable et procédés de dessalement .....	30
Figure II.5. : Schéma d'une installation classique.....	32
Figure II.6. : Installation avec turbocompresseur.....	33
Figure II.7. : Osmoseur SH62-928 équipé d'un turbo. ....	34
Figure II.8. : Installation avec échangeur de pression.....	35
Figure II.9. : Echangeur type PX 180 sur l'une des unités SLCE de 500 m3/jour. ....	36
Figure III.1 : Dessin de la roue de Pelton tiré du brevet original (octobre 1880) .....	40
Figure III.2. : Disposition de section d'une roue de Pelton.....	41
Figure III.3 : Vue éclatée de l'échangeur de pression.....	43
Figure III.4. : Echangeur de pression PX. ....	44
Figure III.5. : Fonctionnement du PX. ....	46
Figure III.6. : Cycle de fonctionnement du dispositif PX. ....	47
Figure III.7. : Vue de l'intérieur de la cuve sous pression. ....	47
Figure III.8. : Consommation d'énergie des plantes en fonction de la récupération .....	50

## Liste des tableaux

Tableau I.1. : Consommation d'énergie par les différentes technologies de dessalement.....	19
Tableau I.2. : Prix de l'eau produite par les différentes technologies de dessalement.....	20
Tableau III.1. : Spécifications de l'usine de dessalement Ummlujj .....	42
Tableau III.2: Comparaison entre turbine de Pelton et l'échangeur PX .....	51



### **Introduction générale**

Face aux demandes croissantes de l'eau dans le monde et plus particulièrement en Algérie, Produire une eau potable de qualité acceptable avec un coût minimal est le principal objectif de tous les exploitants. Le recours aux techniques membranaires est plus en plus important pour résoudre le problème d'approvisionnement en eau destinée à la consommation humaine.

Les procédés de dessalement de l'eau peuvent être classés en deux grandes familles : les procédés thermiques, par évaporation ou par distillation et les procédés membranaires par l'osmose inverse.

L'osmose inverse devient le procédé le plus courant le plus rentable et le moins énergivore par rapport au procédé de distillation néanmoins le coût énergétique est environ 50% du coût global d'exploitation

La rentabilité, la fiabilité et la durabilité du procédé de dessalement et l'utilisation de la nouvelle technologie des membranes, sont les enjeux des recherches et les développements ont toujours été orientés, et continuent à l'être, pour obtenir les gains ayant les répercussions les plus importantes sur le coût de la production d'eau douce à partir de l'eau de mer.

A cet effet, l'installation de systèmes de récupération ou utiliser des pompes de faible consommation d'énergie est devenu une solution optimale pour la réduction de la consommation d'énergie. Il existe différents types de systèmes, turbine les plus anciens systèmes, actuellement les échangeurs de pressions sont les plus utilisés grâce à leur efficacité qui peut atteindre 96%.

L'objectif de ce travail est la comparaison entre les deux méthodes de récupération d'Energie (Turbine de Pelton et l'échangeur de pression)

# *Chapitre I*

## *Généralité sur le dessalement*

## I.1 Introduction

Le dessalement de l'eau ou désalinisation est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable ou, plus rarement en raison de son coût, utilisable pour l'irrigation) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment).

Très généralement, il est plus simple et plus économique de rechercher des sources d'eau douce à traiter (eaux de surface, telles que lac et rivière, ou eau souterraine), que de dessaler l'eau de mer. Cependant, dans de nombreuses régions du monde, les sources d'eau douce sont inexistantes ou deviennent insuffisantes au regard de la croissance démographique ou de la production industrielle.

D'autre part, il est souvent rentable de combiner la production d'eau douce avec une autre activité (notamment la production d'énergie, car la vapeur disponible à la sortie des turbines, et perdue dans une usine classique, est réutilisable dans une station de dessalement dite thermique ou fonctionnant sur le principe de l'évaporation).

L'eau de mer a une salinité d'environ 35 g/L, avec des variations régionales significatives (42 g/L dans le golfe Persique). Pour séparer le sel, il faut, d'un point de vue purement théorique et sans perte d'énergie (dessalement isentropique), environ 0,56 kWh/m<sup>3</sup>.

Les systèmes de dessalement se caractérisent par leur rendement et le taux de sel résiduel (saumure).

Dans le monde, on produit chaque jour 95 millions de mètres cubes d'eau douce en 2018, rejetant 141,5 millions de m<sup>3</sup> par jour de saumure, dont l'impact sur les zones de rejet inquiète les experts scientifiques de l'ONU.

## I.2 Historique

Le dessalement de l'eau de mer est une technique ancienne ; Aristote a décrit la méthode d'évaporation utilisée par les marins grecs au 4ème siècle avant JC, et Jaber Ben Hayan a écrit au 8ème siècle un article sur la distillation à l'aide d'un dispositif en verre avec un long supprimeur encore connu aujourd'hui en Occident comme Alambic dérivé du mot Ammoniaque en arabe. Par la suite, le premier brevet de dessalement en Angleterre a été délivré en 1869 et, la même année,

le gouvernement britannique a construit la première usine de dessalement à Aden pour approvisionner en eau douce les navires stationnés dans le port de la mer Rouge. En 2019, il y avait environ 1 800 usines de dessalement produisant au total plus de 95 millions de mètres cubes (plus de 3,4 milliards de pieds cubes) d'eau potable par jour.

### **I.3 Historique du dessalement en Algérie**

Depuis son indépendance, l'Algérie a déployé des efforts importants pour améliorer ses ressources hydriques et la disponibilité de l'eau pour satisfaire ses secteurs économiques.

Les efforts de l'Algérie indépendante se sont focalisés, les premières années, sur la rénovation du réseau de distribution existant, la construction de barrage et l'exploitation des nappes phréatiques à un moment où l'option du dessalement n'est encore qu'à ses premiers pas.

L'expérience de l'Algérie en matière de dessalement se limite à la réalisation d'unités de déminéralisation des eaux souterraines à très fort taux de salinité, pour des besoins liés à l'industrie pétrolière et la sidérurgie seulement (Exemple de l'unité de déminéralisation de Oulad Djallal dans la Wilaya de Biskra) [1].

En 1964, trois petites unités de 8 m<sup>3</sup>/j chacune a été installées dans le complexe de gaz liquéfié d'Arzew. Le procédé utilisé est "à tubes submergés" travaillant à basse pression.

En 1969 d'une unité monobloc de 4 560 m<sup>3</sup>/j a vu le jour à Arzew. Le procédé utilisé est le multi stage flash – MSF. D'autres i

installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté, employée dans des complexes de production d'électricité (Cap Djinet à l'est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda).

En 1980, a été inaugurée l'unité de dessalement par osmose inverse à Mostaganem d'une capacité de 57 600 m<sup>3</sup>/j, classée alors comme la plus importante au monde.

### **I.4 Généralité sur le dessalement de l'eau de mer**

La production d'eau potable par dessalement a débuté dans les années 1950. Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment). Malgré le nom, il s'agit rarement de retirer les sels de l'eau, mais plutôt, à l'inverse, d'extraire de l'eau

douce. Très généralement, il est plus simple et plus économique de rechercher des sources d'eau douce à traiter (eaux de surface, telles que lac et rivière, ou eau souterraine), que de dessaler l'eau de mer. Cependant, dans de nombreuses régions du monde, les sources d'eau douce sont inexistantes ou deviennent insuffisantes au regard de la croissance démographique ou de la production industrielle. Les avantages de l'utilisation d'eau de mer pour la production d'eau potable peuvent être évoqués par rapport aux eaux de rivières par la moindre consommation de produits chimiques, une faible production de boues cependant le dessalement d'eau de mer présente également des inconvénients à savoir une consommation d'énergie élevée un cout d'opération du procédé élevé, un volume d'eau produite insuffisant comparé au volume d'eau de mer prélevé, la dégradation l'environnement marin due à l'extraction risque de dégâts en fonds marins au niveau de la faune et la flore et au rejet d'eau avec une quantité de sels très élevée. Le dessalement de l'eau de mer est un enjeu important pour l'avenir des régions arides. Il est possible de résoudre les problèmes de manque d'eau potable dans de nombreux pays. Dans le cas d'une utilisation pour la consommation humaine, le dessalement d'eau de mer est une technique aujourd'hui fiable et moins onéreuse que la technique dite de recyclage des eaux usées. Il devient même rentable dans des pays développés ne manquant généralement pas d'eau, dans certaines situations spécifiques (par exemple des îles touristiques) [1].

De ce fait, cette activité est en très forte croissance. La capacité installée chaque année augmente en moyenne de plus de 10 % par an. Les techniques dites thermiques (par évaporation) représentaient il y a encore quelques années la principale technique employée, mais l'osmose inverse, du fait d'une fiabilité accrue et de sa faible consommation électrique (4 à 5 kWh/m<sup>3</sup>), permet des coûts très bas, ce qui lui donne aujourd'hui 50 % de la part démarchée. Comme par exemple la technologie de dessalement de l'eau de mer est surtout utilisée au Moyen-Orient.

## **I.5 Principes de dessalement**

### **I.5.1 Captation de l'eau de mer**

Consiste à pomper l'eau de mer vers la station de dessalement, cette eau doit être bonne du point de vue matières en suspension. Deux types de technologies sont utilisés dans cette étape :

- Les forages côtiers : soit verticaux soit sous forme de galeries horizontales permettant d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stables.

- La prise d'eau de surface : peut être faite en pleine mer. Dans le cas idéal, le captage doit être effectué en zone profonde, éloigné de la côte, protégé des pollutions et des forts courants. [4]

## I.5.2 Prétraitement

### Coagulation –floculation

L'opérateur de coagulation-floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement de floccs colloïdaux) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de floccs par aggrégation. [5]

Les floccs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite.



Figure I.2. : Coagulation floculation. [5]

### Coagulation

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les unes des autres et, par conséquent, à les stabiliser dans la solution.

Le but principal de la coagulation est de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération. [6]

Les coagulants sont des produits capables de neutraliser les charges des colloïdes présents dans l'eau. [7]

**Floculation**

La floculation est le processus physico-chimique au cours duquel des matières en suspension dans un liquide s'agglomèrent pour former des particules plus grosses, généralement très poreuses, nommés floes. Les floes sédimentent généralement beaucoup plus rapidement que les particules primaires dont ils sont formés. La floculation peut avoir lieu naturellement ou peut être accélérée par l'ajout d'un flocculant. [5]

**Filtration**

Dans le cas de la filtration sur sable, la séparation s'effectue le long d'un milieu poreux (le sable), plus ou moins tortueux, qui se colmatra en profondeur au fur et à mesure de l'accumulation des particules en suspension lors du passage du fluide. Plusieurs autres types de filtres reposent sur ce principe (filtre à cartouche, filtre à disque...). Un milieu poreux représente un ensemble de grains ou d'agrégats autour des quels des espaces vides appelés pores, sont interconnectés ou non. Le matériau doit être perméable à un écoulement de fluide. [8]

**Traitement chimique**

Après la filtration à sable, des équipements de dosage font partie de prétraitement chimique appliqué à l'eau de mer avant l'entrée dans les membranes (acidification, addition de bisulfite de sodium et dosage d'anti-incrustant. [9]

**Filtration de sécurité ou microfiltration**

Pour but de retenir les particules de quelques microns non retenues par filtre sur sable [10]. La microfiltration est assurée par l'utilisation d'un filtre à cartouche type bobiné dont le nombre de cartouches est de 35. Entre le collecteur d'entrée et de sortie, il y'a un manomètre différentiel muni de contact électrique pour alarme, qui indiquera quand il sera nécessaire de remplacer les cartouches filtrantes. [9]

## I.6 Techniques de dessalement

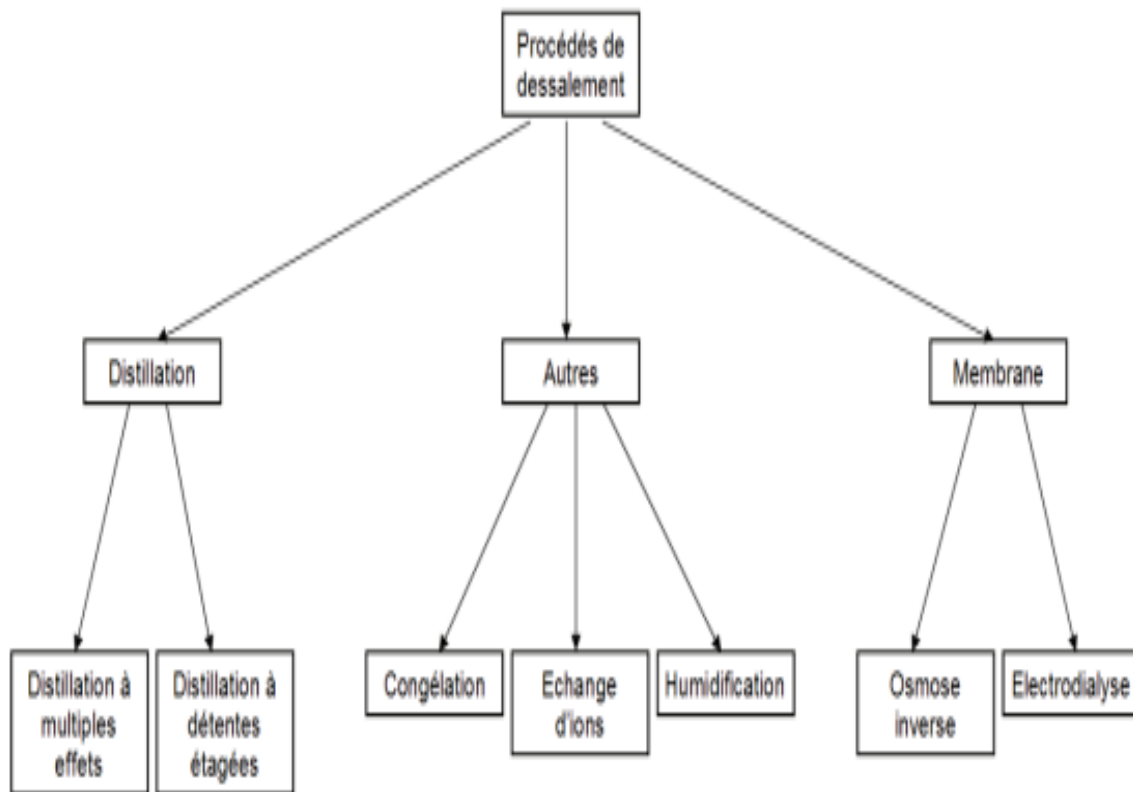


Figure I.2. : Classification des procédés de dessalement

### I.6.1 Distillation

La distillation est une technique de séparation et de purification de substances chimiques liquides. La distillation de l'eau se base sur le principe de changement de phase d'eau liquide – vapeur. Cette technique provient de l'Antiquité avec les Grecs au IV<sup>ème</sup> siècle avant J-C qui avaient déjà essayé de dessaler l'eau de mer grâce au procédé décrit par Aristote. Ce n'est qu'au XIX<sup>ème</sup> siècle qu'apparut le premier procédé industriel capable de distiller de l'eau de mer. L'Espagne conçoit sa première usine de dessalement par distillation en 1964 aux Canaries [2].

Pour cela on chauffe l'eau salée jusqu'à la température laquelle convient pour vaporiser l'eau. On évapore l'eau pour séparer deux substances dans un mélange homogène (eau et sel pour obtenir à la fin l'eau buvable). Lors de l'échauffement les substances se vaporisent successivement, et la vapeur obtenue est liquéfiée pour donner le distillat. Le distillat n'est pas un produit pur : il



contient une certaine proportion des autres composés du mélange initial. Il faut dès lors répéter l'opération d'évaporation-condensation avec le distillat afin de concentrer davantage le composé le plus volatil. Pour ne pas répéter l'opération, et séparer proprement les composants du mélange en une seule passe, on utilise une colonne de distillation et ce procédé se nomme distillation fractionnée ou rectification. L'avantage de ce chauffage à haute température est l'élimination de toutes les impuretés et microbes de la solution d'eau de mer. Par contre le principal inconvénient reste le prix de ce procédé qui est assez cher. En effet, cette technique utilise énormément d'énergie pour chauffer l'eau, avec du gaz ou du pétrole, puis la refroidir. Le prix de l'eau augmente sans cesse. Le procédé n'est pas très écologique puisqu'il rejette beaucoup plus de CO<sub>2</sub>, gaz à effet de serre, que les autres techniques de dessalement. Les centrales thermiques reliées aux usines de dessalement par distillation utilisent des énergies fossiles traditionnelles [2].

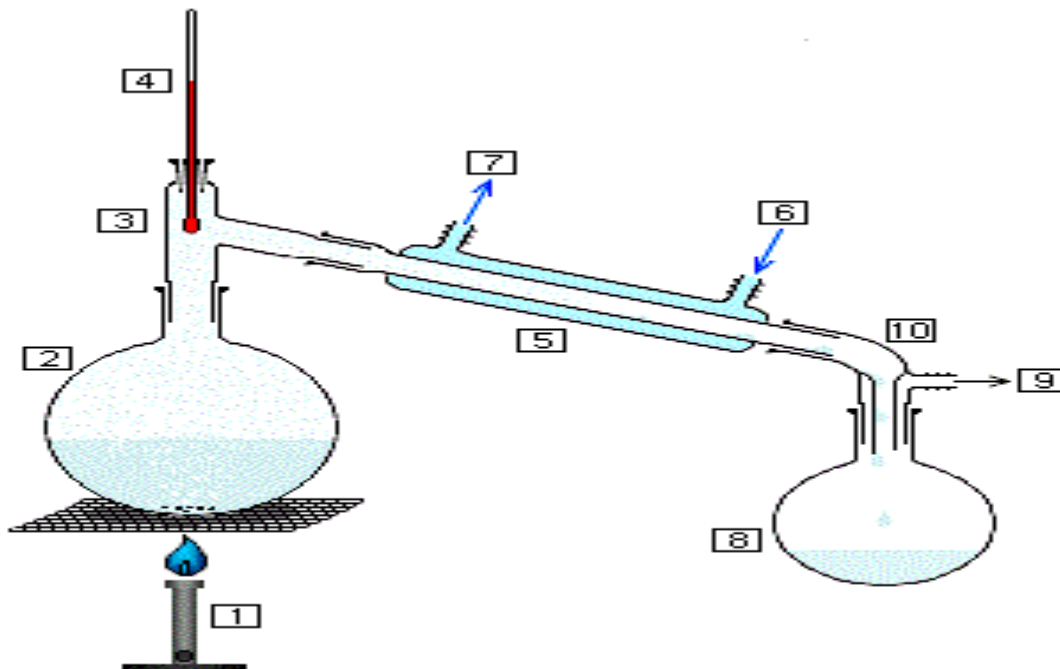


Figure I.3. : Dispositif expérimental de distillation

Sur ce montage, l'eau de mer contenue en 2 est chauffée au moyen d'un bec bunsen (en 1). L'eau se transforme alors en vapeur et passe en 3, où sa température est évaluée à l'aide d'un thermomètre (en 4). La vapeur passe ensuite en 5 dans la colonne réfrigérante (alimentée en eau

froide par 6 et 7). Elle est alors condensée et redevient donc liquide. Ainsi en 8 on obtient de l'eau pure et parfaitement potable [2].

### **I.6.2 Distillation multi-flash**

L'intérêt du multi-flash réside dans son faible cout énergétique. En effet, plus la pression est basse, plus la température à laquelle l'eau passe à l'état gazeux est faible. Pour ce procédé, l'eau de mer est envoyée dans des conduits au bout des quels elle est chauffée à 120 °C, puis elle est ensuite introduite dans un compartiment où règne une pression réduite (sa température d'ébullition est donc plus basse). [11]

L'eau est alors instantanément transformée en vapeur par détente appelée Flash. La vapeur ainsi créée va monter au contact des premiers conduits dans lesquels passent l'eau de mer.

Les conduits sont assez froids ce qui provoque la condensation de cette vapeur qui est alors récupérée à l'état liquide. Pour l'eau qui ne s'est pas évaporée dans ce compartiment, elle est récupérée puis transférée dans un deuxième compartiment du même type mais avec une pression atmosphérique encore plus basse. Et ainsi l'opération est répétée plusieurs fois à la suite (d'où le nom de multi-flash). Il existe des usines de dessalement dans lesquels l'opération se répète dans 40 compartiments. [11]

### **I.6.3 Distillation à multiples effets**

La distillation à effets multiples est moins courante car elle ne permet pas de produire de grandes quantités d'eau douce et son installation est délicate et coûteuse. Mais cette technique permet des économies de l'ordre de 15% à 20% par rapport au multi-flash. Le principe simple consiste en une association en série de modules évaporateur/condensateur dont la disposition permet de limiter les pertes thermiques et assurer une grande faisabilité technique. De plus, ce procédé permet d'optimiser la récupération de la chaleur latente de condensation de l'eau. [11]

### **I.6.4 Osmose inverse**

L'osmose un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en soluté de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. C'est est un phénomène naturel, notamment à travers les membranes cellulaires (BERLAND &JUERY, 2002).

Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la

solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau va s'annuler. Si pour simplifier, on suppose que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (Figure 04), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée ; c'est le phénomène d'osmose inverse (MAUREL, 2006).

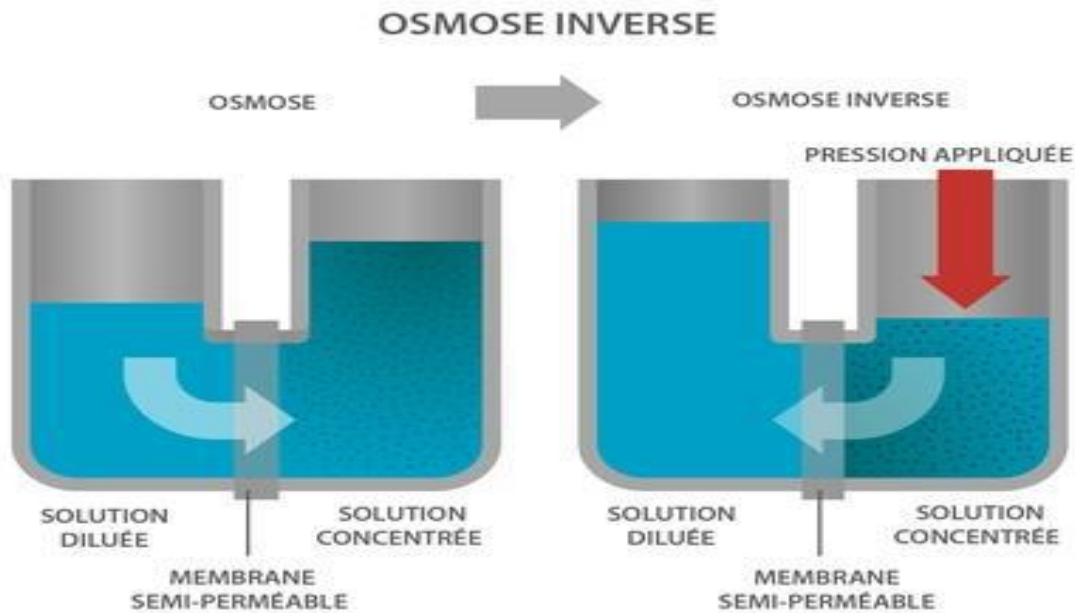


Figure I.4. : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse

### Principe de l'Osmose inverse

Une unité complète de traitement pour la production d'eau potable comprend :

Un module de prétraitement de l'eau brute par application de procédés physico-chimiques tels que coagulation, filtration sur sable et/ou filtration sur cartouches selon la nature de l'eau.

Un module haute pression de dessalement par osmose inverse (osmoseur), c'est le cœur du traitement par passage à haute pression de l'eau de mer dans des tubes contenant les membranes semi-perméables.

Un module de post-traitement de remise à l'équilibre de l'eau et chloration avant stockage.

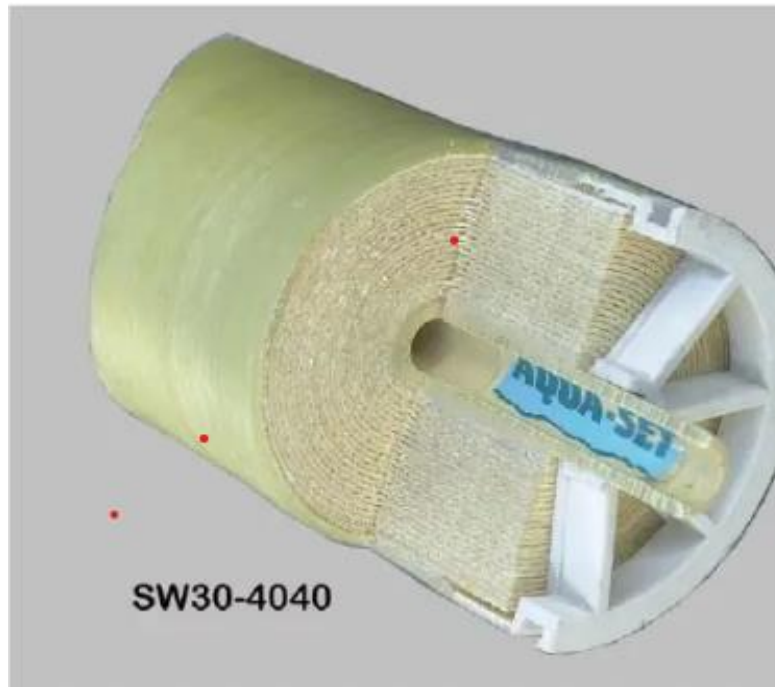


Figure I.5. : Coupe d'une membrane d'osmose inverse

### Modules d'osmose inverse

Pour être mise en œuvre, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Une enceinte résistant à la pression est toujours nécessaire. Il existe quatre types de modules.

### Modules plans

Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides (BERLAND & JUERY, 2002).

### Modules tubulaires

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel (BERLAND & JUERY, 2002).

## Modules spirales

C'est un module particulier de membranes planes qui sont enroulées autour d'un axe creux collecteur de perméat. L'ensemble est introduit dans une enveloppe cylindrique dont les sections donnent accès à l'entrée de l'alimentation et à la sortie du retentât (ELKHABBAZE, 2008).

## Modules à fibres creuses

Ils contiennent plusieurs milliers de fibres dont le diamètre est de l'ordre de 1 mm Les ai sceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne- externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, selon que la peau active est à l'intérieur ou à l'extérieur de la fibre creuse (ELKHABBAZE, 2008).

### I.6.5 Electrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de nature électrochimique. Il permet d'extraire en partie ou en totalité des ions contenues dans une solution en conservant des substances pas ou très peu ionisées. [13]

Un électro-dialyseur fonctionne de la manière suivante : deux compartiments 1 et 2 sont séparés par des membranes alternativement anioniques et cationiques. Comme leur nom l'indique sous l'action d'un champ électrique, les premières ne se laissent franchir que par des anions, les secondes par les cations. [13]

Les cations migrent dans le sens du courant électrique. Ils peuvent sortir du compartiment en traversant la membrane cationique, mais ils ne peuvent pas sortir du compartiment 2, car ils trouvent sur leur chemin une membrane anionique.

Les anions migrent dans le sens inverse du courant électrique. Ils peuvent eux aussi sortir du compartiment en traversant la membrane anionique, mais ils ne peuvent pas sortir du compartiment 2 car la membrane cationique les en empêche. [13]

En conséquence, Le compartiment s'appauvrit en sels dissous : on l'appelle compartiment de dilution. Le compartiment 2 s'enrichit en sels dissout : on l'appelle compartiment de concentration. [13]

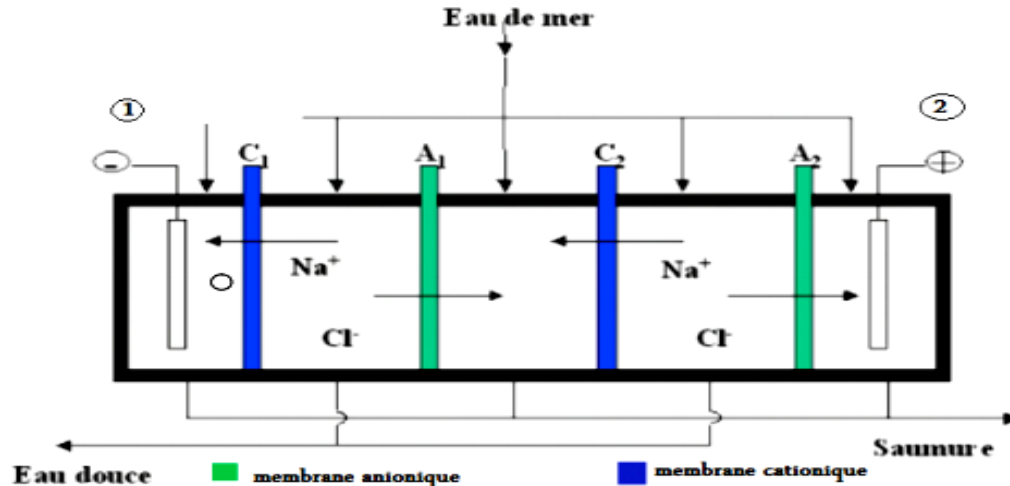


Figure I.6. : Fonctionnement du procédé d'électrodialyse [13]

## I.7 Technologie des Membranes

La membrane est constituée d'une surface plane dont la perméabilité est sélective, son objectif principal est d'éliminer le sel. Elle assure également la rétention des composants indésirables dans l'eau (micro algues, bactéries, certains virus, microorganismes, micropolluants), supprime la turbidité (eaux troubles), limite les sous-produits de désinfection et permet la production d'une eau épurée.

Dans le cas de l'osmose inverse, l'élimination des éléments physico-chimiques et biologiques indésirables est quasiment totale.

Il existe différents types de membranes telles qu'en polyamide, en poly sulfone acétate de cellulose, membranes composites et membranes dynamiques.

Ces membranes doivent être résistantes au PH, à la température et aux agents chimiques.

Les membranes sont rassemblées en modules afin d'augmenter les débits de traitements.

On distingue, les modules tubulaires, les fibres creuses, les modules plans et les modules spiraux.

L'essor des matériaux de synthèse a permis de réaliser des parois semi-perméables éminemment plus pratiques et on peut les classer suivant le critère adopté en plusieurs catégories.

## **I.7.1 Type des Membranes Selon Structure des Matériaux**

### **Membranes organiques**

Actuellement fabriquées à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, poly sulfones, polyamides) dont les qualités leurs confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. La majeure partie des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration est constituée à 90% de membranes organiques.

### **Membranes minérales ou inorganiques**

De commercialisation plus tardive que les membranes organiques, ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux, principalement les matières céramiques, le métal fritté et le verre. Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique, ce qui a ouvert de nouvelles voies dans la séparation par membrane.

### **Membranes composites**

Apparues il y a une dizaine d'années, elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques (superposition de polymères organiques différents), organo-minérales ou minérales (association de carbone ou d'alumine comme support et de métaux tels que la zircone, l'alumine et le titane).

### **Membranes échangeuses d'ions**

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro déionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau de mer et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.

Il y a quatre différents types de modules d'osmose inverse, principalement des procédés de désalinisation. Il y a les modules tubulaires, plans, spiralés, et fibres creuses.

Plusieurs critères sont à prendre en compte pour le choix d'un type de module.

Le régime d'écoulement permettant de minimiser les phénomènes de polarisation.

La compacité qui est exprimée par le rapport de la surface filtrante ou volume de l'appareil.

La facilité de démontage et de remplacement des membranes défectueuses, volume mort de l'appareil. L'adaptation au produit à traiter (nécessité ou non de pré filtration).

## **I7.2 Types des membranes selon la composition chimique**

### **Membranes en acétate de cellulose**

Le matériau de base est la cellulose dont on remplace un ou plusieurs groupement hydroxyle par des groupements acétate ; ce type de polymère est le plus ancien (1957). En France, les sociétés DEGREMONT, SFEC, SRTI ont constitué en 1967 le groupement OSMOTEC.

### **Membranes en polyamide**

Compte tenu des inconvénients de l'acétate de cellulose, des membranes de types polyamide / polyamide ont été développées. Il existe plusieurs types de polymères caractérisés par une liaison amide (- CONH -).

Elles sont commercialisées en majeure parties par DUPONT de NEMOURS sous formes de fibres creuses (B9 et BIO) et par NITTO, OSMONICS.

### **Membranes en poly-sulfone**

Les premières membranes à base de poly-sulfone sont apparues au milieu des années 1970. Elles sont caractérisées par un groupement SO<sub>2</sub> relativement stable relié à deux noyaux benzéniques.

### **Membranes Composites**

Les membranes composites sont apparues entre 1970 et 1980 et constituent un net progrès par rapport aux membranes asymétriques classiques. Ce sont en effet des membranes asymétriques dont l'épaisseur de la peau est nettement plus fine que celle des membranes classiques de LOEB-SOURIRAJAN.

### **Membranes Dynamiques**

Elles sont fabriquées in situ par l'utilisateur à partir de tubes poreux en acier inoxydable ayant un diamètre des pores compris entre 0.5 et 5 µm.



On fait circuler à l'intérieur de ces tubes une dispersion colloïdale d'un hydroxyde tel que celui de Zirconium associé à un polymère tel qu'un polyacrylate.

La dispersion colloïdale en se déposant sur le corps poreux constitue une membrane dynamiquement formée dont les rayons de pores peuvent être aussi bas qu'un nanomètre.

### **I.7.3 Durée de Vie des Membranes**

La durée de vie des membranes d'osmose inverse dépend de la nature de la membrane et des conditions d'utilisation :

- Pression de fonctionnement.
- Température de l'eau.
- PH.
- Qualité du prétraitement.

## **I.8 Critères de choix d'un procédé de dessalement**

Selon (Maurel 2006), les facteurs à prendre en compte dans le choix d'un procédé de dessalement sont de deux ordres :

- Les critères économiques
- Les critères techniques

### **I.8.1 Critères économiques**

Les critères économiques retenus sont les suivants :

- Coût de l'énergie : dépend de sa nature (énergie renouvelable, gaz, fuel) et des disponibilités locales (pays importateurs ou producteurs)
- Coût des produits chimiques : selon qu'ils sont disponibles localement ou importés.
- Fluctuation des monnaies : particulièrement pour les unités d'osmose inverse, provenant de manière quasi exclusive des USA, et dont le coût dépend donc des fluctuations du dollar.
- Conditions de financement : détails, taux d'intérêt.
- Coût de la main-d'œuvre.

### **I.8.2 Critères techniques**

Parmi les critères techniques se trouvent :

- Salinité de l'eau à traiter:

En général, les procédés de distillation permettent de traiter des eaux de fortes concentrations, tandis que les procédés à membrane sont généralement appliqués aux eaux saumâtres.

- Composition chimique de l'eau à traiter surtout dans le cas des eaux saumâtres (Tenure on sulfates).
- Caractéristiques physiques de l'eau (turbidité, matières en suspension...) déterminent le type de prétraitement à utiliser.
- Salinité de l'eau produite : selon l'usage qui en sera fait, elle peut varier de 300 à 500ppm pour l'approvisionnement en eau potable à 15-30 ppm pour l'alimentation en eau industrielle
- Source d'énergie disponible (gaz, pétrole, électricité, énergie renouvelable, énergie, nucléaire et énergie récupérée).

### **I.8.3 Consommation énergétique des procédés de dessalement**

Il est important de connaître la quantité d'énergie conventionnelle requise par les procédés de dessalement pour comprendre pourquoi nous avons besoin d'aller vers les ressources énergétiques renouvelables et durables. La contribution des systèmes de dessalement conventionnels au phénomène de réchauffement de la planète peut être évaluée en estimant la quantité de combustible fossile à brûler pour produire une certaine quantité d'eau douce. En moyenne, la production de 1000 mètres cube d'eau douce par la technologie de dessalement consomme environ 5 tonnes de pétrole brut qui produit environ 10 tonnes de dioxyde de carbone ou environ 5000 mètres cubes de gaz à effet de serre. La capacité mondiale totale de dessalement a connu une forte augmentation au cours des dernières années, passant de 66,48millions de mètres cubes par jour en 2011 à 86,6 millions de mètres cubes par jour en 2015. Par conséquent, des mesures sérieuses visant à intégrer les systèmes de dessalement aux technologies d'énergie renouvelable et durable seront nécessaires pour atténuer les effets négatifs des systèmes de dessalement. Table II.3 donne une aperçue sur les besoins en énergie des principales technologies de dessalement.

Propriétés	MSF	MED	MVC	TVC	SWRO	BWRO	ED
Capacité d'une Unité typique (m <sup>3</sup> /jour)	50 000-70 000	5000-15000	100-3000	10000-30000	Up to 280000	Up to 98000	2-147000
Consommation d'énergie électrique (KWh/ m <sup>3</sup> )	2.5-5	2-2.5	7-12	1.6-1.8	4-6 avec ERD	1.5-2.5	2.64-5.5
Consommation d'énergie thermique (MJ/m <sup>3</sup> )	190-182	145-230	Non	227	Non	Non	Non
Equivalent électrique to énergie thermique (KWh/m <sup>3</sup> )	15.83-23.5	12.2-19.1	Non	14.5	Non	Non	Non
Totale consommation électrique (KWh/m <sup>3</sup> )	19.58-27.25	14.45-21.35	7-12	16.26	4-6	1.5-2.5	2.64-5.5, 0.7-2.5 à faible TDS
Qualité d'eau produite. (ppm)	≈10	≈10	≈10	≈10	400-500	400-500	150-500

**Tableau I.1. : Consommation d'énergie par les différentes technologies de dessalement**

#### **I.8.4 Prix de l'eau produite par les différentes technologies de dessalement**

Même si les systèmes de distillation produisent de l'eau à très faible teneur en sel 10ppm comparativement à 400 à 500 ppm dans le système RO, une technologie améliorée a permis de développer des membranes moins exigeantes (moins d'énergie), plus longues et moins coûteuses. Cela a fait de RO un procédé plus économique que les autres méthodes de dessalement. Ce n'est pas le cas lorsque la chaleur à basse température provient du sous-produit de la centrale électrique, de toute chaleur résiduelle ou d'une source solaire économiquement disponible, ou lorsque l'on veut dessaler une eau très salée de plus de 60 000 ppm.

L'économie peut alors évoluer en faveur du processus de distillation. Le tableau ci-dessous présente le coût moyen total de production d'eau rapporté pour les principaux procédés de dessalement.

Technique de dessalement	Source d' eau	Cout de l' eau produit (USS/ m <sup>3</sup> )
Multi Stage Flash. (MSF) 10000-20000 m <sup>3</sup> /jour	Eau de mer	0.24 à 0.50
Distillation à Multiples Effets. (MED) 10000-20000 m <sup>3</sup> /jour	Eau de mer	0.057-0.14
Compression de Vapeur. (VC) 10000 m <sup>3</sup> /jour	Eau de mer	0.29-0.31
Osmose inverse. (RO) 10000-32000 m <sup>3</sup> /jour	Eau de mer	0.045-0.066
Osmose inverse. (RO) Large capacité 10000 m <sup>3</sup> /jour	L' eau saumâtre	0.065-0.135
Electrodialyse. (ED) Large capacité Petite capacité	L' eau saumâtre	0.6 10.5

**Tableau I.2. : Prix de l'eau produite par les différentes technologies de dessalement**

## **I.9 Avantages de l'osmose inverse pour le dessalement d'eau de mer**

Les techniques membranaires présentent de nombreux avantages par rapport aux autres procédés de traitement des eaux salines, en particulier la distillation par bouilleur l'électrodialyse ou l'échange d'ions.

### **I.9.1 Avantages des techniques membranaires :**

- Simplicité d'exploitation de l'unité de traitement
- Peu ou pas de produits chimiques, d'où l'absence de sous-produits engendrés par le traitement
- Meilleure qualité de l'eau traitée. (Turbidité de l'eau produite toujours inférieure à 0,1NTU)
- Stérilisation totale d'où une simple désinfection de sécurité après filtration

### **I.9.2 Comparaison avec d'autres procédés :**

Le principe de l'osmose inverse est d'ordre mécanique de conception « tout ou rien » :

- La membrane produit de l'eau de parfaite qualité ou ne produit pas.
- Contrairement aux autres procédés de distillation et surtout à l'électrodialyse ou l'échange d'ions l'osmose inverse permet d'obtenir des eaux de qualité constante, très pures et très sûres, même en cas de fluctuations sur la qualité de l'eau brute.
- Comparativement au bouilleur il ne nécessite pas de changement d'état, et donc pas d'échauffement.
- La seule source d'énergie nécessaire est l'électricité, utilisée pour entraîner les pompes.
- La consommation électrique est faible. Seul le circuit à haute pression doit résister à une pression de 70 bars. Les matériaux composites permettent d'y parvenir sans alourdir le système.
- L'utilisation de matériaux synthétiques permet de garantir la tenue parfaite à la corrosion. Seules les pièces de structure et les raccords sont en inox 316L ou 316 Ti. L'appareil est compact et léger.
- Les membranes d'osmose inverse éliminent parfaitement tous types de particules, colloïdes, bactéries, virus et macromolécules l'eau produite par osmose inverse est donc potable et ne nécessite pas de post de traitement complexe.

### **I.9.3 Les inconvénients du dessalement**

- Coût énergétique élevé.
- Augmentation de l'empreinte carbone lorsque l'énergie utilisée provient des combustibles fossiles ; pour y remédier, des projets pilotes de désalinisation à base d'énergies renouvelables sont menés par quatre groupes industriels, dont les français Veolia et Suez Environnement, dans la région d'Abu Dhabi, sous la houlette de l'Institut de la ville durable de Masdar ; l'émirat a un projet d'usine durable de dessalement de 150 000 m<sup>3</sup>/jour ; en Arabie saoudite, l'espagnol Abengoa va codévelopper une usine solaire de 60 000 m<sup>3</sup>/jour pour approvisionner la ville d'Al Khafji ; les deux pays comptent aussi sur le nucléaire.

- Rejet des saumures concentrées au double de la salinité naturelle en mer ou injectées dans le sol ; ainsi, les rejets d'effluents très chargés en sel dans la mer d'Arabie ont fait exploser le taux de salinité de ses eaux ; dans certaines zones, les fonds marins sont devenus des déserts.
- Rejet d'eaux chaudes en mer dans le cas de la distillation.
- Emploi de produits chimiques pour nettoyer les membranes (chlore).
- Traces de cuivre échappées des installations ; corrosion chimique des installations de tuyauteries.
- Aucune législation spécifique concernant la potabilité de l'eau issue de ces traitements.
- Le captage de l'eau en mer peut modifier les flux maritimes.
- Risque de dégâts en fonds marins au niveau de la faune et de la flore [ ].

### **I.10 Conclusion :**

Les installations de distillation, sont robustes. Elles sont particulièrement adaptées aux eaux chaudes, très salées et de caractéristiques fluctuantes.

La distillation à effet multiple était l'origine réservée à des unités de petite taille.

L'osmose inverse est une technique plus récente, apportant de réelles économies d'énergie. Elle s'est peu à peu imposée vis-à-vis d'utilisateurs réticents devant cette technique si différente de la distillation. Entre temps, les fabricants de membranes ont perfectionné leurs produits, si bien qu'aujourd'hui l'osmose inverse est le procédé concurrent de la distillation.

Cependant, ce procédé d'osmose inverse possède encore des limitations. La principale limitation est due à la pression de travail qui doit être appliquée pour vaincre la pression osmotique. Cette pression osmotique est d'autant plus importante que la concentration en sels augmente ce qui limite les taux de conversion pouvant être obtenus avec l'osmose inverse.

Cela entraîne deux problèmes majeurs : un problème économique en limitant la production d'eau et un problème environnemental en empêchant de minimiser les volumes de concentrats. Ces concentrats sont actuellement majoritairement rejetés sans traitement dans l'eau de mer dont il modifie fortement l'équilibre et la biodiversité.

Parmi les autres limitations de l'osmose inverse, il faut noter le phénomène dépoliarisation de concentration qui contribue à réduire les flux produits et le phénomène de colmatage qui rend le procédé très sensible à la qualité des prétraitements.

# *Chapitre II*

## *Récupération de l'énergie*

**II.1 Introduction :**

Depuis quelques années, la production d'eau douce par osmose inverse est en forte croissance et des usines de 100 000 à 200 000 tonnes/jour sont en cours déconstruction aujourd'hui. Les efforts de recherche et développement se concentrent sur la réduction du coût de l'eau produite au m<sup>3</sup>. Il se situait entre 2 et 3 EUR le m<sup>3</sup> pour les grosses installations il y a quelques années. Aujourd'hui, les plus optimistes envisagent une évolution vers 0,6 à 0,8 EUR le m<sup>3</sup>.

Le gain se fait d'une part sur l'évolution des membranes qui deviennent moins gourmandes (Les nouvelles versions dites "LOW ENERGY" permettent de produire une eau de meilleure qualité avec des pressions de fonctionnement plus faibles). Mais la plus grosse source de gain résulte la récupération de l'énergie perdue dans le rejet de saumure. Observons, en trois étapes, comment il est possible aujourd'hui d'améliorer une installation et de récupérer la quasi-totalité de cette énergie.

La récupération de l'énergie ou « Energy Harvesting » en anglais représente l'ensemble des techniques utilisées pour récolter l'énergie de l'environnement qui est par défaut perdue. L'homme a commencé à s'intéresser à la récupération de l'énergie depuis le moyen âge où les moulins à vent et à eau ont été très utilisés. De nos jours, l'intérêt de plus en plus grandissant des recherches dans le domaine de la récupération de l'énergie a fait naître des techniques plus perfectionnées pour la récupération de l'énergie solaire, éolienne, géothermique, hydraulique, etc... Pour ces dernières, l'ordre des puissances générées est de l'ordre du Kilowatts (kW) au Mégawatt (MW). Néanmoins, la course à la miniaturisation a fait naître de ce concept de récupération de l'énergie un domaine de pointe faisant appel à des dispositifs microsysteme (MEMS) permettant justement de convertir une vibration ambiante en énergie électrique, c'est justement ce qui nous intéresse dans ce travail. Dans ce cas de figure, l'ordre de grandeur des puissances générées sera plutôt de l'ordre du  $\mu$ W au mW. En arrivant à sortir de telles puissances, plusieurs applications peuvent être visées tels que des applications médicales par exemple (pacemaker, application auditives, etc...). Grâce à de tels dispositifs, nous pouvons rendre n'importe quel système autonome éliminant ainsi les problèmes d'autonomies, d'usures de batteries et de câblages que nous pouvons rencontrer sur les systèmes « classiques ».

L'énergie de récupération ou énergie fatale est la quantité d'énergie inéluctablement présente ou piégée dans certains processus ou produits, qui peut parfois être partiellement récupérée ou



valorisée. Cette énergie peut prendre différentes formes (chaleur, froid, gaz, électricité) et est émise par des procédés industriels, des entreprises de service public ou des déchets notamment.

Ce terme désigne aussi l'énergie qui serait perdue si on ne l'utilisait pas au moment où elle est disponible. C'est le cas, par exemple, de l'électricité issue des éoliennes, des panneaux solaires ou des centrales hydrauliques au fil de l'eau.

## **II.2 Evolution des systèmes de récupération :**

L'efficacité, la disponibilité et la durabilité sont les caractéristiques les plus importantes lorsqu'on compare les systèmes de récupération d'énergie. Plusieurs systèmes sont conçus et tester pour récupérer l'énergie à la sortie de rejet de la saumure de procédé d'osmose inverse, en 1980 le premier concept installé au sein des stations de dessalement était la pompe centrifuge, Francis ou Pelton turbine, ces systèmes ont permis de réduire l'énergie à 5kwh/m<sup>3</sup> [14,15].

Actuellement le système de récupération installé au sein des grandes stations dessalement l'échangeur de pression d'une efficacité plus de 95% et offre une consommation d'énergie spécifique (CSE) moins de 2.5 kWh/m<sup>3</sup> [15,16].

En raison de leur fiabilité et efficacité prouvée jusqu'à 88% les turbines sont les systèmes dominants installés dans les procédés d'osmose inverse pour récupérer l'énergie de concentrat couplé avec une pompe centrifuge [17].

L'eau dessalée était trop chère pour la plupart des cultures en 2005 ; elle n'était abordable que pour les cultures à fort rapport économique, en particulier lorsque les investissements sont subventionnés. Les eaux saumâtres étant moins salines que l'eau de mer, elles ont la préférence sur cette dernière<sup>18</sup>.

Une autre voie vers un dessalement moins coûteux consiste à dessaler de la glace de mer ; en effet, la salinité de la glace de mer est comprise entre 0,4 % et 0,8 %, bien en dessous de celle des eaux de mer, qui se situe entre 2,8 % et 3,1 % ; son dessalement demande beaucoup moins d'énergie. Une société chinoise, la Beijing Huahaideyuan Technology Co. Ltd., commencera bientôt la production d'une grande quantité d'eau douce par désalinisation de glace de mer, grâce à un accord de transfert de technologie signé avec l'Université de Beijing en janvier 2014 ; la société devrait être capable de produire au moins un milliard de mètres cubes d'eau douce par an d'ici 2023 ; le coût de la désalinisation devrait baisser à 4 yuans par tonne (0,48 €/tonne)[.

### **II.3 Nécessité des systèmes de récupération :**

Les efforts des chercheurs concentrent sur la réduction de coût de l'eau produite qu'il situent entre 2 à 3 €/m<sup>3</sup> pour les grandes installations, développer et améliorer des membranes permettre de produire une meilleure qualité de l'eau avec des pressions de fonctionnement plus faible, mais le plus important souci est de récupérer l'énergie perdue par le rejet de saumure [18].

L'implantation de système de récupération dans les stations de dessalement par procédé d'osmose inverse, a stimulé la croissance de l'utilisation de la technologie d'osmose inverse à travers le monde entier [19].

Par conséquent, l'énergie de consommation dans les stations de dessalement par osmose inverse sans système de récupération varie de 5.5 à 8 kWh/m<sup>3</sup>, par contre les procédés avec installation de système de récupération l'énergie varie entre 3-5 kWh/m<sup>3</sup>. [20].

### **II.4 Différents systèmes de récupération d'énergie :**

L'intérêt de cette partie est la description des différents systèmes de récupération d'énergie utilisés dans les stations de dessalement de l'eau de mer par procédé d'osmose inverse et montrer leur avantage On distingue les systèmes centrifuges (Pelton et turbo pompe) et les systèmes isobariques (échangeur de pression) [21,22].

Grâce au système de récupération d'énergie, il est possible de réutiliser l'énergie du rejet de la saumure. Le concentrat est dirigé vers le système de récupération d'énergie, où il transmet directement son énergie à une partie de l'eau d'alimentation [23].

#### **II.4.1 Turbine :**

En 1980 les premiers systèmes de récupération de l'énergie du concentrat ont été installés, Ils étaient basés sur le principe de la récupération indirecte de l'énergie par des turbines hydrauliques venant « soulager » les moteurs électriques entraînant les pompes haute-pression [16].

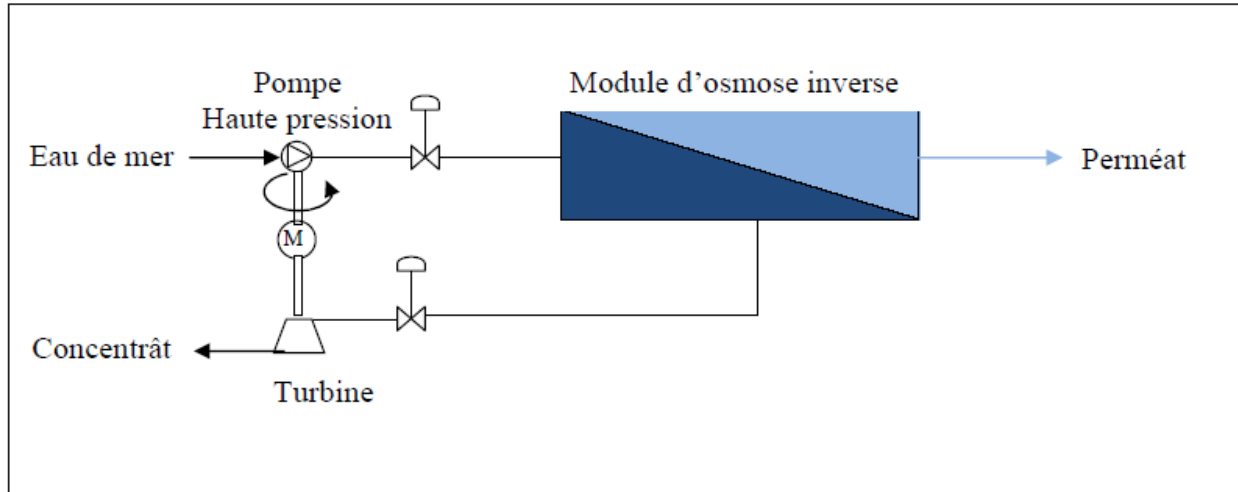


Figure II.1 : récupération de l'énergie du concentrat par turbine Pelton[24].

Il fut mis ensuite sur le marché des turbo-pompe à placer en série avec les pompes haute-pression, ce qui tendait à diminuer leurs caractéristiques hydrauliques, Ce système est plutôt adapté aux petites et moyennes capacités.

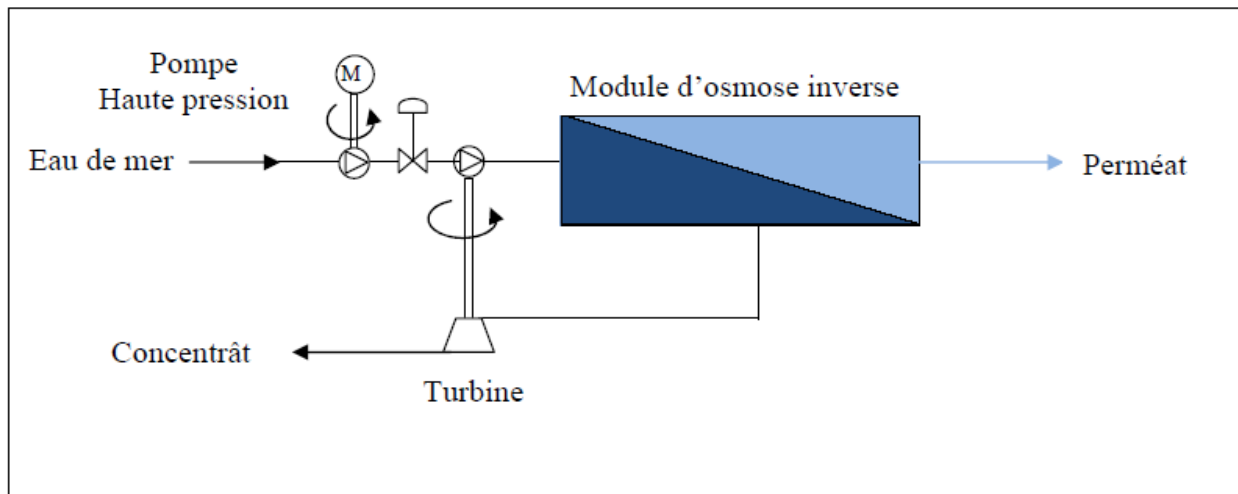


Figure II.2. : turbo-pompe de récupération de l'énergie du concentrat.[24].

### II.4.2 Echangeur de pression :

Aujourd'hui le système le plus performant est basé sur le principe de la récupération directe de l'énergie du concentrat, alors que les deux premiers systèmes transformaient l'énergie hydraulique du concentrat en énergie mécanique. Ce système fait appel à des échangeurs de pression (Figure II.3) ; le système le plus efficace disponible actuellement il prouve leur efficacité de réduire la consommation d'énergie jusqu'à 95% [21].

Le dispositif de récupération d'énergie échangeur de pression facilite le transfert de pression du courant de rejet saumâtre à haute pression au courant d'alimentation en eau de mer à basse pression. Il fait ceci en mettant les deux courants en contact momentané direct qui se produit dans les conduits d'un rotor. Le rotor est introduit dans un manchon en céramique entre deux capuchons en céramique avec des jeux précis qui, lorsque remplis avec de l'eau à haute pression, créent un palier hydrodynamique presque sans friction. À tout instant donné, la moitié des conduits du rotor sont exposés au courant à haute pression et l'autre moitié au courant à basse pression. Alors que le rotor tourne, les conduits passent une zone scellée qui sépare la haute pression et la basse pression. Ainsi, les conduits qui contiennent la haute pression sont séparés des conduits adjacents contenant la basse pression par le joint d'étanchéité qui est formé avec les ailettes du rotor et les capuchons en céramique [28,29].

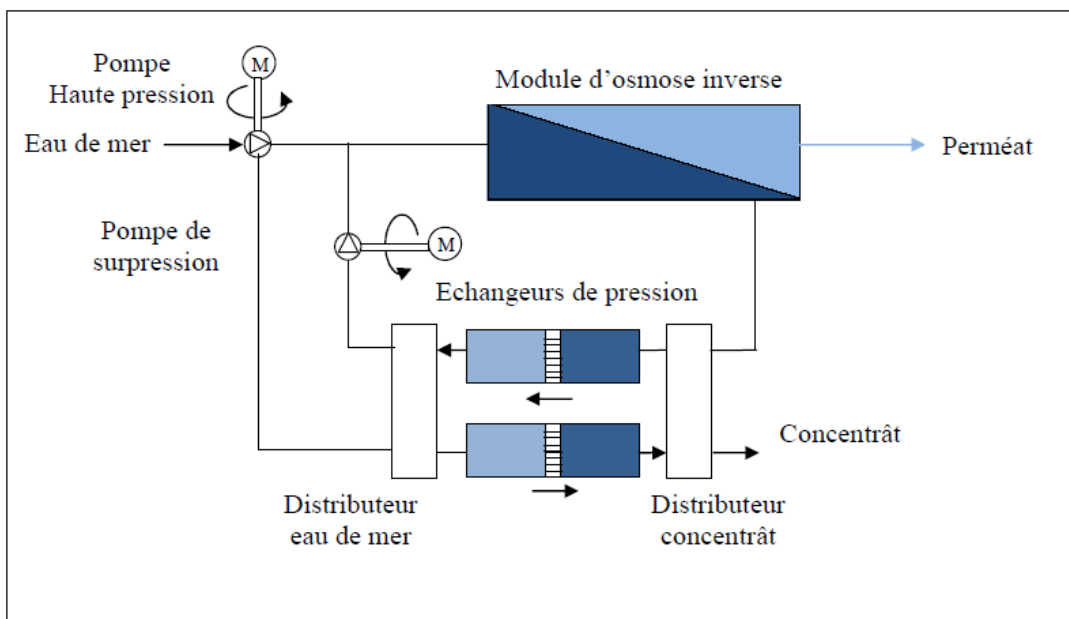


Figure II.3. : Principe de l'échangeur de pression [17].

Il existe plusieurs fabricants d'échangeur de pression ERI (PX), Calder (DWEER), RO KINETIC et KSB (SALTEC DT), Danfoss (I SAVE) [44, 45, 46,47] sont les principaux fabricants de ce type d'équipements et sont maintenant en compétition pour avoir le meilleur concept [20].

### **II.4.3 Energie solaire et éolienne :**

Malgré le développement accéléré et les améliorations énormes dédiées aux diverses technologies de dessalement, leur utilisation reste encore limitée. Cette limitation est principalement liée aux besoins énergétiques élevés des technologies de dessalement, surtout que les sources d'énergies conventionnelles ou fossiles deviennent de plus en plus chères et aussi leur utilisation engendre plusieurs risques écologiques et environnementaux (pollution d'air, réchauffement climatique...etc.). Pour cette raison, le couplage des technologies d'énergie renouvelable et les procédés de dessalement est considéré comme l'un des moyens les plus prometteurs pour produire l'eau douce à partir des eaux salines tout en évitant les problèmes liés au dessalement par utilisation des énergies fossiles [28].

Les énergies renouvelables sont généralement des sources d'énergie générée naturellement et en permanence par des phénomènes physiques (mouvement du vent, marées, rayonnement solaire, énergie géothermique... etc.), l'exploitation de ces types d'énergie est beaucoup moins polluante que l'utilisation des énergies fossiles et aussi elle est devenue de plus en plus compétitive grâce à la recherche et développement technologique. Les technologies d'énergie solaire photovoltaïque, d'énergie thermique et d'énergie éolienne sont les principales technologies renouvelables les plus utilisées dans le dessalement des eaux salines.

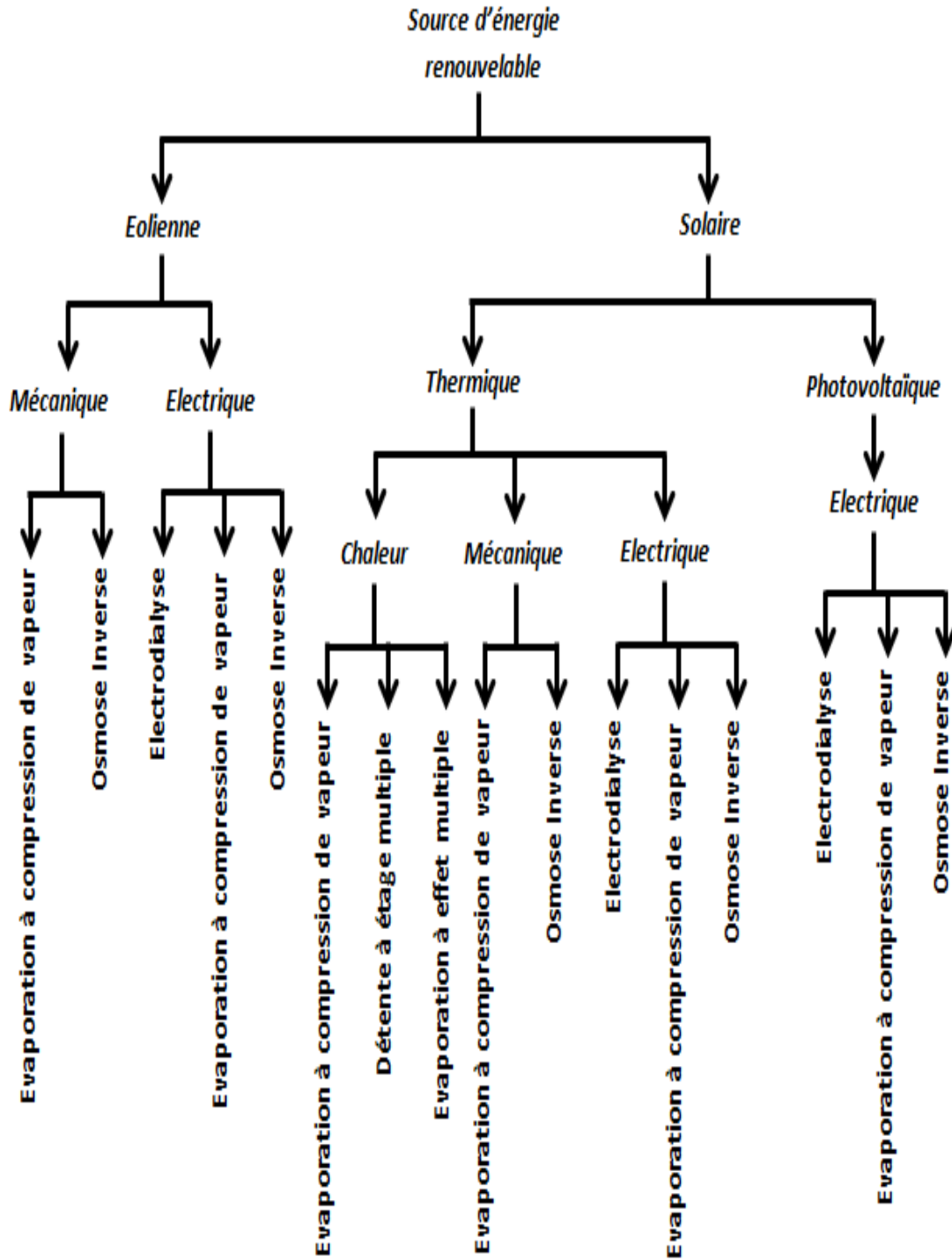


Figure II.4. Différentes combinaisons entre les technologies d'énergie renouvelable et procédés de dessalement

## **II.5 Couplage des procédés de dessalement membranaire et des technologies d'énergie renouvelable :**

Généralement, les procédés de dessalement membranaires consomment l'énergie électrique ou mécanique, comme le montre la figure A-10. De ce fait, ce type de procédé est souvent couplé avec les technologies renouvelables produisant l'électricité ou un travail mécanique, comme : la technologie éolienne, la technologie photovoltaïque, et technologie de production d'électricité par concentration d'énergie solaire combinée aux machines thermiques (turbines à vapeur ou turbine à gaz). La sélection de la technologie de l'énergie renouvelable la mieux adaptée et la plus convenable à être combinée avec les procédés de dessalement membranaires, dépend de plusieurs facteurs techniques, économiques et géographiques tels que la taille de l'unité de dessalement, potentiel et disponibilité de la source d'énergie naturelle et coût de matériel et de construction. Dans le cas de l'osmose inverse, l'énergie solaire peut être utilisée comme source motrice pour alimenter les pompes (pompes haute pression, pompes de circulation, pompes doseuse... etc.) à travers l'utilisation des panneaux solaire photovoltaïque produisant l'électricité, ou des collecteurs d'énergie solaire produisant l'énergie thermique par concentration des rayonnements solaire, qui par la suite peut être transformée sous forme de travail mécanique ou électrique. L'énergie éolienne peut également être utilisée comme source d'énergie principale à travers l'utilisation des turbines éolienne, produisant un travail mécanique ou électrique.

## **II.6 Modélisation du procédé d'osmose inverse**

### **II.6.1 Installation classique d'osmose inverse**

La plupart des installations de dessalement par osmose inverse (toutes les petites unités de production inférieures à 100 tonnes/jour) fonctionnent suivant le principe très simple du schéma ci-dessous.

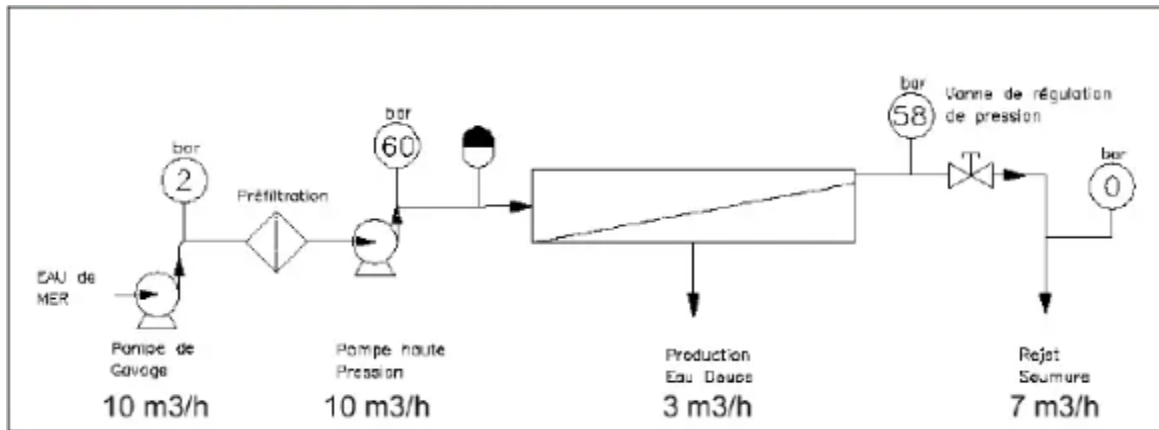


Figure II.5. : Schéma d'une installation classique

L'eau de mer est aspirée par la pompe de gavage et refoulée sous 2 bar dans la pré filtration. La pompe HP volumétrique, refoule à débit constant les 10 m3/heure d'eau de mer, dans les modules contenant les membranes. En créant une perte de charge au refoulement des modules, au moyen de la vanne de pression, on génère une augmentation de pression dans les modules : au-delà de 28 bar , le phénomène d'osmose inverse s'établit, et à une pression de 60 bar environ, la production des modules atteinte moyenne 30% du volume d'eau de mer pompée. La saumure chargée des sels minéraux, soit 70% de l'eau de mer pompée, est rejetée à la mer après détente à la pression atmosphérique dans la vanne de pression. Le bilan énergétique du système est le suivant :

Pompe de Gavage : 10 m3/h à 2 bar = 2 kW

Pompe Haute pression : 10 m3/h à 60 bar = 20 kW

Soit 22 kW pour une production de 3 m3/h et donc un ratio de 6,66 kWh/m3

En réalité, dans un tel système, 70% de l'énergie utilisée pour élever la pression de l'eau de mer est perdue par détente dans la vanne de régulation.

## II.6.2 Installation avec récupération sur un turbo compresseur

Les grosses installations (Unités au-delà de 150 à 200 tonnes/jour) utilisent des systèmes à turbines qui remplace la vanne de régulation et permettent de récupérer 30% à 35% de l'énergie perdue au rejet. Ces unités fonctionnent sur le schéma de principe suivant :



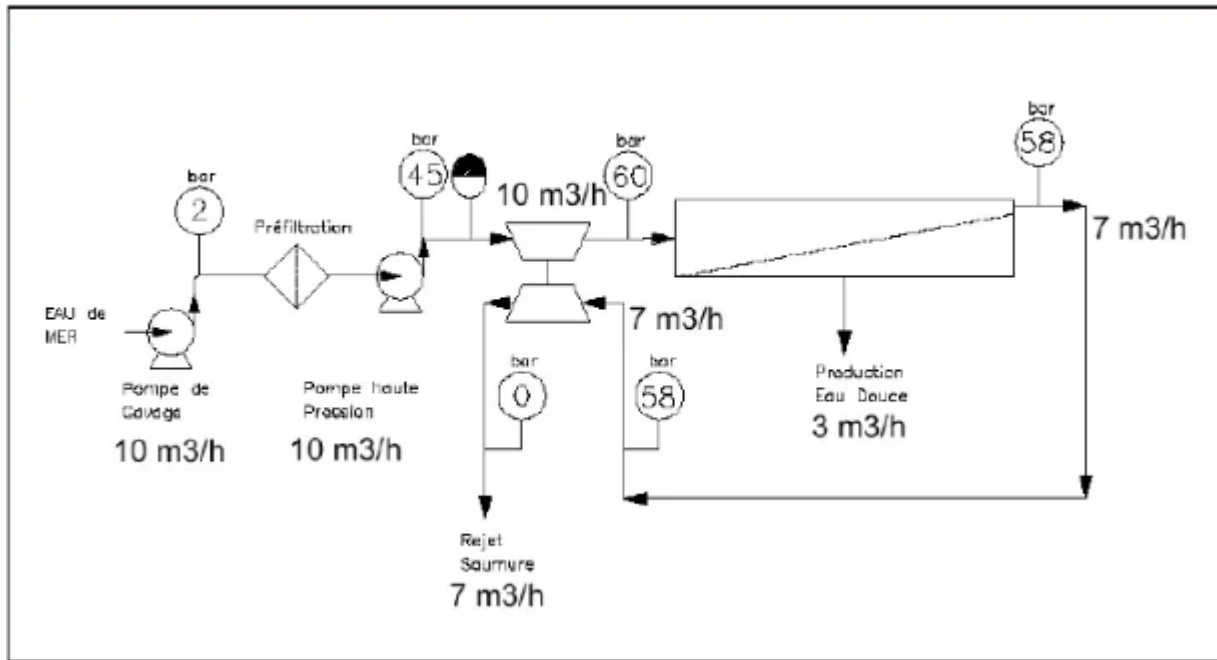


Figure II.6. : Installation avec turbocompresseur

Le rejet de saumure (7 m<sup>3</sup>/h à 58 bar) est envoyé sur la turbine réceptrice d'un turbocompresseur fonctionnant à l'eau de mer. Cette turbine joue le rôle de la vanne de pression en créant une perte de charge sur le rejet de saumure, l'énergie ainsi récupérée permettant d'élever la pression de l'eau de mer au refoulement de la pompe HP, de 15 bar environ sur un débit de 10 m<sup>3</sup>/h. (Le rendement du turbo est donc d'environ 35% : transformation de 7m<sup>3</sup>/h à 58 bar vers 10m<sup>3</sup>/h à 15 bar). Dans ce cas, la pompe haute pression ne doit plus délivrer que 10 m<sup>3</sup>/h sous 45bar soit une économie énergétique de 25%.

Dans ces nouvelles conditions, le bilan énergétique de l'installation devient :

Pompe de Gavage : 10 m<sup>3</sup>/h à 2 bar = 2 kW

Pompe Haute pression : 10 m<sup>3</sup>/h à 45 bar = 15 kW

Soit 17 kW pour une production de 3 m<sup>3</sup>/h et donc un ratio de 5,66 kWh/m<sup>3</sup>

Compte tenu du coût élevé du turbo compresseur compatible eau de mer, ce type d'équipement n'est rentable que sur des installations de capacité plus élevée, au moins 200 m<sup>3</sup>/h.



Figure II.7. : Osmoseur SH62-928 équipé d'un turbo.

### II.6.3 Installation avec échangeur de pression

Un nouveau concept de récupération fait ses preuves sur les installations de dessalement par osmose inverse et permet de récupérer 95% de l'énergie du rejet de saumure, c'est le système d'échangeur de pression.

Le schéma de l'installation est fortement modifié par rapport à un système standard, le principe de base est de transmettre la pression de la saumure à la même quantité d'eau de mer nouvelle entrant dans le circuit et ainsi de réduire la taille de la pompe haute pression à un débit correspondant non plus au débit d'eau de mer (10 m<sup>3</sup>/h dans notre exemple) nécessaire au bon fonctionnement des membranes, mais seulement au débit de perméat (Volume d'eau douce produite; 3 m<sup>3</sup>/h dans l'exemple.) entraînant ainsi un gain important de puissance.

Le système fonctionne suivant le nouveau schéma :

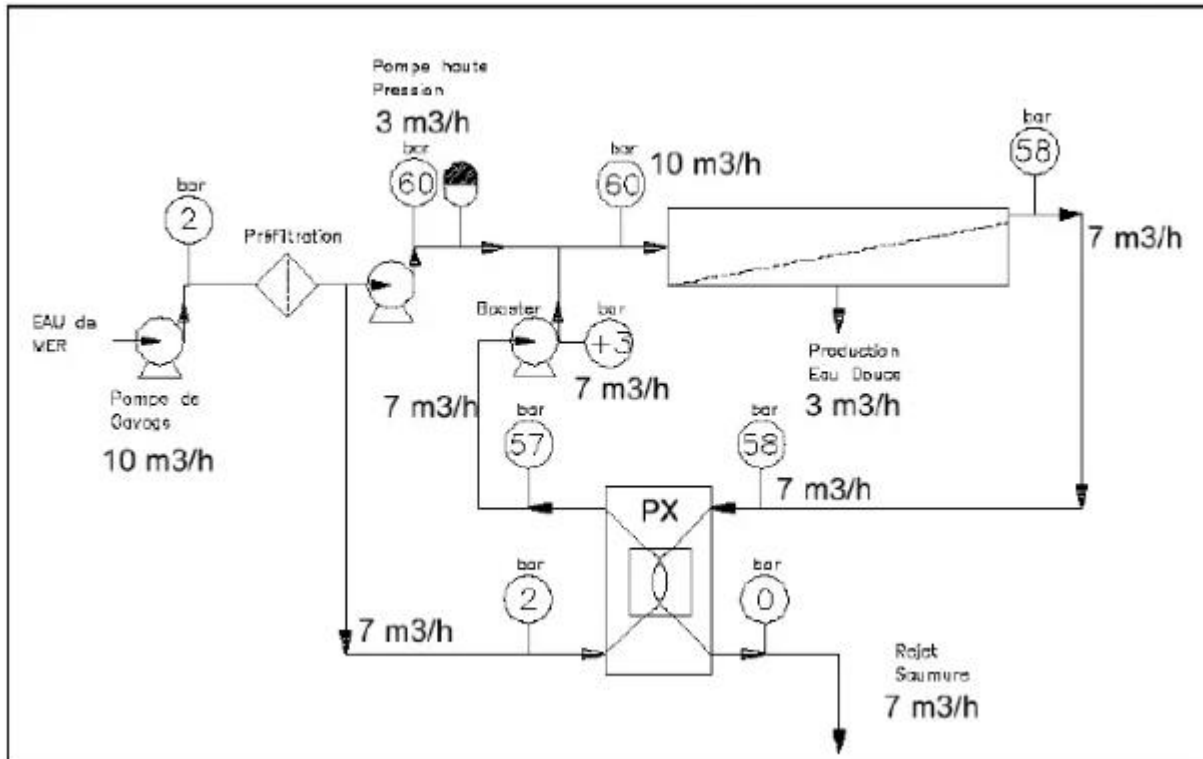


Figure II.8. : Installation avec échangeur de pression.

La pompe de gavage fournit à l'installation la même quantité d'eau de mer (10m3/h) à 2 bar, mais cette fois, seulement 3 m3/h sont dirigés vers une pompe HP trois fois plus petite. Le complément de 7 m3/h est envoyé vers l'échangeur de pression PX qui transmet la pression de 58 bar des 7m3/h de saumure à cette nouvelle eau de mer. L'eau de mer montée à 57 bar sort de l'échangeur, récupère sur un booster en lignées 3 bar qui lui manque pour rejoindre l'eau de mer sortant de la pompe haute pression et c'est bien un débit de 10 m3/h à 60 bar qui entre dans le module d'osmose inverse, donc dans les mêmes conditions que le schéma standard. La production est donc identique à savoir 3 m3/h d'eau douce. La différence de 7m3/h se retrouve à la sortie saumure sous 58 bar et revient vers l'échangeur pour fournir l'énergie à l'eau de mer. La saumure, après avoir cédé sa pression sort de l'échangeur vers le rejet à pression atmosphérique.

Le nouveau bilan énergétique de l'installation devient :

Pompe de Gavage : 10 m<sup>3</sup>/h à 2 bar = 2 kW

Pompe Haute pression : 3 m<sup>3</sup>/h à 60 bar = 6 kW

Booster: 7 m<sup>3</sup>/h à 3 bar = 1,5 kW

Soit 9,5 kW pour une production de 3 m<sup>3</sup>/h et donc un ratio de 3,2 kWh/m<sup>3</sup>.



**Figure II.9. : Echangeur type PX 180 sur l'une des unités SLCE de 500 m<sup>3</sup>/jour.**

## **II.7 Conclusion**

Les sources non conventionnelles en eau que sont le dessalement et la réutilisation de l'eau, pour les pays qui ont des ressources en eau douce limitées, contribuent à réduire l'écart entre prélèvements d'eau douce et approvisionnement durable, mais dans l'approche « connexion eau-énergie » ils contribuent également à l'augmentation de la demande énergétique du secteur de l'eau. Bien que le dessalement et la réutilisation de l'eau atteignent moins de 1 % des besoins mondiaux en eau, ces processus représentent près du quart de la consommation totale d'énergie dans le secteur de l'eau. En 2040, les deux sources devraient représenter 4 % de l'approvisionnement en eau, mais 60 % de la consommation d'énergie du secteur de l'eau. La

capacité de dessalement devrait augmenter de manière significative au Moyen-Orient, et en 2040, le dessalement devrait représenter plus de 10 % de la consommation finale totale d'énergie du Moyen-Orient.

Le but de ce projet est de minimiser la consommation énergétique dans les stations de dessalement. Pour aboutir à ce but, plusieurs méthodes de récupération énergétique ont été adaptées selon la source d'énergie utilisée : Solaire, éolienne, hydraulique...etc.

D'après les recherches effectuées on constate que le processus de dessalement le plus rentable est celui de l'osmose inverse et les systèmes de récupération d'énergie les plus efficaces et les plus utilisés dans le secteur c'est les systèmes de récupération par la turbine ou par l'échangeur de pression.

Le chapitre suivant représente une étude comparative en les deux systèmes de récupération.

# *Chapitre III*

## *Etude Comparative des systèmes de récupération*

**III.1 Introduction :**

Le dessalement industriel est l'une des meilleures façons de produire de grandes quantités d'eau potable dans les zones qui ne sont pas normalement accès à la surface ou les eaux souterraines. Malheureusement, le dessalement a un certain nombre de lacunes par rapport à la production des eaux souterraines. Dessalement manque l'efficacité énergétique de la purification des eaux souterraines, la consommation d'environ quinze fois la quantité d'électricité des unités d'osmose inverse typique des eaux souterraines.

Des technologies de récupération d'énergie ont été adaptées, qui recycle l'énergie de sortie de la saumure, ce qui réduit la puissance nécessaire de la pompe haute pression et la maximisation de l'efficacité énergétique.

Parmi les technologies on a choisi les deux systèmes les plus utilisés pour être le sujet d'une étude comparative énergétique ;

- Système de récupération par la turbine de Pelton.
- Système de récupération par l'échangeur de pression.

## III.2 Turbine de Pelton :

### III.2.1 Historique et conception :

La roue Pelton a été inventée dans les années 1850. Originaire de San Francisco, c'est une sorte de roue à eau. La roue Pelton utilisée dans les usines de dessalement est facile à utiliser. Il a une buse d'entrée à travers laquelle l'alimentation haute pression est dirigée sur les godets de la roue. La buse est conçue de telle sorte que toute l'énergie cinétique de l'alimentation sous pression est convertie en énergie mécanique manifestée sous forme de rotation [30]. Les godets, également appelés palettes, de la roue sont disposés en série autour de l'arbre, qui intercepte le flux d'alimentation [31]. Comme pour le turbocompresseur hydraulique, la pompe de la roue Pelton est entraînée par une turbine. Cette pompe augmente la pression de l'alimentation avant qu'elle n'entre dans le HPP, réduisant ainsi la consommation d'énergie [32].

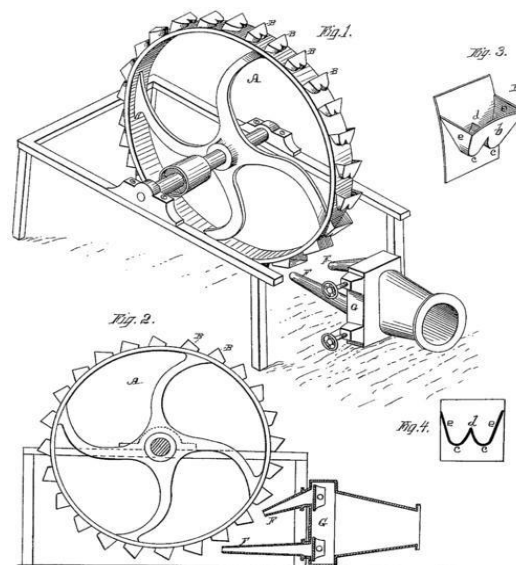


Figure III.1 : Dessin de la roue de Pelton tiré du brevet original (octobre 1880)

La roue Pelton est populaire dans le monde entier et est plus efficace que la FT [33]. L'efficacité de la roue Pelton reste constamment élevée même lors des variations de pression et de débit d'alimentation [34]. La conception et l'entretien des pièces métalliques constituent toutefois un défi de taille, car elles sont facilement corrodées lorsqu'elles sont exposées à l'eau de mer [31].



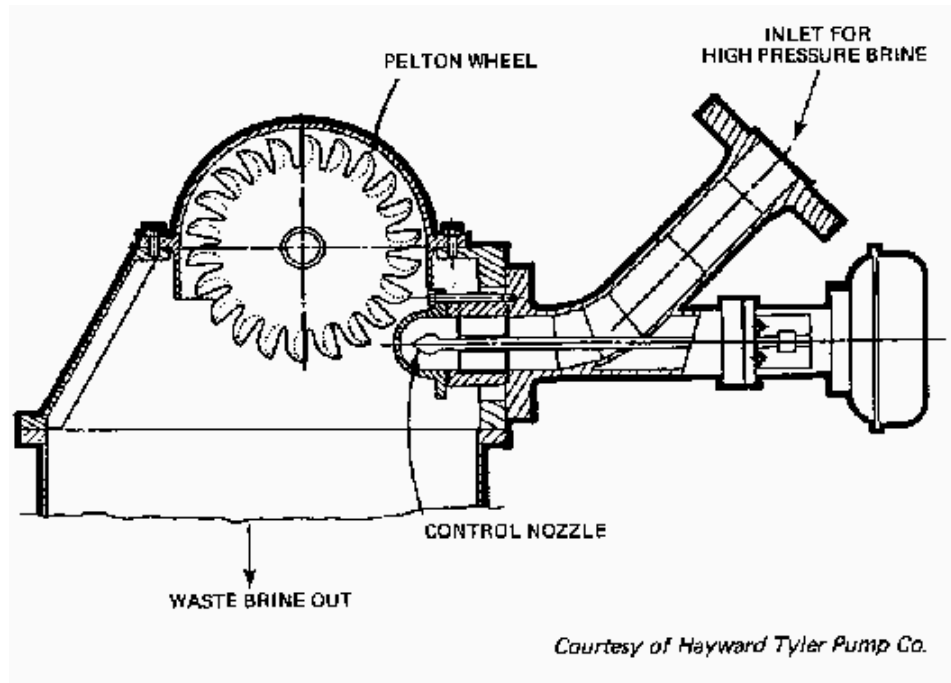


Figure III.2. : Disposition de section d'une roue de Pelton

### III.2.2 Rendement à double creux :

L'efficacité réalisable des usines de dessalement SWRO utilisant des roues Pelton est de 80 à 85 % [35]. Une caractéristique commune de la roue Pelton et du FT est que ceux-ci transfèrent l'énergie récupérée de la saumure vers le HPP via l'arbre. Tout en calculant la perte totale d'énergie, l'énergie perdue par le PPR et la réduction de l'efficacité énergétique de la roue doivent également être prises en compte [35]. On peut aussi parler de « double trempage » dans l'efficacité énergétique [35]. En plus d'une réduction de la récupération, il y a une augmentation de la quantité d'aliments à haute pression entrant dans le DER, ce qui réduit l'efficacité de la récupération d'énergie. Les données indiquent que l'efficacité énergétique d'une usine de dessalement utilisant un HPP centrifuge, couplée à une roue Pelton, augmente avec une augmentation du pourcentage de récupération. Par conséquent, la plupart des usines de dessalement SWRO sont conçues pour fonctionner à une récupération plus élevée. En termes clairs, on peut dire que le DER qui fonctionne à un taux de récupération de 45 % a deux fois plus d'efficacité que celui qui fonctionne à un taux de récupération de 25 %, et cela est dû au fait que les usines de dessalement sont conçues pour atteindre un taux de récupération plus élevé [31].

**Cas étudié : Usine de dessalement Ummlujj :**

Cette usine, propriété du SWCC, compte deux trains nommés 100 et 200. Chacun de ces trains a deux PPN qui sont couplés à une roue Pelton. Un ensemble de HPP et son ERD couplé est maintenu en veille tandis que l'autre est en cours d'exécution. La dureté de l'eau est enlevée pendant le prétraitement. La salinité de l'eau de mer à cette usine se situe entre 41 000 et 43 000 mg/L. Le tableau III.1. Présente les spécifications de cette usine [36].

Il est maintenant évident que l'efficacité d'une unité DRE influe sur les économies d'énergie. La SEC représente plus de 80 % de l'énergie totale requise [32] pour la production d'une unité du perméat. La conception d'une centrale est telle qu'elle est optimisée pour le moins de SEC, qui est l'énergie consommée par le PPR. Cependant, le papillon des gaz remet en question cet objectif. Le papillon des gaz est utilisé pour la régulation de la pression d'alimentation. L'énergie dans le flux d'alimentation est réduite par les soupapes d'étranglement avant d'atteindre la membrane, ce qui rend difficile de réduire la SEC [34]. Par conséquent, des tentatives ont été faites pour évaluer l'efficacité du DRE et la quantité d'énergie perdue en raison de l'étranglement, de sorte que la SEC peut être réduite en concevant une technologie appropriée. Les usines de SWCC utilisent les roues FT et Pelton. L'usine d'Ummlujj est la seule usine de SWCC qui utilise uniquement la roue Pelton.

<b>Détails de la pompe haute pression</b>	Spécification	Capacité de 400 m <sup>3</sup> /h 0,86 à 65,8 bar
	Facteur de puissance	0.86
	Tension (kV)	4.16
	Efficacité globale (%)	70
<b>Détails du dispositif de récupération d'énergie</b>	Spécification	Capacité de 251 m <sup>3</sup> /h à 53 bars
	Efficacité globale (%)	85

**Tableau III.1. : Spécifications de l'usine de dessalement Ummlujj**

D'autre part, il est souvent rentable de combiner la production d'eau douce avec une autre activité notamment la production d'énergie, car la vapeur disponible à la sortie des turbines, et perdue dans une usine classique, est réutilisable dans une station de dessalement dite thermique ou fonctionnant sur le principe de l'évaporation [ ].

### III.3 Echangeur de pression :

#### III.3.1 Historique et conception :

Système d'échangeur de pression vient sous la classification de troisième classe d'ED, ce sont des pompes hydrauliques fonctionnant en parallèle.

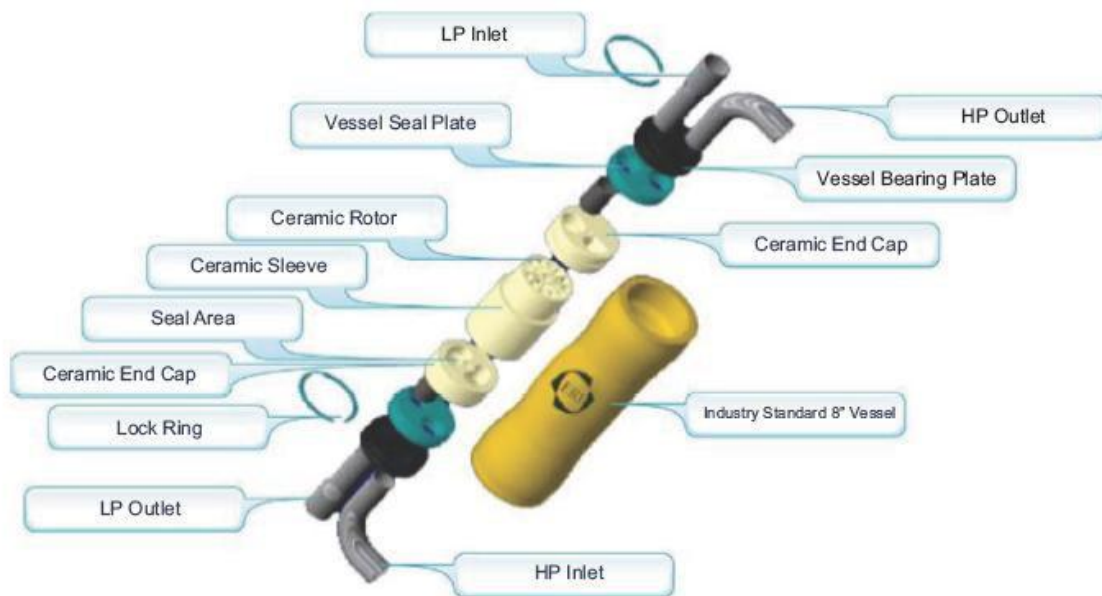
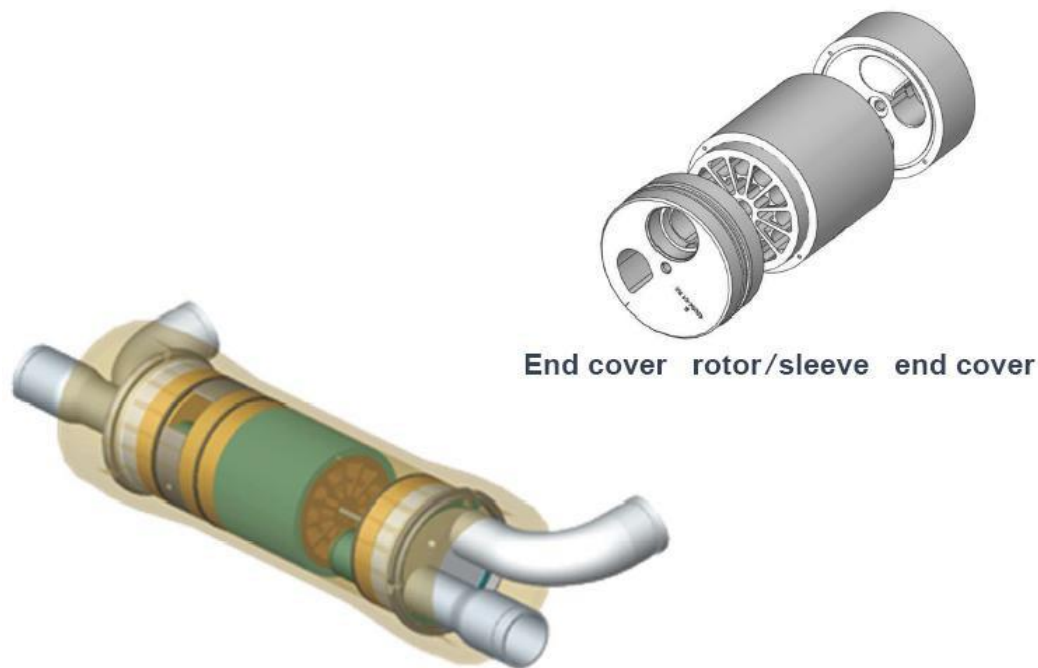


Figure III.3 : Vue éclatée de l'échangeur de pression.

« Rotor Pressure Exchange » (PX) est construit par « Energy Recovery Inc », une entreprise qui a consacré plus de 100 ans à sa technologie et à son développement. Les dispositifs d'échangeur de travail qui sont construits pour les usines d'osmose inverse d'eau de mer sont traités comme la percée technologique la plus remarquable dans les techniques de dessalement réalisées au cours des 15 dernières années. Le PX est le dispositif qui transfère la pression du fluide de haute pression à un fluide de basse pression fonctionnant selon le principe du déplacement positif [37].

Ces appareils ne sont pas aussi similaires utilisés dans des environnements moins exigeants ; PX est capable de répondre aux exigences difficiles car il est spécialement conçu pour les systèmes SWRO. Ce produit commercial a été introduit en 1997 [38].

Par la suite, la conception PX a connu de nombreuses améliorations, qui ont abouti à une capacité plus élevée du rotor unique à une valeur très élevée de 50 m<sup>3</sup> / h. Mais, son cadre technologique fondamental sur lequel il est construit n'a pas changé du tout [39]. La technologie utilisée comprend la récupération d'énergie à l'échelle SWRO en subissant de nombreux petits incréments de pression dans un dispositif rotatif en céramique [40].



**Figure III.4. : Echangeur de pression PX.**

Plus de 400 unités d'osmose inverse de l'eau de mer (SWRO) dans le monde ont utilisé les ED de l'échangeur de pression PX d'ERI. Juste en 2006, plus de 2500 unités ont été fournies qui ont une capacité combinée de 1,8 millions de m<sup>3</sup> / jour du fluide perméat [41].

Beaucoup de ces usines ont une capacité de 100.000 m<sup>3</sup> / jour. Par exemple Perth, Australie a une unité de 160.000 m<sup>3</sup> / jour [42], Hamma en Algérie a installé une unité de 200.000 m<sup>3</sup> / jour, Hadera en Israël a installé une usine de 274.000 m<sup>3</sup> / jour [43]. D'autres unités de haut débit sont installées à Benisaf en Algérie avec 200.000 m<sup>3</sup> / unité de jour et Skikda en Algérie avec 100.000 m<sup>3</sup> / unité de jour.

Parmi ces projets, on compte 20 ans de contrat d'entretien et d'exploitation. Les fournisseurs doivent donc tenir compte de la fiabilité et de la durée de vie, une partie importante de la conception de ces équipements [44]. Série 65 PX Les échangeurs de pression sont les dispositifs les plus utilisés pour ces équipements, et en particulier les modèles PX 180 et PX 220, sont couramment utilisés [42], Ces modèles sont disponibles sur le marché depuis 2003 et plus de 1400 unités sont utilisées jusqu'à présent. En 2006, ERI a pris des dispositions avec ses clients pour récupérer temporairement plusieurs unités PX à long terme et, dans l'installation d'essai de l'usine été évalué [39].

Dispositif PX fonctionne sur le déplacement positif et est un dispositif de récupération d'énergie isobarique. Il contient une cartouche en céramique qui est le cœur de l'appareil [37].

La cartouche est munie d'un couvercle d'extrémité d'eau d'alimentation, d'un rotor, d'un manchon et d'un couvercle d'extrémité concentré, comme le montrent les figures III.3. et III.4. La conception du rotor se compose de conduits axiaux disposés circulairement autour d'une tige de tension centrale. Il tourne dans le manchon et les deux capots d'extrémité entourent le rotor. Les surfaces d'étanchéité et de roulement sont également en céramique et la lubrification de la surface de broyage est réalisée par l'eau d'alimentation à haute pression. Le couvercle d'extrémité à l'extrémité du concentré se compose d'un port de concentré HP haute pression pour l'entrée HP (concentré HP) et d'un port de concentré basse pression pour l'écoulement du concentré (sortie LP). Du côté du couvercle d'extrémité d'eau d'alimentation, il y a deux ports d'eau d'alimentation appelés LP IN et HP OUT. Pour la conception de cet élément, la céramique est le choix naturel en raison de sa ténacité, sa résistance à la corrosion et sa stabilité dimensionnelle [41].

Le concentré haute pression est utilisé pour diriger la pressurisation de l'eau d'alimentation dans le dispositif PX. Afin de lubrifier le rotor, le débit de concentré est réglé à un débit légèrement supérieur à celui de l'eau d'alimentation, de sorte qu'une petite quantité d'eau d'alimentation facilite la lubrification du rotor [37].

Ainsi, le dispositif PX fournit aux membranes une partie du débit d'alimentation (partie de concentré) et la pompe à haute pression fournit une partie du débit d'eau d'alimentation et permet également un faible débit pour la lubrification [39].

La figure III.5. Montre le cycle de fonctionnement du dispositif. Comme expliqué ci-dessus, une gaine rotor est exposée aux orifices d'entrée et de sortie du capot. Comme indiqué à l'étape 1, le LP alimente la gaine du rotor et le positionnement des orifices du rotor sont tels qu'ils assurent un flux tangentiel qui exerce une force de rotation sur le rotor. Les gaines du rotor se terminent dans une zone d'étanchéité où le flux est arrêté et la gaine est scellée à partir du circuit de flux HP et LP, comme indiqué à l'étape 2. La gaine tourne davantage pour exposer le concentré de HP entrant qui pressurise l'eau d'alimentation et la pousse davantage vers les membranes, comme indiqué dans l'étape 3. Le rotor continue d'avancer jusqu'à ce que la gaine soit scellée comme on le voit à l'étape 4 et que tout le cycle recommence [44].

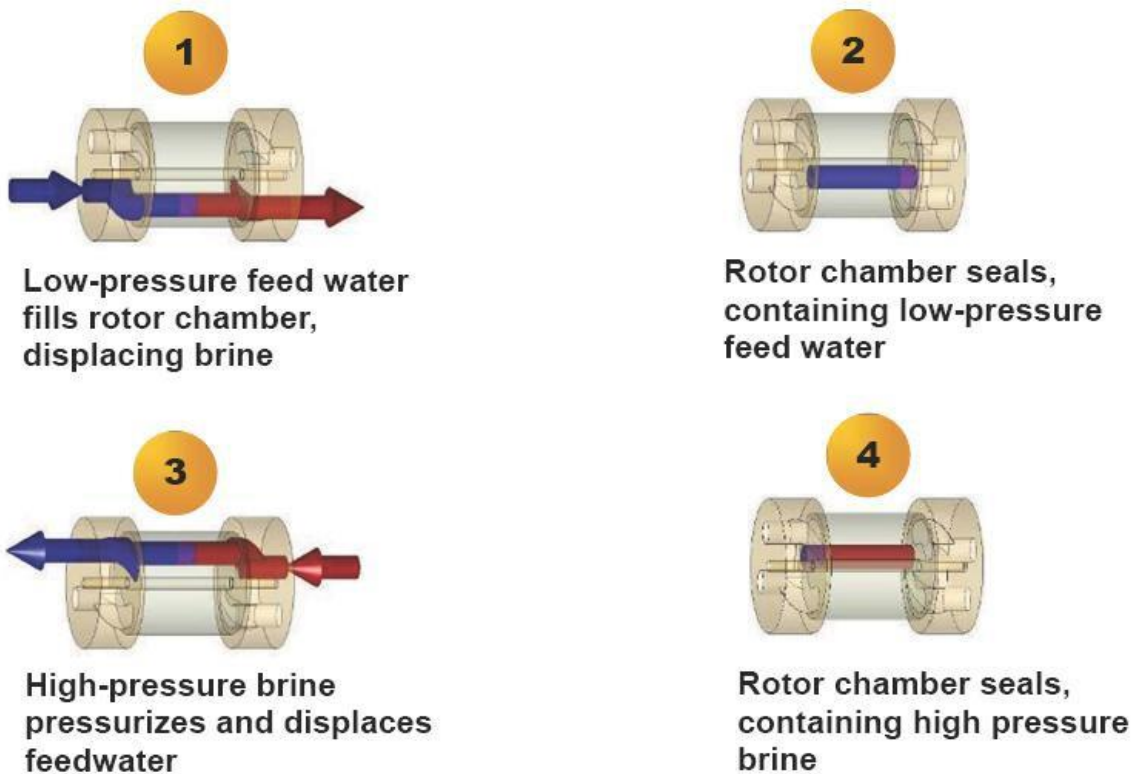


Figure III.5. : Fonctionnement du PX.

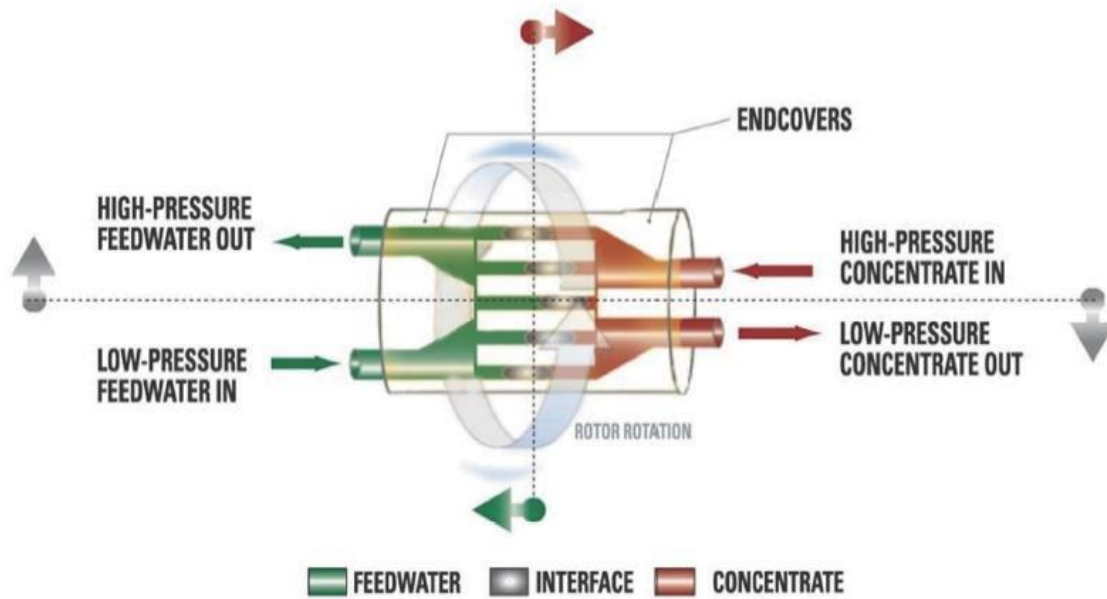


Figure III.6. : Cycle de fonctionnement du dispositif PX.

Bien que l'eau d'alimentation et le concentré entrent en contact direct dans le rotor, en raison de la barrière d'eau qui existe dans le conduit, il y aura un mélange limité entre l'eau d'alimentation et le concentré [44].

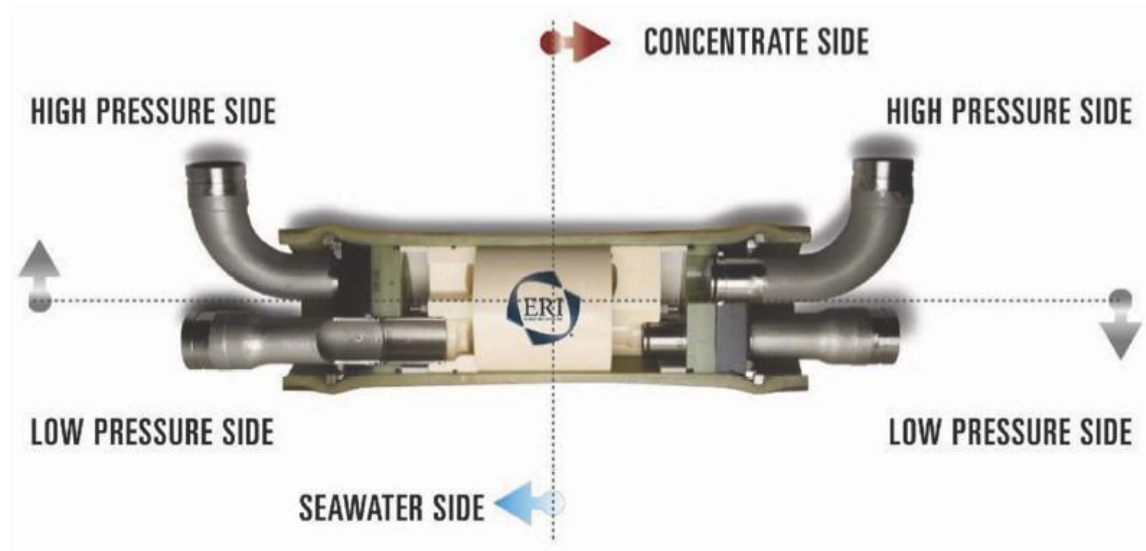


Figure III.7. : Vue de l'intérieur de la cuve sous pression.



La conception des composants céramiques est telle que l'eau d'alimentation et le concentré n'atteignent pas l'extrémité du conduit avant d'être scellés et de conserver ainsi la séparation. S'il reste de l'eau des cycles précédents, elle agit comme une barrière contre le mélange de ces flux. De plus, les gaines sont conçues de façon à être longues et étroites de sorte que le débit soit stabilisé et qu'il n'y ait pas de rupture de la barrière en raison de turbulences [41].

### **III.3.2 Efficacité et mélange :**

Les performances du dispositif PX peuvent être quantifiées par son efficacité de transfert d'énergie et aussi par le degré de mélange. L'efficacité du dispositif PX est le rapport de la production totale d'énergie par le Dispositif PX à l'entrée d'énergie totale de l'unité exprimée en pourcentage. Dans ce cas, l'énergie totale est obtenue sous forme de produit du débit et de la pression, qui sont donnés dans l'équation suivant : [45].

$$\text{Efficacité PX} = \frac{\Sigma (\text{pression} \times \text{pression de débit}) (\text{OUT}) \text{ sortie}}{\Sigma (\text{pression} \times \text{pression de débit}) (\text{IN}) \text{ entrée}} \times 100 \%$$

La relation présentée ici considère les pertes de débit et de pression dans l'unité PX. Comme le débit est perdu dans la lubrification, le débit HP IN est supérieur au débit HP OUT et le débit LP OUT est supérieur au débit LP IN. Cependant, il faut se rappeler que la perte due à la lubrification est très faible. C'est seulement 1% du flux d'alimentation concentré. Les pertes dues aux chutes de pression se produisent lorsque le flux rencontre des frottements provenant des passages internes de l'ensemble PX [41].

Dans les opérations SWRO utilisant le dispositif PX, il y a une salinité accrue dans la haute pression due au mélange dans le PX provoque une augmentation de la pression osmotique. Si un débit équilibré est maintenu, c.-à-d. que les débits de haute et de basse pression sont égaux, alors le mélange PX 220 est calculé à l'aide de l'équation suivante et est approximativement mis à 6 %:

$$\text{Mélange volumétrique} = \frac{(\text{salinité HPOUT} - \text{salinité LPIN})}{(\text{salinité HPIN} - \text{salinité LPIN})} \times 100 \%$$



Le débit à haute pression qui provient du booster ou de la pompe PX se mélange avec l'eau d'alimentation de la pompe à haute pression avant d'envoyer aux membranes. Normalement, la salinité augmente aux régions membranaires, pour l'usine fonctionnant à 40% de récupération est d'environ 2,5% et est donnée par l'équation :

$$\text{Augmentation de la salinité} = \frac{[(\text{salinité de la membrane d'alimentation} - \text{salinité de l'eau de mer}) / \text{salinité de l'eau de mer}] \times 100 \%}{}$$

Cette augmentation de 2,5 % de la salinité dans la région de la membrane entraîne une augmentation de la pression de service d'environ 1,3 bar [41].

Si la performance PX est utilisée pour exprimer l'efficacité, la diminution causée par le mélange de PX 220 avec un débit équilibré est calculée à 1 %. La plupart des opérateurs de l'usine et les ingénieurs préfèrent augmenter la pression de la membrane sans modifier les autres réglages ou équipements de procédé. En fait, il y a une augmentation de la salinité due à une augmentation de température de seulement 2°C qui est équivalent au même effet que vu par mélange dans le PX. Toutefois, si l'ingénieur ou l'opérateur de la centrale choisit de compenser le PX, la salinité augmente pour obtenir le même débit de perméat, mais sans modifier la pression de la membrane, alors cela peut être accompli par l'une de ces trois options [41] :

En diminuant la récupération de 2 %, ce qui entraîne une augmentation de 5 % du débit d'alimentation en eau de mer.

- Augmentation de 6 % de la surface de la membrane.
- Augmentation de 5 % de l'alimentation basse pression en PX.
- Les données présentées à la figure 7-7 montrent l'avantage de choisir la première option.

Les données se rapportent à une usine qui est alimentée avec 36000 TDS d'eau à 250 C. Si la récupération est réduite de 2 %, (de 40 % à 38 %), il en résulte une diminution nette des coûts d'exploitation de l'usine de 0,02 KWH / m<sup>3</sup>. Ceci est acceptable pour la réduction de la récupération à seulement 2% [44].

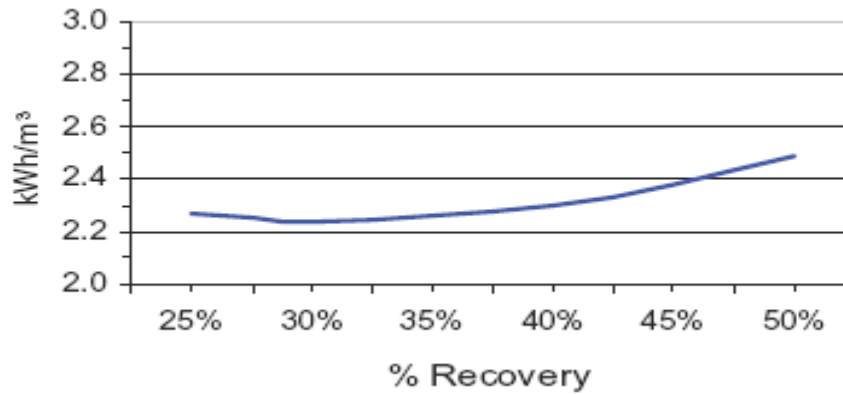


Figure III.8. : Consommation d'énergie des plantes en fonction de la récupération

Type	Class	Efficacité maximale	Aventages	Inconvenient
Turbine de Pelton	Pompage hydraulique à mécanique assistée	80% -85%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible coût en capital</li> <li>• Facilité d'utilisation</li> <li>• Optimisation de la conception de la roue Pelton et de la buse pour une transformation cinétique-mécanique efficace</li> <li>• Haute efficacité maintenue sur toute la plage de fonctionnement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement « double creux »</li> <li>• La géométrie du distributeur induit une dissymétrie et des écoulements secondaires à l'entrée de la buse</li> </ul>

Echangeur de pression (PX)	Pompage hydraulique en parallèle	98%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Noyau construit en céramique choisi pour être le matériau idéal pour sa ténacité, résistance à la corrosion et stabilité dimensionnelle résistant aux environnements salins les plus rudes</li> <li>• Contrairement aux turbines, aucune perte transformationnelle ne se produit dans un dispositif PX</li> <li>• Efficacité stable sur un large éventail de récupérations</li> <li>• Manque de joints et de roulements traditionnels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'investissement élevé</li> <li>• Pompe d'appoint nécessaire</li> <li>• Complexité de conception, de fonctionnement et d'entretien</li> <li>• Mélange, lubrification, trop-plein, différentiel de haute pression, différentiel de basse pression</li> </ul>
----------------------------	----------------------------------	-----	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tableau III.2: Comparaison entre turbine de Pelton et l'échangeur PX

### III.4 Conclusion

L'étude comparative entre les différents systèmes de récupération de l'énergie reste un challenge vue la diversité des critères de comparaison ;

- l'énergie récupérée sous forme de : pression, électricité, ....
- La nature du système adapté : mécanique, thermique,...
- La source de l'énergie récupérée : utilisée, renouvelable ....
- Le principe de minimisation de la consommation énergétique : la récupération de l'énergie perdue ou la minimisation de la consommation (en utilisant par exemples des sources d'eau moins salines (voir la désalinisation de l'eau glacée)).

# *Conclusion générale*

### **Conclusion générale**

La consommation d'énergie est un facteur clé qui influence le coût de production d'eau douce dans le processus d'osmose inverse (OI). Les options de récupération et de réutilisation de l'énergie ont déjà été très bien étudiées dans l'industrie actuelle du dessalement. Il n'est pas possible d'obtenir une consommation d'énergie théorique spécifique minimale pour la récupération de l'eau en raison des effets de la polarisation de la concentration, de l'encrassement de la membrane et de la résistance hydraulique à l'écoulement du perméat. En raison de ces limites, la récupération d'énergie et la récupération d'eau peuvent être une meilleure solution de rechange pour améliorer la consommation d'énergie et l'économie du processus d'OI, tant à petite qu'à grande échelle. Ce document passe en revue les configurations de processus et les stratégies d'exploitation actuellement disponibles et traite des voies possibles pour récupérer et recycler l'énergie et l'eau afin d'améliorer le rendement du processus d'OI.

## REFERENCES

---

### REFERENCES :

[1] : MANUEL D'exploitation et d'entretien, « Usine de dessalement de Mostaganem » (02/02/2011).

[2] : PDF, Dessalement eau de mer, « Dossier thématique-La Cité de la Mer-Technopole Cherbourg-Normandie » (Avril 2012).

**MAUREL A. (2006).** Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2eme édition, TEC & doc. 286p.

**EL KHABBAZE H. (2008).** **Traitement** des solutions modèles du lait par des membranes de nano filtration et d'osmose inverse. Chimie. Thèse de doctorat. Université Mohamed v AGDAL faculté des sciences rabat, Maroc.

**CHATKAEW T. (2009).** Procèdes hybrides à membrane pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse. Thèse de doctorat, université de Toulouse.

**ARZATE A. (2008).** Procédé de séparation membranaire et leurs applications dans l'industrie alimentaire. Revue de littérature. Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole inc.

**BERLAN J M & JUERY C. (2002).** le procédé membranaire pour le traitement de l'eau. Office international de l'eau (SNIDE). Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affair :es rurales. Direction de l'espace rurale et de la foret- France.

[3] : [« organisation et gestion de la production », 658.5-1 jav/lex 01 ;](#)

[4] : **A. MAUREL**, « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », 2 ème édition, TEC & doc. 286p, 2006.

[5] : **F. VALLIRON**, « Gestion des eaux: alimentation en eau d'assainissement », presses de l'école nationale des ponts et chaussés, Paris, 1989.

[6] : **R. DESJARDINS**, « Traitement des eaux ». Edition de l'école polytechnique de Montréal, 2ème édition 1997.

[7] : **R.H. HECTOR**, « Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable », Thèse de Doctorat. Institut national de sciences appliquées de Toulouse, 2006.

[8] : **J. B. CASTAING**, « Procédés de traitement de l'eau de mer en conchyliculture pour la sauvegarde et le maintien de la qualité des mollusques bivalves ». Thèse de doctorat. Génie des procédés. Université de Nante, 2011.

[9] : **B. CHENAOUI**, « Dessalement station de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement ». Séminaire Ouargla. Université de Chleff, 2010.

[10] : **SALOMON, J.**, Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir?, Magazine de Géographie et Aménagement du territoire, paragraphe 1, Centre d'études de Géographie et Aménagement du Territoire, pp. 237-262, 2012

[11] : **V. RENAUDIN**, « Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres » CNRS, Nancy 2003.

## REFERENCES

---

[12] : **BECHKI D. (2011)**. Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes. Doctorat en sciences en génie mécanique. Université Hadj lakhdar Batna.

[13] : [www.emse.fr](http://www.emse.fr) « brodahg » fiche9\_2.

[14]: Dundorf S, Macharg J, Seacord TF, « Optimizing lower energy seawater desalination, the affordable desalination collaboration. In: IDA World congress, Maspalomas, Gran Canaria», Spain; October 21-26, 2007.

[15]: Baltasar Peñate, « Energy optimization of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): Technical and thermos economic assessment », Energy 36 (2011) 613-626.

[16]: M.M. Rahman, C. Lusk, M.J. Giurgiu's, « Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices », Master Degree of Science, University of South Florida, 2011

[17] : Société de lorientaise construction électromécanique, « projet d'évolution de la Station de Dessalement d'eau de mer par osmose inverse de l'île de sein »,03-2006

[18] : Henri Boyé, « Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée », Aout 2008

[19] : Val S. Frenkel. « Seawater Desalination : Trends and Technologies, Desalination » Trends and Technologies, Michael Schorr (Ed.), ISBN : 978-953-307- 311-8,2011.

[20] : Erik D, Juan MP. « A case study: energy use and process design considerations for four desalination projects in California. In: IDA World Congress – Perth Centre Convention et Exhibition (PCEC). Perth, Western Australie, September 4-9, 2011.

[21]: A.M.K. El Ghonemy, «Waste energy in seawater reverse osmosis desalination plants .part2: case study», renewable and sustainable energy reviews 16(2012) 4016-4018

[22]: [www.recoveryenergy.com](http://www.recoveryenergy.com) le 05/04/2014

[23]: Aihua zhu, Panagiotis D, PH,Y C, « minimization of energy consumption for a two-pass membrane desalination: effect of energy recovery, membrane rejection and retentate recycling», journal of membrane science 126-137 ,2009

## REFERENCES

---

- [24] : Pierre Corsin, Fluid Consult et Guénaëlle Mauguin, « Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : les vrais besoins en énergie », N° 262-l'eau, l'industrie, les nuisances ,2003
- [25]: Schneider B. « Selection, operation and control of a work exchanger energy recovery system based on the Singapore Project ». *Desalination* 2005;184:1177-90
- [26]: Peñate B, dela Fuente JA, Barreto M. « Operation of the RO kinetic\_ energy recovery system: description and real experiences ». *Desalination* 2010;252:179-85.
- [27]: Bross S. SWRO core hydraulic system: extension of the SalTec DT to higher flows and lower energy consumption. *Desalination* 2007;203:160-7 [47] DANFOSS company website information, [www.isave.danfoss.com](http://www.isave.danfoss.com), le 11 mars 2014
- [28]: A.M.K. El-ghonemy, « waste energy recovery in seawater reverse osmosis desalination plants.part1: Review », *renewable and sustainable energy reviews* 18 (2013) 6–22.
- [29]: Stover RL. Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices. *Desalination* 2007; 203:168-75
- [30]: Avlonitis, S.A., *Operational water cost and productivity improvements for small- size RO desalination plants*. *Desalination*, 2002. 142: p. 295-304.
- [31]: Pique, G.G., *RO: New Device Shatters Seawater Conversion Conceptual Barriers*. Features, 2000. 42(7).
- [32]: M. Hajeeh, a.A.A.-O., *On performance measures of reverse osmosis plants*. *Desalination*, 2002. 144: p. 335-340.
- [33]: E.G. Darton, E.B., *Thirteen years' experiences treating a seawater RO plant*. *Desalination*, 2001. 134: p. 55-62.
- [34]: A.M. Farooque, A.T.M.J., Ali R. Al-Reweli, *Comparative Study of Various Energy Recovery Devices used in SWRO process*. Saline Water Desalination Research Institute.
- [35]: Mohammed Badrulla Baig, A.A.A.K., *Design features of a 20 migd SWRO desalination plant, Al Jubail, Saudi Arabia*. *Desalination*, 1998. 118: p. 5-12.
- [36]: Farooque, A., et al., *Parametric analyses of energy consumption and losses in SWCC SWRO plants utilizing energy recovery devices*. *Desalination*, 2008. 219(1-3): p. 137-159.



## REFERENCES

---

[37]: S. Mambretti, E.O., S. Gagliardi, R. Stover, *Behaviour of energy recovery devices in unsteady flow conditions and application in the modelling of the Hamma desalination plant*. Desalination, 2009. 238: p. 233–245.

[38]: Stover, R.L., *Development of a fourth generation energy recovery device A CTOs Notebook*. Desalination, 2004. 165: p. 313–321.

[39]: MacHarg, J.P., *Retro-fitting existing SWRO systems with a new energy recovery device*. Desalination, 2002. 153: p. 253-264.

[40]: *Energy recovery device is designed to make desalination affordable*. Membrane Technology, 2008. 2008(4): p. 9-10.

[41]: Cameron, I. and R. Clemente, *SWRO with ERI's PX Pressure Exchanger device — a global survey*. Desalination, 2008. 221(1-3): p. 136-142.

[42]: *Advanced energy recovery device for reverse osmosis membrane systems*. Environmental Thinking, (1).

[43]: *SWRO desalination plant uses ERI pressure exchanger*. Membrane Technology, 2008. 2008(9): p. 2-3.

[44]: ERI, *Doosan - ERI Technical Presentation*. 2011

[45]: Migliorini, G. and E. Luzzo, *Seawater reverse osmosis plant using the pressure exchanger for energy recovery: a calculation model*. Desalination, 2004. 165: p. 289-298.