

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Génie Mécanique

Option : Énergétique

Intitulé :

Etude de la réduction de la consommation énergétique
dans les stations de dessalement RO par Couplage avec
l'osmose directe

Présenté par :

- Benchikh Mohammed
- Filali Mohamed Younes

Soutenu le : /06/2021..... devant le Jury :

<i>Dr Seghier Oussama</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>Dr Chabane Mustapha</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Dr Djellouli Omar</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciements

Nous tenons à la fin de ce travail à remercier ALLAH de nous avoir guidés vers le droit chemin, de nous avoir aidées tout au long de nos années d'étude.

J'adresse mes remerciements au Monsieur CHABANE Mustapha pour m'avoir encadré et qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements pendant toute la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier Monsieur KHATIR Toufik, pour nous avoir Fait l'honneur de présider le jury.

J'adresse mes vifs remerciements à monsieur BENDAHOU Djeloul du centre universitaire Salhi Ahmed de Naâma de m'avoir fait l'honneur de juger ce travail.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc on Contribue au succès de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

A ma Mère, que dieu le garde et le Protège pour leurs soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mon Père et que Dieu puisse les accueillir dans son vaste paradis.

A mes frères.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment.

A tous mes collègues d'études.

Table des matières

TABLE DES ABREVIATIONS

TABLE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE PHENOMENE D'OSMOSE

I .INTRODUCTION GENERALE

 I .1.1 DECOUVERTE DE L'OSMOSE

 I .1.2 PRINCIPE DE BASE DE L'OSMOSE

I.3 EQUILIBRE DES CONCENTRATIONS

 I .4 LES MEMBRANES D'OSMOSE.

I .5.LES APPLICATIONS DU PHENOMENE D'OSMOSE. :

 I .5.1. DESSALEMENT DES EAUX SALUBRES.

 I .5.2 DESSALEMENT D'EAU DE MER..

 I .5.3 PRODUCTION D'EAU ULTRA PURE.

 I .5.4 TRAITEMENT DES EAUX USEES

 I .5.4.1.APPLICATIONS INDUSTRIELLES.

 I .5.4.2.INDUSTRIE PRODUCTRICE D'EAU POUR CONSOMMATION HUMAINE

 I .5.4.3.REUTILISATION DES EAUX USEES

CHAPITRE II : OSMOSE INVERSE

II.1. PRINCIPE DE BASE DE L'OSMOSE INVERSE

II.2. FONDEMENT THEORIQUE DE L'OSMOSE INVERSE

II.3. Les membranes d'osmose inverse

 II.3.1 MEMBRANES ORGANIQUES

 II.3.2 MEMBRANES MINERALES OU INORGANIQUES

- II.3.3 MEMBRANES COMPOSITES
- II.3.4 MEMBRANES ECHANGEUSES D'IONS

II.4. LES CONFIGURATIONS DES MODULES D'OSMOSE INVERSE

- II.4.1 MODULES PLANS
- II.4.2 MODULES SPIRALES
- II.4.3 MODULES TUBULAIRES
- II.4.4 MODULES FIBRES CREUSES .

I. II.5. PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME D'OSMOSE INVERSE

- II.5.1. TAUX DE CONVERSION
- II.5.2 TAUX DE REJET
- II.5.3 CONSOMMATION ENERGETIQUE

II.6. AVANTAGE DE L'OSMOSE DIRECTE PAR RAPPORT A L'OSMOSE INVERSE

- II.6.1. L'OSMOSE DIRECTE
- II.6.2. L'OSMOSE DIRECTE
- II.6.3. OSMOSE INVERSE ET OSMOSE DIRECTE

CHAPITRE 3

III.1. PRINCIPE DU COUPLAGE ENTRE L'OSMOSE INVERSE ET L'OSMOSE DIRECTE .

- III.1.1 LES DIFFERENTS TYPES DE MONTAGES
- III.1.2 MONTAGE EN SERIE - REJET DES MEMBRANES
- III.1.3 MONTAGE SERIE-REJET AVEC « BOOSTER » ENTRE ETAGES
- III.1.4 MONTAGE SERIE - PRODUCTION (OU MULTI-PASSES)

III.2. DEVELOPPEMENT MATHEMATIQUE

- III.2.1. PRESSION OSMOTIQUE ET DE FONCTIONNEMENT

III.2.2.REJECTION DE SEL

III.2.3.RECUPERATION DE PERMEAT

**III.3.RECUEIL DES PRINCIPAUX TRAVAUX SUR LE COUPLAGE ENTRE RO ET OSMOSE
DIRECTE**

**III.3.1 LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE L'OSMOSE INVERSE ET DE
L'ULTRAFILTRATION**

III.3.2 LES TECHNIQUES PRESENTEES PRESENTENT LES AVANTAGES SUIVANTS

III.3.3 NEANMOINS DES INCONVENIENTS EXISTENT

Table des abréviations

Π la pression osmotique (en Pa)

V le volume de la solution du compartiment (en m³)

n la quantité (ou nombre de moles) de soluté en solution (en mol)

R la constante universelle des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ kPa m}^3 / \text{kg mol K}$)

T Température (K).

$\sum X_i$ est la concentration de tous les constituants dans une solution Kg mol/m^3

SR est le rejet de sel.

J_p est le débit d'eau du perméat

J_f est le débit d'eau d'alimentation

C : concentration molaire de la solution

i : nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

Table des figures

Fig 1: Schéma d'un osmomètre.

Fig 2 : Pression osmotique et pression hydraulique.

Fig 3: L'osmose inverse.

Fig 4 : Procédé de séparation membranaire tangentiel.

Fig 5 : Schéma du procédé d'osmose inverse (d'après Aïmar P. et al., 2010)

Fig 6 : Schéma simplifié de fonctionnement d'une unité d'osmose.

Fig 7 : Montage série-rejet sans recirculation. Exemple d'un série-rejet 3-2. Conversion globale $Y = 70 \%$

Fig 8 : Système continu monoétagé. $Y = 80 \%$ sur un seul élément

Fig 9 : Montage série-production (ou à deux passes)

Fig 10 : Principe de l'osmose inverse (d'après site Internet relatif au génie alimentaire)

Fig 11 : Schéma du module plan Ray-Flow X 100 (Orelis)

Fig 12: Modules spirales

Fig 13 : Modules tubulaires

Fig 14 : Modules fibre creuses

Fig 15 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse

Fig 16 : Système d'osmose inverse

Fig 17 : Schéma de principe d'une unité de dessalement basé sur le principe d'osmose inverse

Fig 18 : Répartition des coûts d'exploitation moyens sur une usine de dessalement d'osmose inverse

Fig 19 : Station de dessalement O.I. fonctionnant avec le photovoltaïque

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des modules plans.

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des modules spirales

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des modules tubulaires

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des modules fibres creuses

Introduction Générale :

Avec la croissance démographique et économique, la crise de l'eau provoquée par la demande croissante de ressources en eau et l'aggravation de la pollution de l'eau est devenue l'un des problèmes les plus graves du 21^e siècle. Au cours de la dernière décennie, un nombre croissant d'efforts de recherche et technologiques ont été menés pour le traitement et la réutilisation des eaux usées. En particulier, les technologies membranaires à pression telles que la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nano filtration (NF) et l'osmose inverse (RO) ont fait l'objet d'une attention et d'une application approfondies dans le traitement des eaux usées et le dessalement de l'eau de mer. Cependant, les technologies susmentionnées sont principalement confrontées à trois défis majeurs: une consommation d'énergie élevée due à la haute pression, un processus de prétraitement strict et un encrassement important de la membrane . Par conséquent, une prise de conscience croissante des économies de coûts potentielles résultant de l'optimisation de l'énergie a suscité des efforts de recherche importants pour développer de nouveaux matériaux et technologies pour le traitement des eaux usées.

Ces dernières années, l'osmose directe (FO), en tant que processus membranaire osmotique à pression, a démontré de grandes perspectives d'application pour résoudre les défis mondiaux de l'eau et de l'énergie .

FO est un processus de séparation à base de membrane entraîné par la différence de pression osmotique entre les deux côtés de la membrane. Les molécules d'eau diffusent spontanément du côté de la pression osmotique inférieure vers le côté supérieur à travers la membrane semi-perméable sans pression externe. Le côté basse pression osmotique est appelé «solution d'alimentation» (FS), qui est progressivement concentrée. Le côté haute pression osmotique est appelé solution de tirage (DS), qui est continuellement diluée avec l'eau infiltrée.

Enfin, de l'eau propre est obtenue en séparant le soluté. Le processus ne nécessite aucune pression supplémentaire, contrairement au processus RO. Comparé à d'autres technologies membranaires, l'OF présente des avantages importants tels qu'une efficacité énergétique élevée, une faible propension à l'encrassement, un rejet élevé de sel et une faible décharge de saumure. Tout d'abord, en tant que processus d'infiltration spontanée ne nécessitant pas de pression motrice supplémentaire, l'OF a le potentiel de consommer peu d'énergie . Avec le DS et la méthode de recyclage approprié, ce point deviendra l'avantage le plus attractif de FO. Cependant,

Shaffer et al. ont proposé que les systèmes hybrides FO ne soient éco énergétiques que lorsqu'ils sont appliqués au dessalement des eaux d'alimentation à haute salinité à l'aide de DS thermolytique. Deuxièmement, la taille des pores de la membrane FO n'est que d'environ 0,3 à 0,5 nm, ce qui peut garantir un taux de rejet élevé du soluté et une application de dessalement, l'élimination des métaux lourds [6], des micropolluants (médicaments cytostatiques, perturbateurs endocriniens, produits chimiques d'entretien, etc.) élimination. De plus, le prétraitement n'est pas nécessaire pour le traitement des eaux usées complexes. Un autre avantage significatif de l'OP est la faible propension à la pollution. L'encrassement de la membrane est dominé par un encrassement réversible qui peut être restauré par un simple nettoyage hydraulique. Ceci est un avantage significatif lorsque FO est appliquée pour traiter la saumure à haute concentration. Lorsque l'eau de mer est utilisée comme DS, l'eau de mer diluée peut être directement rejetée dans la mer sans être concentrée et recyclée. Après avoir été concentré, le FS peut être utilisé pour générer de l'énergie par digestion anaérobie. Une autre forme de processus d'osmose, l'osmose retardée de pression (PRO), peut convertir les différences de pression osmotique entre l'eau de mer et l'eau douce en énergie électrique.

Malgré les avantages inhérents et les larges perspectives d'application, la commercialisation à grande échelle du procédé FO n'a pas été suffisamment possible en raison de certains obstacles tels que la régénération et la séparation des solutés d'étirage, la polarisation de concentration (CP) du côté alimentation, la diffusion inverse des solutés (RSD) et l'encrassement de la membrane. La pression d'osmose, fournie par DS, est la force motrice du transport de masse. Le type et la concentration de DS sont des facteurs importants affectant les performances du procédé FO. En outre, pour séparer les solutés de tirage, des méthodes énergivores - telles que la NF, la RO et la distillation membranaire (MD) - sont souvent intégrées à la FO. L'investissement et la consommation d'énergie du système intégré sont devenus un nouveau problème. En outre, CP et RSD sont deux facteurs significatifs entravant les performances des OP. La perméation d'eau des membranes sera affectée négativement en raison du gradient de pression osmotique réduit à travers la couche active résultant d'une augmentation de la pression osmotique sur la surface de la couche active de la membrane. En raison également du gradient de concentration, la diffusion inverse du soluté de tirage vers le FS semble inévitable. Le RSD peut non seulement réduire le gradient de concentration et le flux d'eau, mais également augmenter le CP et l'encrassement de la membrane. De plus, pour réduire

l'encrassement des membranes, les chercheurs ont fait beaucoup d'efforts en termes de matériaux membranaires , de structures membranaires et de combinaisons de processus .

Dans l'article, les contenus suivants sont passés en revue: (i) la dernière amélioration et les défauts de modification et de préparation de la membrane FO, les suggestions possibles dans la perfection de la préparation de la membrane FO; (ii) résumé des spécialités traditionnelles des solutés de tirage au sort, classifications des nouveaux solutés de tirage discutés dans les littératures; (iii) l'application de l'OP dans le traitement des eaux usées, en particulier l'accumulation de salinité dans le système de l'OP, réussite de la mise en œuvre du processus de l'OP; (iv) les développements récents sur l'encrassement des membranes et la stratégie de nettoyage. [1]

Nos travaux sont décrits dans Trois chapitres :

- Le premier chapitre : Généralités sur le phénomène d'osmose
- Le deuxième chapitre Osmose inverse
- Le troisième chapitre Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe

Chapitre I:

I.1. Découverte de l'osmose:

L'osmose est un phénomène naturel qui résulte suite à une migration du solvant d'une solution diluée vers une solution plus concentrée à travers une membrane semiperméable .

Durant les dernières années .l'osmose directe connaît de large applications Toutefois, comme elle réclame des pressions de travail élevées, les scientifiques essaient aujourd'hui de la remplacer par l'osmose que l'on a baptisée « osmose directe », pour bien la distinguer, dont voici un survol technique.

L'osmose, peu importe le sens qu'on lui donne, se résume à l'échange d'un solvant à travers des membranes semi-perméables. L'osmose inverse, la mieux connue, est définie comme le transfert opposé à l'osmose naturelle, obtenu en exerçant sur la solution concentrée une pression supérieure à sa pression osmotique. L'application la plus célèbre de ce procédé de séparation est le dessalement de l'eau de mer, où une membrane semi-perméable retient les sels et laisse passer l'eau sous l'influence d'une forte pression. Au Québec, elle est plutôt connue pour le rôle qu'elle joue dans la pré concentration de la sève des érables à sucre afin d'en limiter les coûts d'évaporation. Dans la nature, les transferts d'eau à travers la membrane des cellules se font en permanence et spontanément par osmose naturelle ou directe, sans l'aide de la pression. Tous ces échanges, directs ou indirects, sont gouvernés par la pression osmotique; une révision de sa signification et de ses propriétés peut s'avérer pratique.

Osмосe et pression osmotique :

La pression osmotique se développe si deux solutions de concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-sélective. Alors, un flux d'eau va passer du compartiment le plus dilué vers celui le plus concentré. Ceux-ci vont se mélanger jusqu'à atteindre l'uniformisation de leur concentration. On parlera alors d'osmosе directe, ou tout simplement d'osmosе. Lorsque cet équilibre est atteint, le niveau de l'eau du côté concentré s'est élevé et une pression se bâtit, que l'on appelle pression osmotique. Ce phénomène est naturel et ne dépend que de la concentration, car la pression osmotique est une propriété colligative. En d'autres mots, elle est seulement fonction du nombre de particules du ou des solutés et non pas de leur nature. En contrepartie, si on applique du côté concentré une pression dont la valeur excède la pression. [2]

I.2. Principe de base de l'osmosе :

La diffusion liquide correspond à une harmonisation des concentrations de soluté (substance dissoute) dans un solvant. L'osmosе est un cas particulier de diffusion liquide, lorsque

deux solutions de concentrations différentes sont mises de part et d'autre d'une membrane "semi-perméable", c'est-à-dire laissant passer le solvant (en général de l'eau) et non le soluté.

La différence de concentration provoque une différence de « pression osmotique » qui engendre un déplacement du solvant à travers la membrane et une dilution de la solution la plus concentrée. Il est important de comprendre que le solvant (l'eau) diffuse dans les deux sens (de la même manière, une diffusion a lieu dans tous les sens) : mais le flux le plus important (donc le flux net) a lieu vers la solution plus concentrée, ce qui la dilue.

Le solvant, pénétrant dans le vase, fait monter la solution dans le tube jusqu'à égaliser la pression osmotique et la pression hydrostatique (résultant notamment du poids de la colonne d'eau) : cet équilibre une fois atteint, la pression hydrostatique fait repasser autant de molécules d'eau à travers la membrane (vers le récipient) que le flux osmotique net en fait passer vers le vase intérieur. Un cas d'application bien connu d'osmose est la montée de l'eau dans les arbres : les cellules des racines « pompent » par pression osmotique l'eau du sol. La sève (solution aqueuse nutritive) monte alors des racines vers les branches, par pression osmotique aussi.

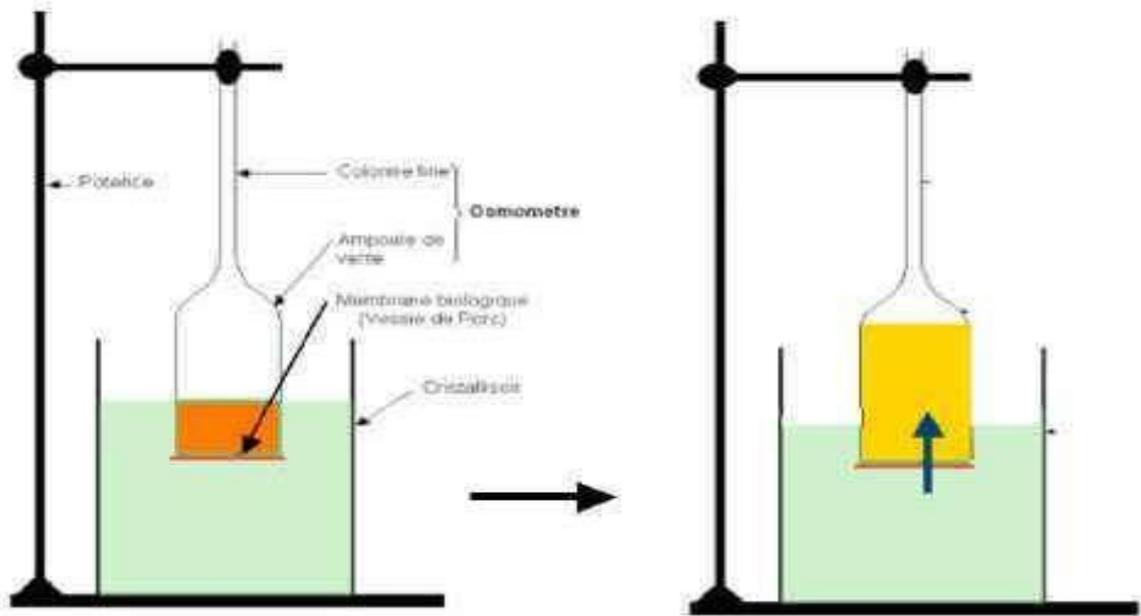


Figure 1 : Schéma d'un osmomètre

Une ampoule de verre contenant un soluté (en orange) est plongée dans un solvant (eau, en vert clair). Une membrane semi-perméable (ici une vessie de porc) sépare les deux compartiments ; Le solvant a diffusé au travers de la membrane cellulaire et dilué la solution jusqu'à ce que la pression hydrostatique de la colonne équilibre la pression osmotique (la pression minimum qu'il faut exercer pour empêcher le passage du solvant de la solution moins concentrée vers la solution plus concentrée). [3]

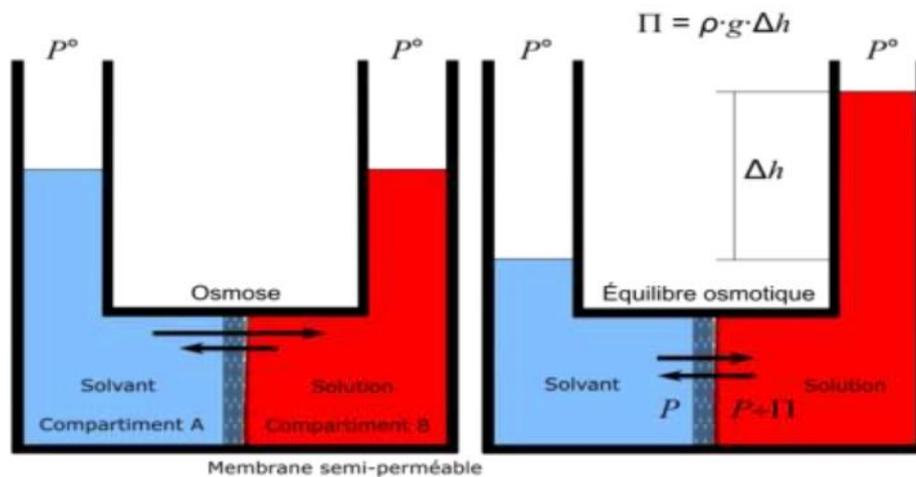


Figure 2 - Pression osmotique et pression hydraulique.

Lorsque l'on place un solvant S pur et une solution d'un soluté σ quelconque dans le même solvant de part et d'autre d'une membrane semi-perméable (ne laissant passer que le solvant), le solvant migre spontanément à travers la membrane du compartiment A contenant le solvant pur vers le compartiment B contenant la solution (voir figure 1) : ce phénomène est appelé osmose. Au bout d'un certain temps la migration du solvant cesse et un équilibre s'établit entre les deux compartiments. À l'équilibre osmotique la membrane subit une pression plus importante de la part de la solution que de la part du solvant pur ; le solvant migre donc du compartiment de plus faible pression, le compartiment A, vers celui de plus forte pression, le compartiment B.

La loi de van 't Hoff permet de calculer le surcroît de pression exercée par le compartiment contenant la solution dans le cas des solutions très diluées selon :

Loi de van 't Hoff, ou loi de l'osmométrie :

$$\Pi V = \eta RT$$

avec :

- Π la pression osmotique (en Pa), c'est-à-dire le surcroît de pression exercée sur la membrane par la solution du compartiment B par rapport au solvant pur du compartiment A ;
- V le volume de la solution du compartiment B (en m³) ;
- η la quantité (ou nombre de moles) de soluté en solution (en mol) ;
- R la constante universelle des gaz parfaits (en J/(K•mol)) ;
- T la température (en K).

La forme de cette loi rappelle celle des gaz parfaits $\{ \displaystyle PV=nRT \} PV=nRT$. Elle est totalement indépendante des propriétés intrinsèques du solvant et du soluté. Quelles que soient les conditions opératoires $\{ \displaystyle \Pi > 0 \} \Pi > 0$, c'est donc toujours le compartiment B contenant la solution qui exerce la pression la plus importante sur la membrane. [4]

I.3.Équilibre des concentrations :

La loi d'action de masse (ou loi de l'équilibre) stipule que, à une température donnée, il existe une relation constante entre les concentrations des produits et des réactifs à l'équilibre.

L'équilibre chimique prend un certain temps avant de s'établir. Au départ, la concentration des réactifs est au maximum, alors que les produits sont pratiquement inexistantes. Toutefois, à mesure que le temps passe, la concentration des réactifs diminue tandis que celle des produits augmente jusqu'à atteindre l'équilibre. Une fois l'équilibre atteint, les vitesses de réaction directe et inverse sont égales. Cependant, les concentrations des réactifs et des produits ne sont pas nécessairement égales. À partir de ces informations, les scientifiques ont élaboré une constante qui permet de décrire la relation entre les concentrations des substances à l'équilibre. [5]

I.4. Les membranes d'osmose :

La membrane est définie comme une barrière séparant deux compartiments et permettant le passage préférentiel d'au moins une espèce parmi les autres sous l'action d'une force de transfert chimique (concentration ...) ou physique (pression). En général, les constituants qui sont plus petits que les pores de la membrane sont capables de passer à travers sous l'effet d'une pression appliquée tandis que les substances et les molécules de taille plus importante sont retenues. La technologie de la filtration sur membrane peut être appliquée pour la séparation fluide / fluide ou particules / fluide en vue de récupérer les espèces valorisables (eau, lactose, sels minéraux....)

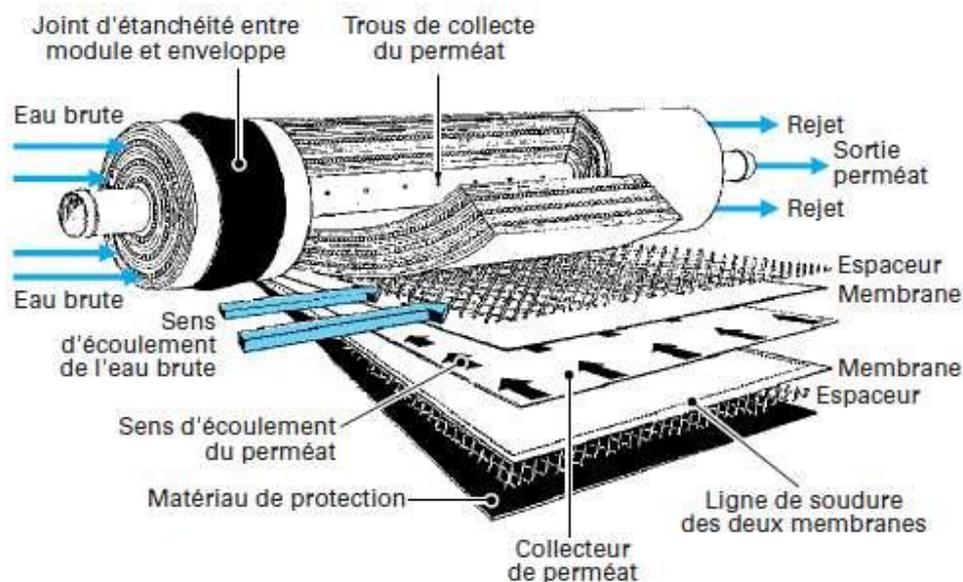


Figure 3 : L'osmose inverse

Les membranes ont des structures poreuses ou denses permettant de laisser passer de manière sélective les composants d'une solution sous l'action d'une différence de pression entre l'amont et l'aval de la membrane. Deux fractions sont obtenues : le rétentat, en amont de la membrane, qui contient les éléments retenus par la membrane, et le perméat, en aval, qui contient les éléments qui ont traversé la membrane. Les performances d'une membrane sont définies par sa sélectivité et sa perméabilité. Les membranes utilisées dans les procédés de séparation

membranaire sont caractérisées par le diamètre des particules ou la masse molaire d'une molécule qui est retenue par la membrane. Les composés ayant une masse molaire supérieure au seuil de coupure de la membrane sont retenus à plus de 90 % par la membrane. A l'inverse, les composés de masse molaire inférieure au seuil de coupure de la membrane sont retenus à moins de 90%.

Le SC (seuil de coupure) est Chapitre I 5 relié principalement à la taille des pores de la membrane, mais il est aussi beaucoup influencé par la forme de la molécule à filtrer, par sa charge, par son degré d'hydratation, par le pH et la force ionique de la solution à filtrer, par la pression appliquée et le flux de perméation. Le procédé de séparation membranaire est illustré schématiquement (Figure I-4). Le résultat d'une opération membranaire est la séparation du fluide à traiter en deux parties de concentrations différentes :

- le Retentât qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane,
- le Per méat qui contient les molécules qui traversent la membrane. [6]

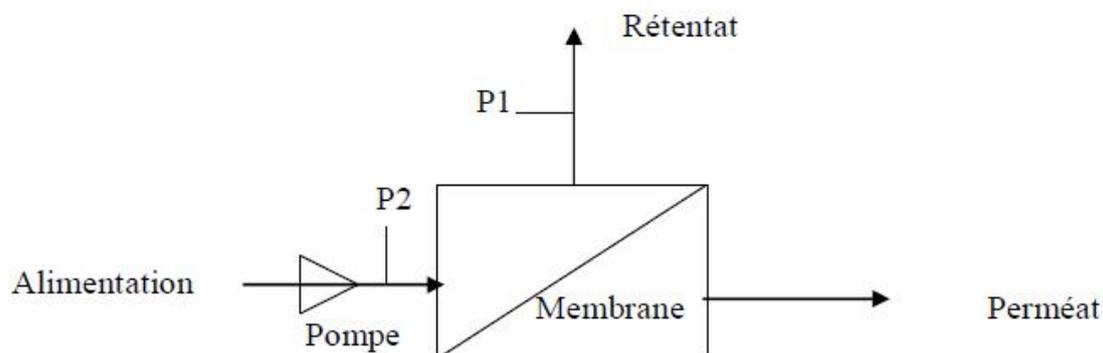


Figure 4 : Procédé de séparation membranaire tangentielle.

I.5. Les applications du phénomène d'osmose :

L'objectif des stations de RO installées est distribué de la manière suivante:

- 50 % en dessalement d'eau de mer et d'eau salubre
- 40 % dans la production d'eau ultrapure pour les industries électronique, pharmaceutique et de production d'énergie

-
- 10 % en tant que systèmes de décontamination des eaux urbaines et industrielles.

I.5.1 Dessalement des eaux salubres :

La salinité de ce type d'eaux est de 2000 mg/L – 10000 mg/L. Pour son traitement on utilise des pressions de 14 bar – 21 bar afin d'obtenir des coefficients de rejet supérieurs à 90 % et à obtenir des eaux avec des concentrations salines inférieures à 500 mg/L, qui sont les valeurs recommandées par WHO comme condition de potabilité.

Les stations de traitement des eaux salubres utilisent des modules de membranes enroulées en spirale. On estime que les coûts de capital de ce type de stations sont de l'ordre de 0.25 \$US/L d'eau traitée par jour, les coûts d'exploitation étant du même ordre.

I.5.2 Dessalement d'eau de mer :

En fonction de la zone géographique, la salinité de ce type d'eaux est de 30000 mg/L – 40000 mg/L. Pour obtenir des conditions de potabilité, on utilise des membranes en polyamide de type fibre creuse qui permettent d'obtenir des coefficients de rejet supérieurs à 99.3 % avec des pressions de travail de 50 bar – 70 bar.

Les coûts d'exploitation de ce type de stations de traitement sont estimés à 1 – 1.25\$US/ L d'eau traitée/jour, ce qui rend ce système de traitement non compétitif, comparé à d'autres systèmes comme les processus d'évaporation multi étape, si les besoins en eau dépassent les 40 000 m³ d'eau traitée/jour.

I.5.3 Production d'eau ultra pure :

La RO permet d'obtenir à partir de l'eau de consommation (concentration de solides dissous < 200 mg/L) eau de la qualité exigée dans l'industrie électronique.

Le principal problème de ce type d'installations est le bio-encrassement des membranes, il est donc nécessaire d'installer des systèmes de stérilisation par radiation UV.

I.5.4 Traitement des eaux usées :

Cette application de la RO est limitée par les coûts élevés d'exploitation à cause des problèmes d'encrassement des membranes.

Dans le cas des eaux usées industrielles, la RO est utilisée dans les industries où il est possible d'améliorer l'économie du processus grâce à la récupération de composants de valeur qui puissent être recyclés dans le processus de production: industries de galvanoplastie et de peinture de structures métalliques, ou lorsque la réutilisation de l'eau traitée signifie une réduction importante de la consommation de l'eau, comme dans l'industrie textile.

Dans le cas des eaux urbaines, la RO est un traitement qui serait indiqué en tant que traitement tertiaire, car il est possible d'obtenir de l'eau avec une qualité qui la rendrait apte à la consommation, avec un coût de 0.5 – 0.75 \$US/m³.

Le principal problème pour la consolidation de ce type de traitement est la réponse sociale. Cependant, dans certaines régions du Japon et de la Californie, il existe des limitations d'eau extrêmes, on utilise des stations de RO pour traiter l'eau en provenance du traitement biologique des eaux domestiques, en utilisant l'eau traitée par RO pour la recharge des aquifères.

I.5.4.1 APPLICATIONS INDUSTRIELLES :

Les applications industrielles de cette technologie sont autant diverses qu'indispensables. Parmi les utilisations et les applications les plus répandues, on trouve les suivantes:

Industrie alimentaire, pharmaceutique et similaires Dans les industries alimentaire, pharmaceutique, médicale, cosmétique, chimique, électronique, biotechnologique, etc. on utilise de l'eau d'osmose car pour une grande variété de processus, il est nécessaire de disposer d'une eau de grande qualité ou ultra pure. L'eau d'osmose est le point de départ pour l'obtention d'eau ultra pure.

I.5.4.2 Industrie productrice d'eau pour consommation humaine :

À de nombreux points de la planète, il n'existe pas suffisamment d'eau douce ou avec la qualité nécessaire pour pouvoir approvisionner la population.

Que ce soit un problème de qualité (eaux salubres, eaux contaminées avec nitrates, métaux, pesticides, etc.) ou de quantité (en cas de recours au dessalement de l'eau de mer) l'option la plus économique pour obtenir de l'eau apte à la consommation humaine est l'osmose inversée.

I.5.4.3 Réutilisation des eaux usées :

Il existe de nombreux cas dans lesquels les effluents des processus de traitement des eaux usées doivent être traités afin d'améliorer leur qualité jusqu'à ce qu'elles puissent être réutilisées.

C'est le cas des processus qui consomment un grand débit d'eau, comme dans l'industrie textile, ou lorsque l'effluent est versé en milieu naturel pour recharger un aquifère.

C'est aussi le cas des processus qui cherchent à ne pas produire de déversement liquide (déversement zéro) et la totalité des effluents sont traités et récupérés pour être réutilisés.

Toutes les zones mentionnées pour l'utilisation de l'osmose inversée et ses applications sont couvertes par Condorchem Envitech. [7]

Chapitre II :

II.1. Principe de base de l'osmose inverse :

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau et arrêtent tous les sels.

Cette technique est utilisée pour :

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

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

La membrane semi-perméable laissera passer le solvant (le soluté ne passe pas) pour équilibrer la concentration. La différence de concentration crée une pression, appelée Pression osmotique. Pour inverser le passage du solvant et augmenter la différence de concentration, il faut appliquer une pression supérieure à la pression osmotique.

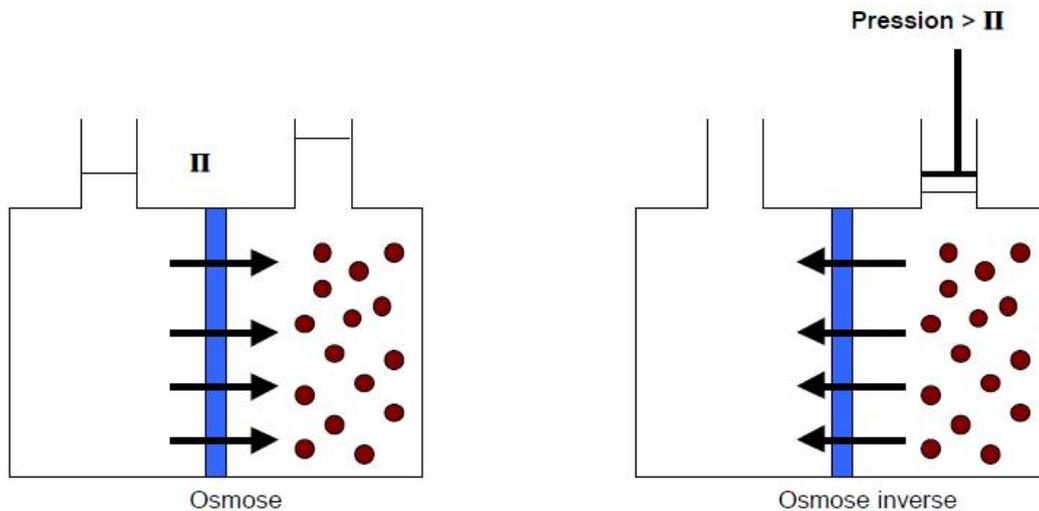


Figure 10 : Principe de l'osmose inverse (d'après site Internet relatif au génie alimentaire)

La pression osmotique Π est d'autant plus importante que la concentration est élevée et que la masse molaire est faible.

Note : la pression osmotique de l'eau de mer est de l'ordre de 25 bars.[8]

II.2. Fondement théorique de l'osmose inverse :

L'osmose normale a lieu quand l'eau passe d'une solution moins concentrée vers une solution plus concentrée par une membrane semi-perméable.

La loi de l'évolution naturelle d'un système chimique découle du second principe de la thermodynamique : à température et pression constante cette évolution est caractérisée par une diminution de l'enthalpie libre, jouant le rôle d'un potentiel.

De même qu'une masse ne pourra évoluer naturellement que d'une altitude plus élevée vers une altitude plus basse (d'un potentiel élevé vers un potentiel faible), de même un système chimique évoluera naturellement d'une enthalpie libre plus élevée vers une enthalpie libre plus faible.

L'enthalpie libre d'un système chimique constitué d'un solvant (l'eau pour ce qui nous intéresse) et de solutés (sels minéraux et corps dissous), est fonction de la concentration de chacun de ses constituants dans le système : le potentiel d'une solution saline est plus élevé que le potentiel d'une solution moins saline et la tendance naturelle sera une diminution du potentiel le plus élevé :

- Si les deux solutions sont mises en contact direct, les solutés se répartiront de manière homogène par diffusion (qui peut être accélérée par la convection libre ou forcée).
- Si les deux solutions sont mises en contact par l'intermédiaire d'une membrane semi-perméable, les solutés ne pouvant la traverser, ce sera le solvant qui la traversera.

Le phénomène d'osmose est réversible à condition de fournir de l'énergie : si l'on applique une pression à une solution, l'eau (et quelques solutés) traversera la membrane : on obtiendra une solution de faible concentration en solutés.

Le problème sera, dans ce cadre "statique", que la concentration dans le compartiment mis sous pression augmentera, la pression osmotique à vaincre aussi : pour produire de l'eau il faudra vider le compartiment salin régulièrement et la production sera discontinuée.

Industriellement cette solution est invalide d'où la solution viable : l'eau mise sous pression par une pompe dans le compartiment salin s'échappera par un orifice calibré.

On obtient ainsi une esquisse du principe de l'osmoseur .

Les raccordement sont conventionnellement appelés : Traitement des eaux potables

II.2.1 Alimentation : Solution à épurer et qui est mise sous pression par l'intermédiaire d'une pompe.

II.2.2 Production ou perméat : Solution qui traverse la membrane.

II.3.3 Rejet ou concentrat ou retentat : Solution qui quitte l'osmoseur et n'a pas traversé la membrane. Elle est enrichie en solutés et peut être soit rejetée vers le circuit d'effluents.

On ne s'intéressera par la suite qu'à la production d'eau osmosée et non à l'enrichissement d'une solution peu concentrée (domaines pharmaceutique, agroalimentaire, du traitements des métaux,...).

On voit donc que la production d'eau osmosée conduira forcément à une consommation d'eau (rejetée) : l'amélioration de la qualité implique forcément un tribut à payer (énergie mécanique pour la pompe et une part de l'eau d'alimentation), qui peut être réduit par divers types de montage.

Même avec cette solution il y a risque d'accumulation de solutés (et de matières non dissoutes), au contact de la membrane : pour éviter ceci on essaiera de faire passer la solution tangentiellement à la membrane ce qui aura pour effet de la "balayer" et ainsi de limiter son encrassement.[9]

II.3. Les membranes d'osmose inverse :

II.3.1 membranes organiques :

La plupart d'entre elles sont actuellement fabriquées à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, polysulfones, polyamides, etc.) dont les qualités leurs confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. Elles sont souvent utilisées en ultrafiltration et microfiltration.

II.3.2 membranes minérales ou inorganiques :

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 .

II.3.3 membranes composites :

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 le zircon, l'alumine et le titane) .

II.3.4 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-désionisation font appel à cette technologie. Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.[10]

II.4. Les configurations des modules d'osmose inverse :

Pour être mises en œuvres, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Actuellement, quatre types de modules sont commercialisés: modules tubulaires, modules fibres creuses, modules plans et modules spirales. Plusieurs critères sont à prendre en compte pour le choix d'un type de module tels que:

- les conditions de transfert optimale
- la surface spécifique d'échange élevée
- l'investissement minimal et le coût de fabrication
- la simplicité de mise en œuvre et la durée de vie des membranes
- l'entretien aisé (nettoyage, démontage, remplacement des membranes)

II.4.1 Modules plans :

Les modules plans sont les modules les plus simples et les plus anciens. Ils présentent sous la forme de plaques unitaires disposées parallèlement les unes aux autres et séparées par des grilles.

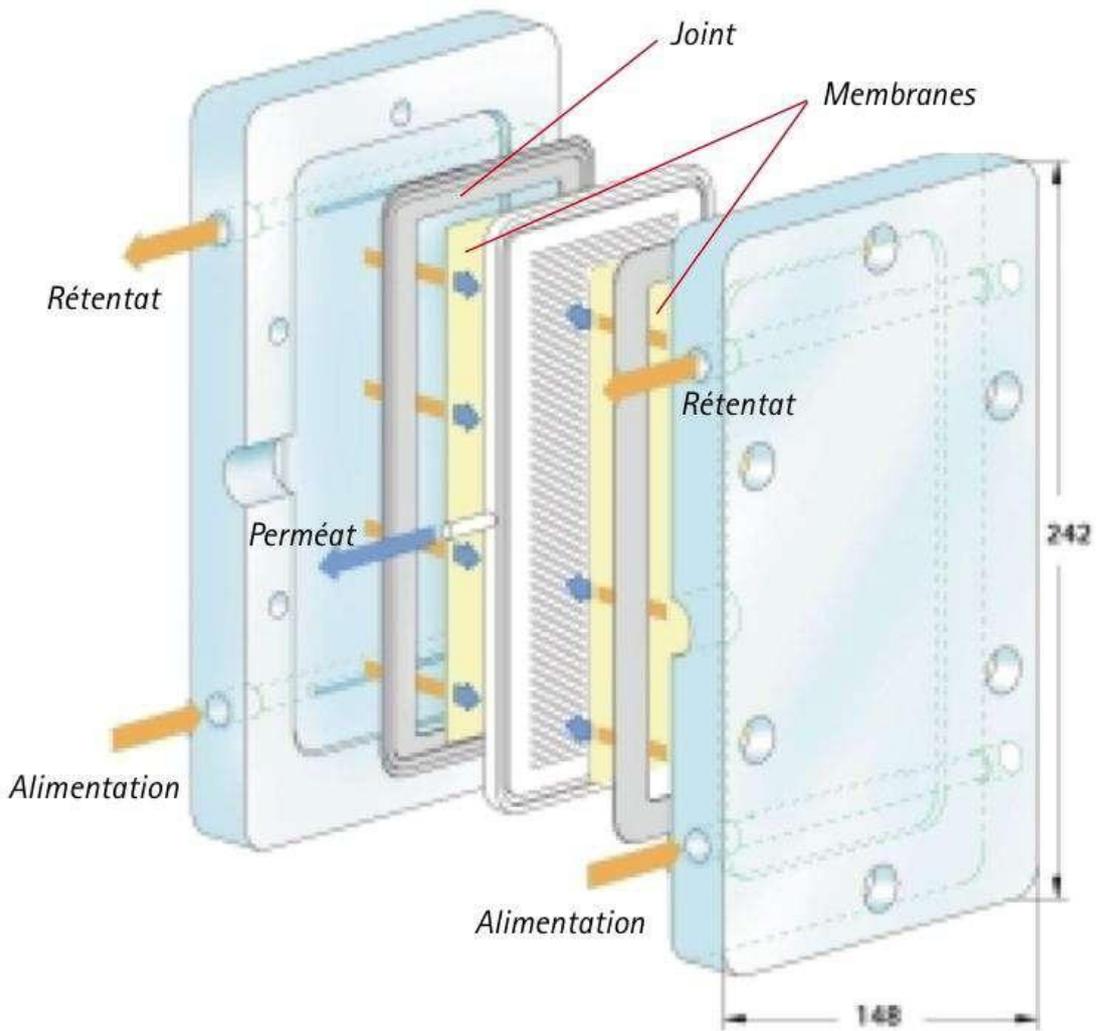


Figure 11 : Schéma du module plan Ray-Flow X 100 (Orelis).

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des modules plans

(A.Maurel, 2006)

Avantages	Inconvénients
Système souple et modulable	Système peu compact (100 à 400 m ² /m ³)
Changement facile des membranes	Investissement relativement élevé
Visualisation du perméat	

II.4.2 Modules spirales :

Les membranes planes sont enroulées en spirale autour d'un tube creux et perforé destiné à collecter le perméat. Entre les membranes est placé un grillage plastique de 0,8 à 1,2 mm d'épaisseur, qui a pour but de créer une turbulence dans la circulation du fluide. On obtient ainsi un cylindre multi-couches où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

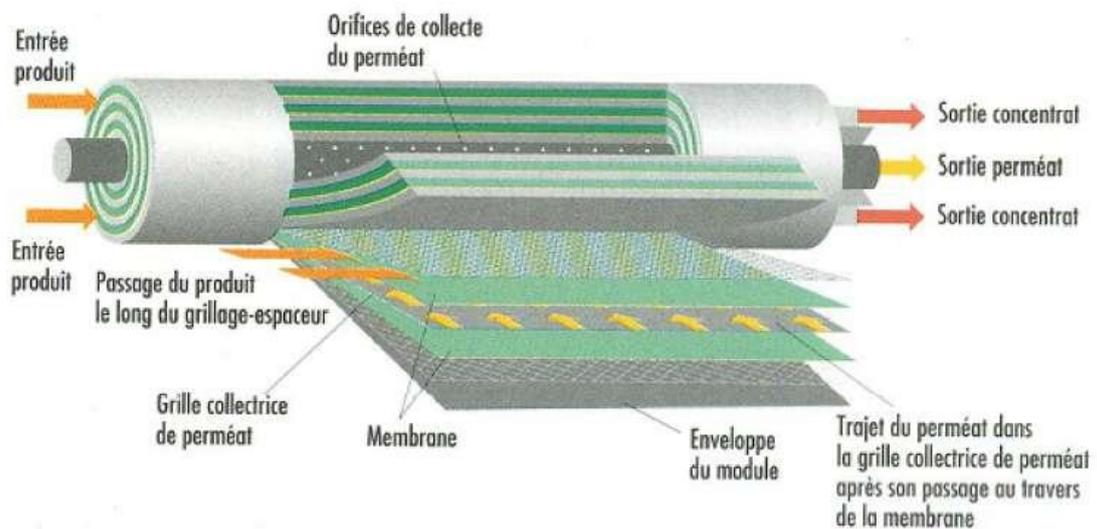


Figure 12 : Modules spirales (P. Danis, 2003)

Tableau 2: Avantages et inconvénients des modules spirales

(A.Maurel, 2006)

Avantages	Inconvénients
Compacité élevée (300 à 1000 m ² /m ³)	Sensible au colmatage
Faible volume mort	Difficulté de nettoyage
Coût d'investissement relativement faible	

II.4.3 Modules tubulaires :

Ce type de module est constitué de tubes métalliques ou plastiques sur lesquels est fixés la membrane semi-perméable. Le diamètre du tube est compris entre 7 et 25 mm et le plus souvent 12,5 mm. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Le tube est soit poreux, soit perforé de trous pour permettre l'évacuation du perméat.

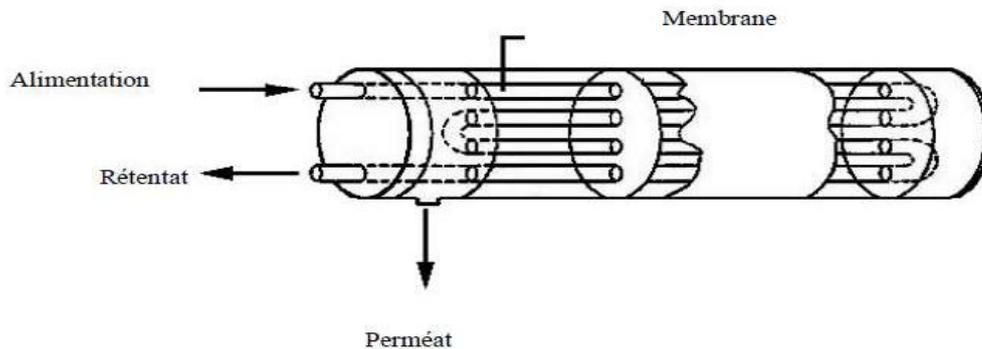


Figure 13 : Modules tubulaires

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des modules tubulaires

(A.Maurel, 2006)

Avantages	Inconvénients
Technologie simple	Consommation d'énergie élevée
Peu traités tous types de fluides (chargés, visqueux)	Faible compacité (10 et 300 m ² /m ³)
Facilité de nettoyage	Coût élevé

II.4.4 Modules fibres creuses :

Ces modules peuvent être considérés comme des modules tubulaires composés de tubes de petits diamètre compris entre quelques millimètres et quelques dizaines de microns. Mais à la différence des modules tubulaires qui sont constitués d'une membrane et d'un support inerte, les fibres creuses jouent à la fois le rôle de membrane et de support.

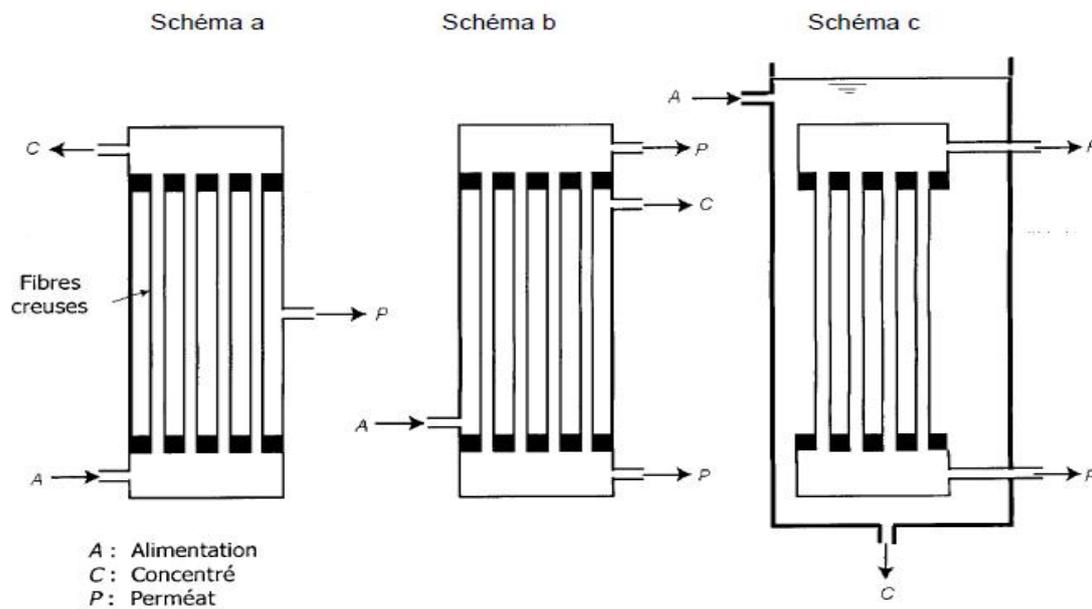


Figure 14 : Modules fibre creuses

(J-M. Berland, 2002)

Il existent deux configurations :

- Int- Ext (schéma b): L'eau à traiter circule à l'intérieur et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres.
- Ext-Int (schéma a et c): L'eau circule à l'extérieur et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres.[11]

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des modules fibres creuses

(A.Maurel, 2006)

Avantages	Inconvénients
Compacité élevée (15000 m ² /m ³)	Sensibilité de colmatage dû au faible diamètre des fibres
Faible volume mort	Fragiles (Canaux fins)
Faible consommation énergétique	
Possibilité de nettoyage à contre courant	

II.5. Paramètres de fonctionnement d'un système d'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de filtration tangentielle qui permet l'extraction d'un solvant, le plus souvent l'eau, par perméation sélective à travers une membrane sous l'action d'un gradient de pression (STIEE, 2005 ; Sagne, 2008). Elle s'oppose au phénomène naturel d'osmose qui tend à transférer le solvant d'une solution diluée vers une solution concentrée mises en contact par une membrane sélective sous l'action du gradient de concentration (Fig 6). Lorsqu'une pression est appliquée sur le compartiment le plus concentré, le flux de solvant diminue jusqu'à s'annuler pour une pression égale à la pression osmotique de la solution. Lorsque la pression appliquée est supérieure à cette pression osmotique, le flux s'inverse : c'est le phénomène d'osmose inverse. La pression efficace correspond donc à la pression transmembranaire diminuée de la différence de pression osmotique ($\Delta \pi$) de part et d'autre de la membrane.

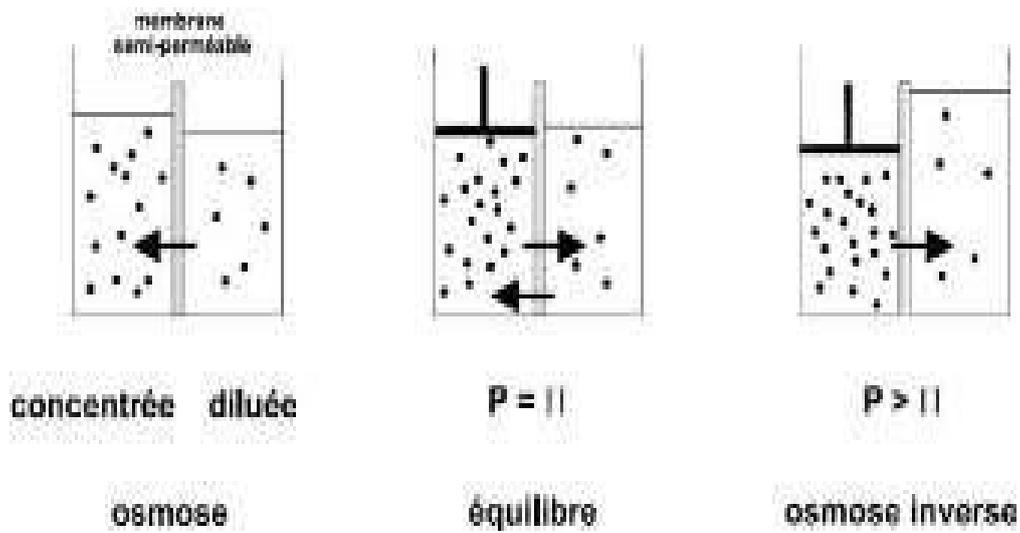


Fig 15 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse (Allard, 1984)

Pour les solutions diluées, considérées comme thermodynamiquement idéales, la pression osmotique est calculée à partir de l'équation de Van't Hoff : $\Pi = i C R T$ avec :

Π : pression osmotique de la solution, Pa

C : concentration molaire de la solution

R : constante des gaz parfait, $8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ($0,082 \text{ l.bar. mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T : température, K

i : nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

Schéma général :

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont :

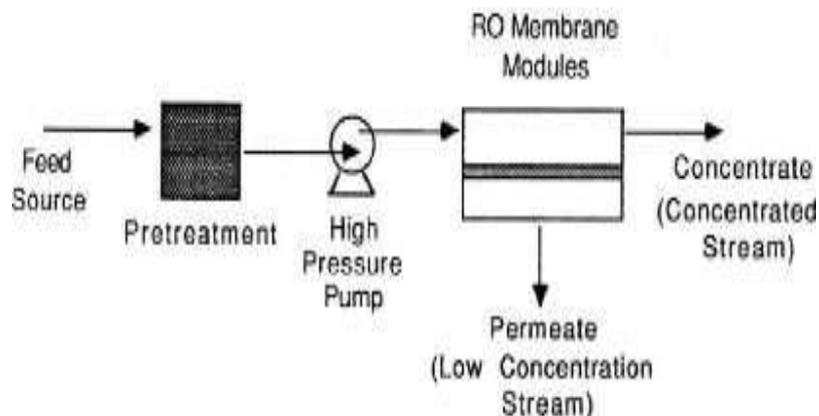


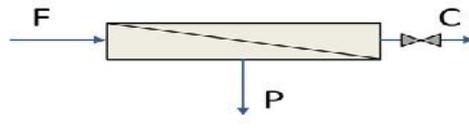
Fig 16 : Système d'osmose inverse (Williams, 2004)

Au cours du procédé, sous l'action de la pression transmembranaire, la solution à traiter de concentration C_A et de volume V_A , se sépare en deux flux au niveau de la membrane de surface S : l'un, de concentration C_P , de débit Q_P , de volume V_P et de pression relative P_P , passe à travers celle-ci et constitue le perméat. L'autre, de concentration C_R (C_c), de débit Q_R (Q_c), de volume V_R (V_c) et de pression relative P_R (P_c) est retenu et devient le retentât (concentrât).[12]

II.5.1. Taux de conversion :

Dans un système d'osmose inverse, on peut distinguer les flux d'eau suivants :

- L'alimentation d'eau : Alimentation (F)
- La production d'eau : Perméat (P)
- La déconcentration ou rejet : Concentrât (C)



En formule : $F = P + C$

Le taux de conversion d'un osmoseur est défini par le ratio entre le débit d'eau déminéralisée produite (perméat) et le débit d'eau d'alimentation :

$$T_{\text{conv}} = \text{Perméat} / \text{Alimentation} = \text{Perméat} / (\text{Perméat} + \text{Concentrât}) = P / (P + C)$$

Le débit du perméat est notamment fonction de la pression d'eau appliquée, de la température et de la minéralisation d'eau à traiter. Le débit du rejet, le concentrât, est à régler par un dispositif tel qu'une vanne à pointe ou capillaire, de manière à obtenir le taux de conversion souhaité.

Pour optimiser la durée de vie d'une membrane d'osmose inverse, le ratio entre le perméat et le débit d'alimentation doit être de l'ordre de 1 : 5. Ainsi, si 20% de l'eau d'alimentation est transformé en eau déminéralisée, le reste, soit 80%, correspond au concentrât rejeté. Dans ce cas, 4 litres d'eau sont rejetés pour en produire 1.

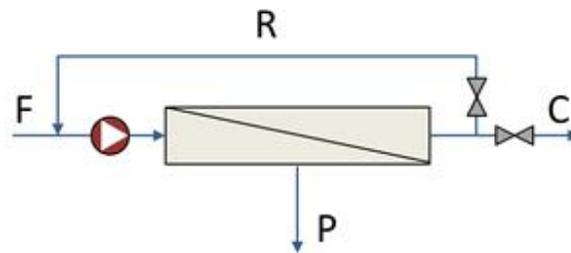
Afin de limiter la consommation d'eau, le taux de conversion des osmoseurs de petites capacités est augmenté par une réduction du débit de rejet, même si cela réduit la durée de vie de la membrane d'osmose. Ce type d'osmoseurs ne fonctionne généralement que ponctuellement pour produire de faibles volumes d'eau permettant un fonctionnement durant plusieurs années tout de même (osmoseur domestique pour eau de boisson par exemple ou pour l'aquariophilie).

Dans le cas d'osmoseurs professionnels produisant des volumes d'eau déminéralisée importants, le ratio entre le débit de production et celui de l'alimentation de la membrane est maintenu à environ 20%. Cependant, le flux d'eau du concentrât est réinjecté dans le flux d'eau d'alimentation ; on parle de recirculation. Seule une fraction du débit du concentrât est rejetée. On peut calculer le taux de conversion de deux manières :

Le taux de conversion interne :

$$T_{\text{conv int}} = \text{Perméat} / (\text{Perméat} + \text{Concentrât rejeté} + \text{Recirculation})$$

Le taux de conversion externe : $T_{\text{conv ext}} = \text{Perméat} / (\text{Perméat} + \text{Concentrât})$



En fonction des caractéristiques de l'eau d'alimentation, le taux de conversion externe pourra se situer aux alentours de 75%, tout en assurant un taux de conversion interne de 20%. Le débit de recirculation est dans ce cas :

$$T_{\text{conv ext}} = \text{Perméat} / (\text{Perméat} + \text{Concentrât}) = 75\% / (75\% + 25\%)$$

$$T_{\text{conv int}} = \text{Perméat} / (\text{Perméat} + \text{Concentrât rejeté} + \text{Recirculation}) = 75\% / (75\% + 25\% + R) = 20\%$$

$$75\% + 25\% + R = 75\% / 20\%$$

$$R = (75\% / 20\%) - 75\% - 25\% = 275\% \text{ (par rapport au débit d'eau d'alimentation)}$$

La pompe d'alimentation, indispensable pour ce mode de fonctionnement, véhicule donc un débit d'environ 4 fois le débit d'eau d'alimentation ou 5 fois celui du perméat ; sa capacité doit donc être adéquate.

Le fait de recirculer le débit de rejet de l'osmoseur entraîne une augmentation de la minéralisation de l'eau d'alimentation et par conséquent celle de l'eau produite. Le taux de conversion doit être ajusté pour obtenir le rendement de déminéralisation souhaité. Généralement l'adoucissement de l'eau d'alimentation ou un conditionnement chimique est indispensable.[13]

II.5.2 Taux de rejet :

Une particularité de la filtration par osmose inverse est d'être le seul principe de filtration occasionnant un rejet d'eau de « rinçage » de la membrane. Ce « rinçage » est absolument indispensable, puisque la membrane osmose, à contrario de toutes autres cartouches de filtration, n'emmagasine pas tout ce qu'elle retient mais l'évacue systématiquement par ce rejet, sans quoi elle se colmaterait très rapidement (c'est pourquoi seule une membrane osmose peut avoir une durée de vie de plusieurs années). Hélas, ce rejet est trop souvent perdu vers l'égoût par mauvaise habitude de la plupart des installateurs ! Puisque l'osmoseur est souvent posé sous le meuble évier de la cuisine et qu'il est fourni avec un dispositif de connexion au tuyau d'évacuation de l'évier, l'installateur raccordera presque systématiquement ce dispositif au tuyau d'égoûtage sans trop se poser de question, et ce volume d'eau de rejet ira se perdre directement à l'égoût. Il est juste bon de savoir que rien n'oblige à perdre cette eau de rejet ! Si l'utilisateur a une possibilité ou l'autre, selon la disposition des lieux, de pouvoir récupérer ce rejet par exemple dans un réservoir d'appoint pour le réutiliser ensuite pour nettoyages divers ou arrosage, ce n'est que mieux ! Un bon osmoseur a un taux de rejet de 3 ou 4 litres par litre d'eau purifiée, il est donc judicieux de chercher à récupérer ce rejet.

Sur des installations neuves de récupération / valorisation d'eau de pluie, je propose systématiquement à l'utilisateur de renvoyer ce rejet sur le stockage d'eau de pluie.

Si vraiment vous n'avez pas de possibilités de récupérer ce rejet, je vous conseille vivement de ne pas utiliser le dispositif de connexion (fourni avec l'appareil) au tuyau d'évacuation de l'évier. En effet, si vous avez déjà nettoyé un siphon d'évier, vous imaginez l'état de cochonnerie de l'intérieur de ce tuyau d'évacuation d'évier !. Je vous recommande plutôt de vous bricoler ou de faire intervenir un plombier pour couper un morceau de ce tuyau d'évacuation pour y insérer un « Y » de dérivation, pour positionner une branche parallèle et verticale avec un autre morceau de tuyau, qui ne sera pas en contact direct avec l'évacuation de l'eau d'évier, afin d'y introduire (à l'aide d'un bouchon percé) l'extrémité du tubing de rejet. Cette précaution importante permettra d'éviter une éventuelle contamination post-filtration « par retour » de pollution de ce tuyau d'évacuation !

Un osmoseur est souvent constitué de 2 ou 3 cartouches de pré-filtration, d'une membrane osmose et de 1 ou 2 cartouches de post-filtration.

A cela s'ajoute une pompe « permeat » (permet de diminuer le taux de rejet) , ou une pompe « booster » (sur alimentation électrique, permet d'augmenter la pression d'entrée [mini 3 à 3.5 bars !] si pression disponible trop faible) , le tubing et accessoires de raccordements divers, le robinet de soutirage indépendant et le réservoir de stockage d'eau filtrée (excepté pour modèle de « soutirage direct »).

Une membrane osmose se décline aussi sous plusieurs niveaux de débit, plus ou moins « rapide », considérés en Gallons (GPD), souvent en 50 gpd, 75 gpd, 100 gpd, 150 gpd ... Un osmoseur « direct » sans réservoir devra être équipé d'une membrane de 150 gpd minimum pour accélérer le débit de soutirage !

L'osmose inverse a aussi la particularité d'être le seul procédé de filtration dont il est possible de vérifier sa performance !

Le contrôle de la qualité d'eau purifiée et de la performance de l'appareil se fait à l'aide d'un TDSmètre (minéralité) ou d'un conductivimètre (conductivité électrique de l'eau). Il est sage d'opérer ce simple contrôle tous les 6 mois, ou au moins une fois par an, juste avant le changement des consommables annuels.[14]

II.5.3 Consommation énergétique :

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. A cet effet, l'installation de systèmes de récupération ou utiliser des pompes de faible consommation d'énergie est devenue une solution optimale pour la réduction de la consommation d'énergie. Parmi les procédés membranaires, seule l'osmose inverse est adaptée au dessalement de l'eau de mer. Le procédé d'osmose inverse est le cœur du procédé de dessalement, avant de permettre à l'eau d'entrer la membrane elle passe par un poste de traitement appelé le prétraitement, l'eau refoulée vers les membranes d'osmose inverse sous

pression à travers des pompes à haute pression, ce qui nécessite une importante consommation d'énergie de tous les équipements de la station. La solution à traiter (débit QA) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes: - une partie qui passe à travers la membrane, c'est le permeat ou le filtrat (QP). -une partie qui ne passe pas à travers la membrane appelée retentat ou concentrat (QR) qui est chargée des ions et particules retenues par la membrane. La figure 1 schématise les composants d'une unité de dessalement d'osmose inverse.

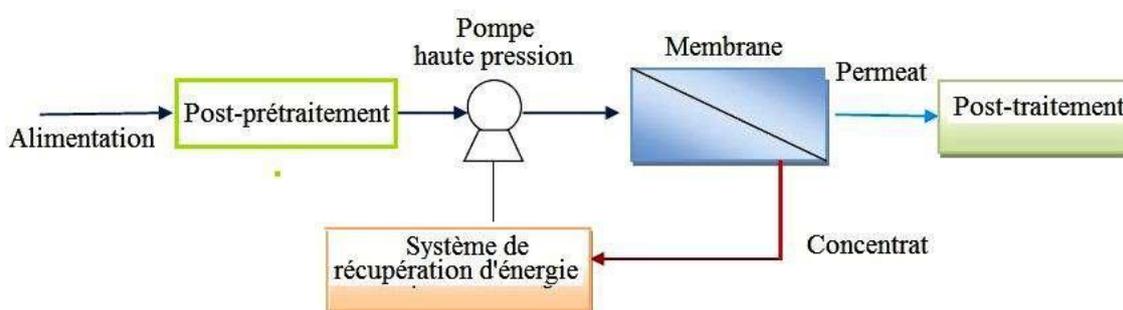


Fig 17 : Schéma de principe d'une unité de dessalement basé sur le principe d'osmose inverse

La perte de charge à travers les membranes d'osmose inverse est d'environ 1.5 à 2 bars, en fonction du nombre d'éléments par tube de pression, le concentrat sort donc à haute pression. Grâce au système de récupération d'énergie, il est possible de réutiliser l'énergie du concentrat. 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. 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/m³, par contre les procédés avec installation de système de récupération, l'énergie (turbine ou échangeur de pression) variée entre 5 - 3 kWh/m³. Le procédé d'osmose inverse nécessite de l'énergie sous forme électrique pour alimenter les pompes hautes pressions qui refoulent l'eau de mer et la faire passer à travers la membrane filtrante, qui représente plus que la moitié du coût d'exploitation global. La figure 2 représente la répartition des coûts d'exploitation moyens d'une usine de dessalement par la société Veolia.

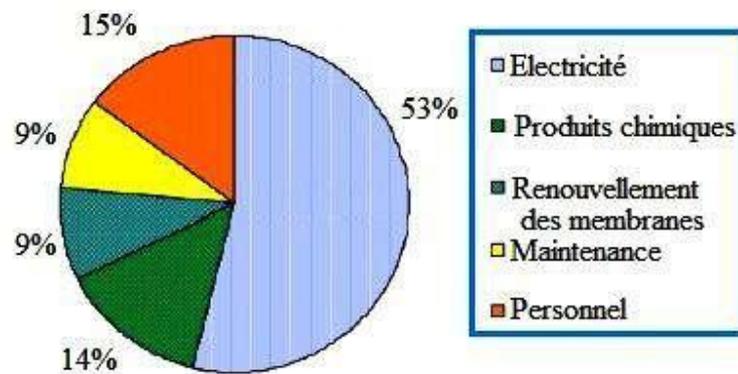


Fig 18 : Répartition des coûts d'exploitation moyens sur une usine de dessalement d'osmose inverse

Pour son fonctionnement, le procédé d'osmose inverse nécessite de l'énergie électrique pour faire fonctionner les pompes à haute pression, de circulation et autre. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) a été utilisée comme source d'énergie dans plusieurs stations de dessalement dans le monde. La figure 3 illustre le couplage de cette dernière et l'osmose inverse.[15]

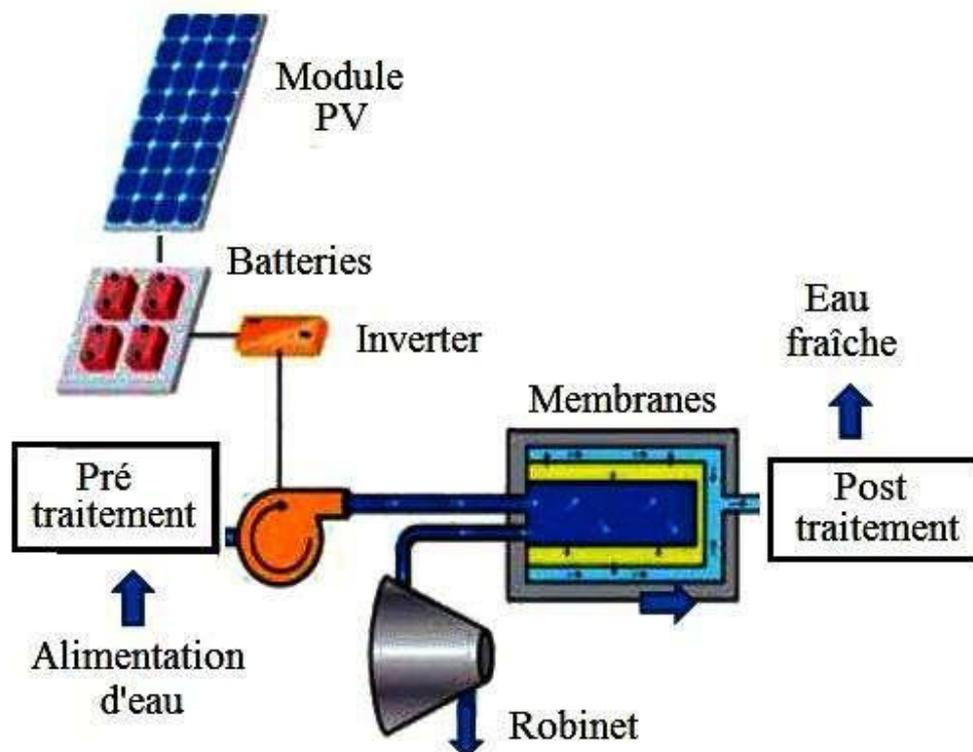


Fig 19 : Station de dessalement O.I. fonctionnant avec le photovoltaïque

II.6. Avantage de l'osmose directe par rapport à l'osmose inverse :

Les différences fondamentales entre l'osmose inverse (OI) et directe (OD) sont au nombre de trois – plus quelques variantes mineures – qui se déclinent ainsi :

II.6.1. L'osmose directe : une technologie plus zen. La première différence réside dans le fait que l'OI est forcée par l'application d'une pression transmembranaire, nettement supérieure à la pression osmotique de la solution, alors que l'OD est spontanée.

Les pressions appliquées en OI sont de l'ordre de 15 à 80 bars, et souvent au moins égales (voire supérieures) au double de la pression osmotique pour avoir des débits intéressants (typiquement de l'ordre de 20 à 50 L/h par mètre carré de membrane). En OD, la présence d'un gradient de pression est en théorie inutile, mais habituellement une légère pression transmembranaire (autour de 0,2 à 2 bars) est imposée pour améliorer les débits de solvant pour qu'ils soient comparables à ceux rencontrés en OI (Miller et Evans, 2006 ; Nicoll, 2013 ; Perry, 2013). L'absence de pression simplifie les installations au niveau des pompes, des modules et de la plomberie, ainsi que leur opération.

II.6.2. L'osmose directe : solution aux problèmes et problème de solutions. La seconde différence – et non la moindre – vient du mode de séparation en OD qui est basé sur un gradient osmotique entre une solution de forte concentration et une autre de concentration plus faible. Cela implique donc la présence initiale de deux solutions. Le fluide le plus dilué (faible pression osmotique) circule sur une des faces de la membrane, et va céder son solvant à l'autre liquide plus concentré (pression osmotique élevée) qui longe la face opposée. Le fluide qui reçoit le solvant s'appelle la solution de soutirage (draw solution), et il doit être plus concentré que l'alimentation .

Après transfert, la solution de soutirage s'épuise en se diluant et doit être constamment renouvelée, car sa pression osmotique chute. Deux options existent, soit celle d'utiliser une phase neuve ou de la régénérer en continu. La solution de soutirage est le talon d'Achille de cette technique, car les choix de mélanges disponibles sont limités (McCutcheon et collab., 2006 ; Achilli et collab., 2010 ; Nicoll, 2013 ; Perry, 2013). Jusqu'à récemment, ces derniers étaient surtout à base de sel et de sucre, car ce sont des produits très solubles, bon marché et relativement inoffensifs. En l'analysant, on remarque qu'il faut de grosses quantités de solutés pour atteindre les pressions osmotiques recherchées. Par exemple, fabriquer 1 000 litres (un mètre cube) d'une solution de soutirage réclame grosso modo 40 kg de sels il est donc impératif de les recycler pour

limiter leur volume. Le recyclage s'effectue généralement soit par évaporation soit par osmose inverse (Bazerli et Esnault, 2013). Autre détail à noter : comme ces solutions de soutirage sont concentrées, on observe toujours un peu de diffusion des solutés vers l'alimentation. Plus le mélange est concentré, plus cette fuite est élevée. Ce point disqualifie les agents osmotiques toxiques, ou ceux qui pourraient altérer les propriétés chimiques ou organoleptiques de l'alimentation.

II.6.3. Osmose inverse et osmose directe : peau épaisse versus peau fine. La troisième différence est moins visible, mais aussi importante. L'osmose directe est un procédé qui est relativement nouveau comparé à la version inverse qui a plus de 60 ans d'histoire. Aussi, les premiers développements en OD ont été simplement effectués en inversant les procédés d'osmose inverse, ce qui semblait logique. Cela avait donné des résultats mitigés, car les membranes des modules d'OI n'ont pas été réellement conçues pour ça. Si les deux techniques ont bien besoin de membranes perméables à l'eau, c'est un de leur rare point commun. En effet, celles d'osmose inverse doivent être mécaniquement stables pour faire face à une exposition prolongée à une pression hydraulique élevée, alors que des membranes d'osmose directe doivent être aussi minces que possible pour faciliter la diffusion rapide de l'eau à travers ses pores. Aujourd'hui, les deux bénéficient chacune de leurs propres membranes (Li et collab., 2017).[16

Chapitre III

- **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

III.1. Principe du Couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe:

Si deux solutions aqueuses de concentrations différentes sont séparées par une membrane semi-sélective, alors spontanément, un flux d'eau va passer du compartiment le plus dilué vers celui le plus concentré. Ceux-ci vont se mélanger jusqu'à atteindre l'uniformisation de leurs concentrations. On parlera alors d'osmose directe ou tout simplement d'osmose. Lorsque cet équilibre osmotique est atteint, le niveau de l'eau s'est élevé et cette colonne crée une pression du côté concentré, que l'on appelle la pression osmotique (souvent notée π). Ce phénomène est naturel et ne dépend que de la concentration. Par contre, si on applique une pression dont la valeur excède la pression osmotique induite par la différence de concentration du côté concentré, l'eau se dirigera dans le sens inverse du flux osmotique, on parlera alors d'osmose inverse .

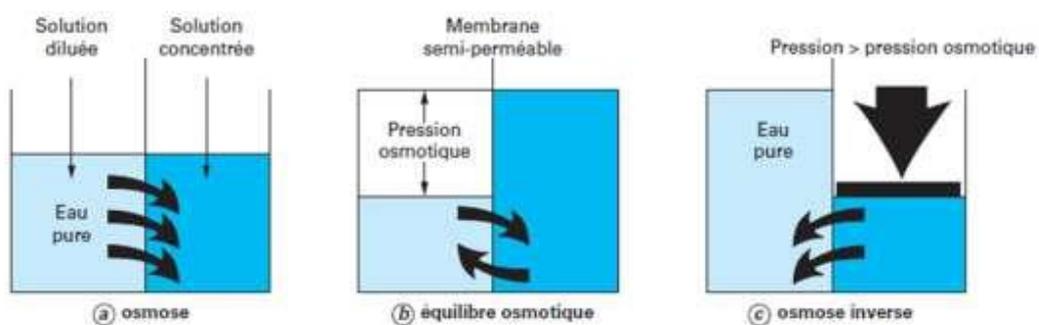


Fig 5 : Schéma du procédé d'osmose inverse (d'après Aimar P. et al., 2010)

Sur le plan technologique, le système d'osmose directe ressemble comme deux gouttes d'eau à sa soeur l'osmose inverse, excepté que les pressions d'opération sont très faibles. Mais, surtout il faut qu'une solution de soutirage (solution osmotique) ayant une pression osmotique plus élevée que la solution à traiter circule de l'autre côté de la membrane pour extraire l'eau.

L'eau de mer est idéale pour jouer ce rôle car sa pression osmotique oscille autour de 28 bars.[17]

- **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

III.1.1 Les différents types de montages :

le principe de la mise en œuvre d'un système de dessalement peut être schématisé comme suit

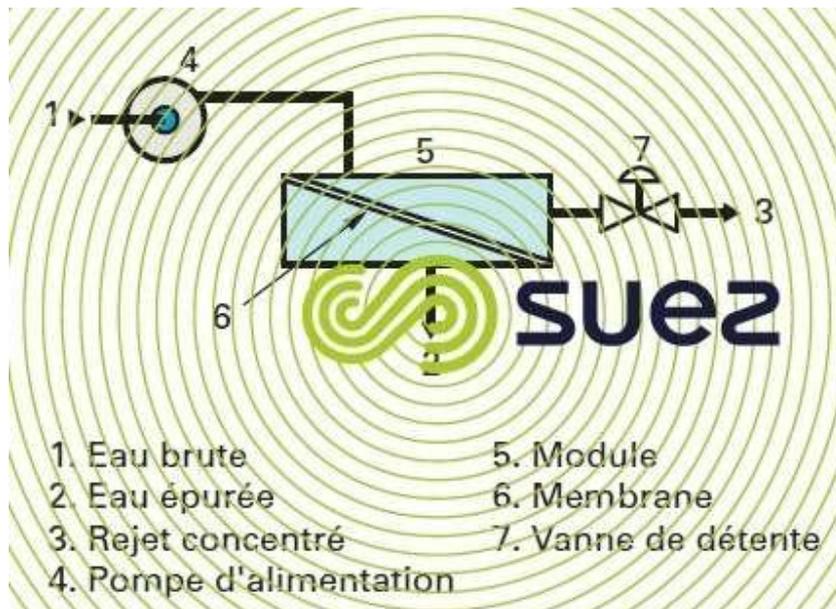


Figure 6 : Schéma simplifié de fonctionnement d'une unité d'osmose

La pompe « d'alimentation » (4) et la vanne (7) permettent de régler indépendamment la pression d'alimentation et le taux de conversion Y (rapport entre le débit de perméat et celui d'alimentation) dont l'importance capitale a déjà été soulignée (voir la section les membranes de dessalement).

En revanche, en dessalement où l'on recherche à la fois une conversion élevée (dans la limite des phénomènes de précipitation-entartrage) et une vitesse suffisante dans chaque module, donc une conversion faible dans chacun d'eux, ceci n'est possible que grâce à une configuration du système comportant à la fois la mise en parallèle de modules élémentaires et soit une recirculation, soit l'adjonction d'un deuxième, voire troisième étage en série rejet (le rejet du premier étage alimentant le second...).

III.1.2 montage en série - rejet des membranes :

Le schéma figure 8 montre un tel agencement où trois groupes de modules situés en premier étage alimentent deux groupes de modules équivalents, on parle alors d'un étagement

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l’osmose inverse et l’osmose directe**

série-rejet 3-2. Dans un tel cas, on peut, par exemple, réaliser une conversion globale de 70 % en utilisant un premier étage à 50 % avec huit éléments en série dans un même corps de pression, et un second à 40 % avec par exemple sept éléments par corps de pression.

Remarque : comme vu à la section séparation par membranes à partir de 100 L d’eau pompée, le premier étage produira 50 L et le second 20 L, soit une conversion globale de 70 %.

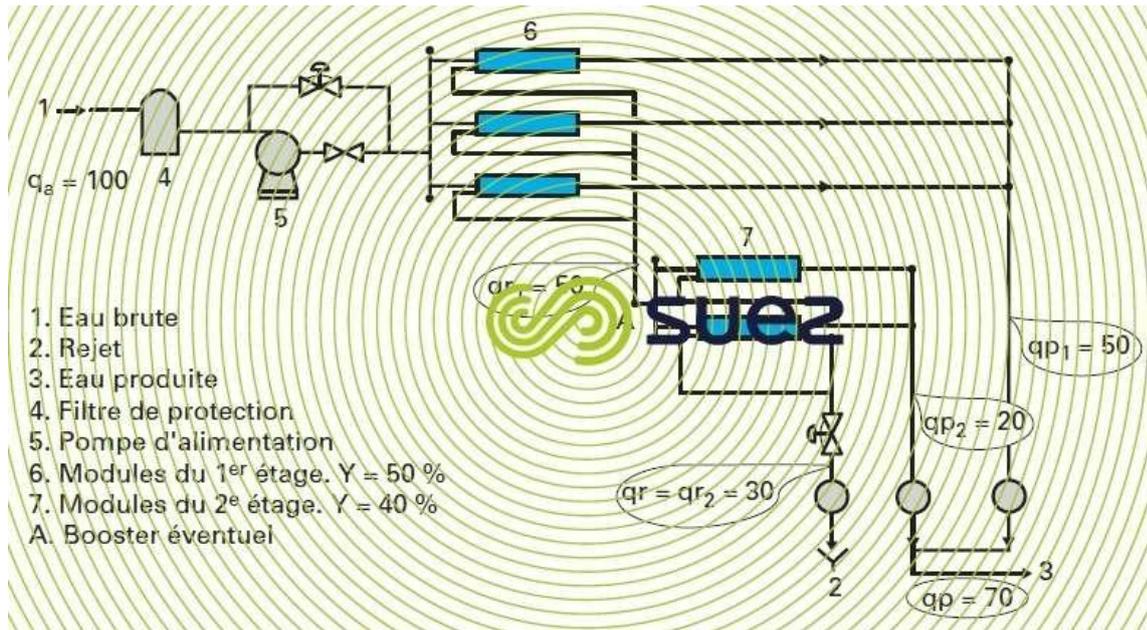


Figure 7 : Montage série-rejet sans recirculation. Exemple d’un série-rejet 3-2. Conversion globale $Y = 70\%$

On peut ainsi, pour obtenir de forte conversion, utiliser des systèmes à trois étages par exemple en 4-2-1, ou 5-3-2... On vérifie à chaque fois que le débit de balayage de l’élément le moins bien balayé (le dernier du tube de pression) reçoit bien un débit supérieur au débit minimum recommandé par le constructeur et le premier un débit, tant de production que de balayage, inférieur au débit maximum autorisé.

Remarque : en cas de petit système (en particulier pour des systèmes pilotes), on peut obtenir le même résultat sur un seul étage (voire sur un seul élément) en recyclant une partie du concentrat... voir figure 9 où le module travaille à $Y = 10\%$ (alimentation $40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, production $4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) alors que le système global travaille à 80% de conversion (alimentation $5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, production $4\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) soit une concentration d’un facteur d’environ 5 au rejet. Ce

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

module simule donc bien les conditions de concentration du dernier élément de l'installation industrielle ; en revanche, son hydraulique est celle du premier élément. En outre, il ne peut respecter les temps de séjour de l'eau dans le système, temps parfois important lorsqu'on emploie des inhibiteurs d'entartrage. Par ailleurs, un échauffement important de l'eau en recirculation impose souvent une régulation de sa température.

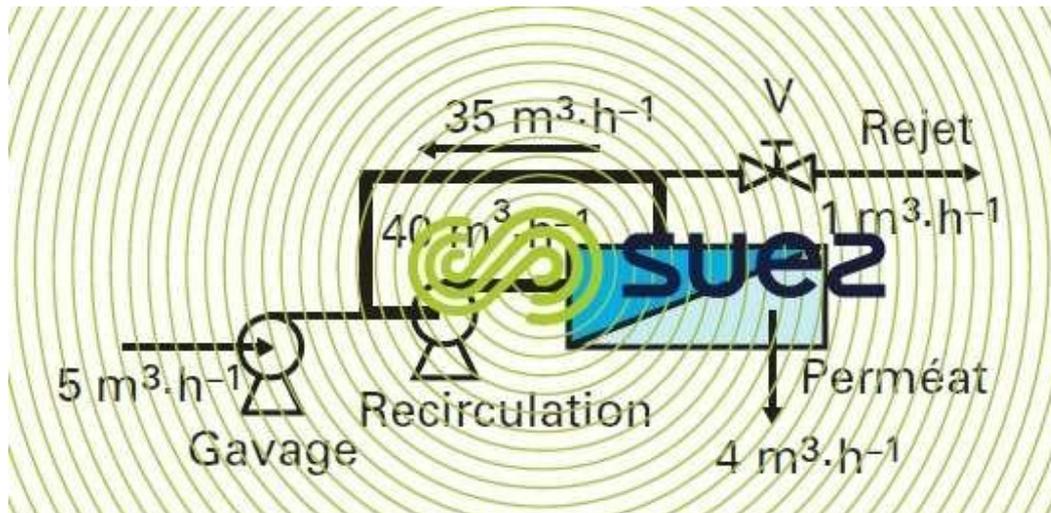


Figure 8 : Système continu monoétagé. $Y = 80\%$ sur un seul élément

On notera que ce principe est également celui des systèmes MF ou UF fonctionnant en recirculation (voir à la section séparation par membranes) sauf que leur déconcentration est discontinue (pendant les rétrolavages) au lieu d'être permanente (rejet).

III.1.3 Montage série-rejet avec « booster » entre étages :

Dans certains cas, en particulier lorsqu'un taux de conversion élevé est utilisé, il peut être intéressant de remonter la pression sur les deuxièmes et/ou troisièmes étages afin de maintenir des productions spécifiques élevées dans des conditions hydrauliques acceptables. Ceci est effectué en utilisant des pompes booster, situées entre chacun des étages (voir point A de la figure 8), qui compensent plus ou moins la perte de charge du premier étage et l'augmentation de pression osmotique.

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

III.1.4 montage en série - production (ou multi-passes) :

Lorsque la qualité de l'eau produite sur une installation n'est pas suffisante pour l'application recherchée (en particulier, eau industrielle ou potable à partir d'eau de mer ou production d'eau ultrapure), tout ou partie de l'eau produite par le premier étage est repompée vers un deuxième étage qui peut être choisi équipé d'une membrane différente, ex. figure 10 (cas le plus simple). Pour éviter les confusions avec les séries- rejets déjà vues (voir la section montage en série - rejet des membranes), on parle **desystèmes à deux passes**, l'eau produite par la première passe étant retraitée sur la seconde (chaque passe peut comporter plusieurs étages).

Remarque : le rejet de la deuxième est en général de meilleure qualité que l'alimentation, il peut donc être recyclé en amont du premier étage.[18]

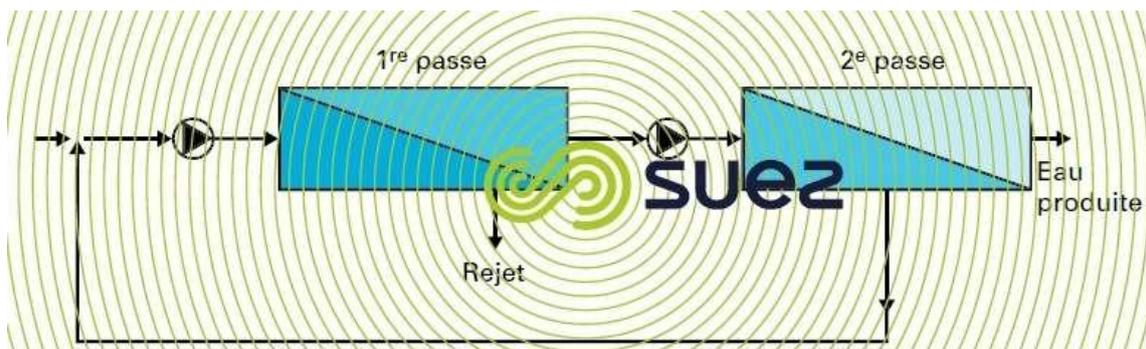


Figure 9 : Montage série-production (ou à deux passes)

III.2. Développement mathématique :

Le processus d'osmose inverse est défini en fonction d'un certain nombre de variables qui Comprend :

- Pression osmotique et de fonctionnement
- Rejet de sel
- Récupération de perméat

Les sociétés de fabrication de membranes définissent les spécifications de la qualité des aliments, qui comprend la salinité et la température .

III.2.1. Pression osmotique et de fonctionnement :

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

La pression osmotique π d'une solution peut être déterminée expérimentalement par la mesure de la concentration des sels dissous dans la solution. La pression osmotique est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\pi = RT \sum X_i \quad (1)$$

Où

π : Est la pression osmotique KPa.

T : est la température (K)

R : est la constante de gaz universelle $R = 8,314 \text{ kPa m}^3 / \text{kg mol K}$.

$\sum X_i$: est la concentration de tous les constituants dans une solution Kg mol/m^3

Une approximation pour $\sum X_i$ peut être faite en supposant que 1000 ppm de Solides Dissous Totaux (TDS) est égale à 75.84 kPa de pression osmotique.

La pression opératoire est ajustée pour surmonter les effets défavorables de ce qui suit :

- Pression osmotique
- Pertes de friction
- Résistance de la membrane
- Pression du perméat

Si la pression opératoire est posée égale à la somme des résistances ci-dessus, le débit net du perméat à travers la membrane serait minimal ou égal à zéro; Par conséquent, la pression opératoire ou de fonctionnement est réglée à une valeur plus élevée afin de maintenir un débit de perméat économique .

III.2.2.Rejection de sel :

Le rejet de sel est défini par :

$$SR = 100\% * (1 - (X_p / X_f)) \quad 2$$

Où SR est le rejet de sel.

Par exemple, une eau de mer d'alimentation avec 42 000 ppm et un perméat ayant une salinité de 150 ppm donne un pourcentage de passage de sel de 99.64%.

De même, pour une alimentation en eau saumâtre avec une salinité de 5000 ppm et une salinité de perméat de 150 ppm, on obtient un pourcentage de passage de sel de 97%. Les deux cas indiquent la différence spectaculaire entre les membranes de dessalement d'eau de mer et d'eau saumâtre. La technologie actuelle des membranes fournit des valeurs de rejet de sel supérieures à 99% pour les membranes d'eau de mer et d'eau saumâtre .

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

III.2.3.Récupération de perméat :

La récupération des perméats est un autre paramètre important dans la conception et le fonctionnement des systèmes d'osmose inverse. Le taux de récupération ou de conversion de l'eau d'alimentation en produit (perméat) est défini par :

$$R=100\%*(M_p/M_f) \quad 3$$

Où R est le taux de récupération en (%), M_p est le débit d'eau du perméat, et

M_f est le débit d'eau d'alimentation. Le taux de récupération affecte le passage du sel et le débit du produit.

Une augmentation du taux de récupération, la concentration de sel sur le côté alimentation-saumure de la membrane augmente, ce qui provoque une augmentation du débit de sel à travers la membrane. De plus, une concentration de sel plus élevée dans la solution d'alimentation en saumure augmente la pression osmotique, réduisant la $(\Delta P - \Delta \pi)$ et en conséquence réduisant le débit d'eau du produit.

La récupération des membranes pour les systèmes d'osmose inverse a augmenté au cours des années, passant de valeurs inférieures de 10-20% à des valeurs supérieures actuelles jusqu'à 50%. Ceci est réalisé en partie par une conception de système appropriée et l'utilisation de plusieurs modules de membranes enroulées en spirale dans le même récipient sous pression. Comme pour les membranes à fibres creuses il est commun d'utiliser un module unique dans le même récipient sous pression.

III.3.Recueil des principaux travaux sur le couplage entre RO et osmose directe :

III.3.1 Les principales applications de l'osmose inverse et de l'ultrafiltration sont les suivantes:

- traitement des eaux: dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, production de l'eau ultrapure (industries électronique, pharmaceutique ...).
- extraction de protéines du lactosérum dans l'industrie laitière.

III.3.2 Les techniques présentées présentent les avantages suivants:

- opération à température ambiante ce qui évite la dégradation de molécules fragiles dans le domaine agro-alimentaire.
- pas d'intervention de réactifs chimiques comme des agents d'extraction qui sont des sources de pollution.
- consommation énergétique faible vis à vis de la distillation pour le dessalement de

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**
l'eau.

III.3.3 Néanmoins des inconvénients existent:

- baisse de la perméabilité et modification de la sélectivité en cas de colmatage des membranes.
- sélectivité entre les espèces chimiques "soluté" toujours inférieure à 100 %.
- durée de vie limitée des membranes soit par perte de résistance mécanique soit par suite d'une mauvaise tenue aux réactifs utilisés pour le nettoyage.[20]

III.4. Recueil des principaux travaux de recherches sur le Couplage RO-FO

Plusieurs travaux de recherches se sont focalisés sur l'étude de la possibilité de couplage entre les technologies d'osmose inverse et osmose pour les procédés de traitement des différentes qualités d'eau destinées pour la consommation tel que la potabilisation ou les applications industrielles. La conception des systèmes hybrides ont permis de réduire le coût énergétique mais aussi de permettre d'améliorer la qualité d'eau, et surtout d'avoir une bonne efficacité d'élimination des substances toxiques lors de la conception des systèmes, il serait important de faire une optimisation afin d'obtenir les meilleures conditions de fonctionnement,

Ali et al, 2016 ont trouvés que le procédé FO/RO permet de réduire la salinité de 35000 à 10000mg/L après 6h de fonctionnement dans une unité pilote. Le FO/RO le système a été testé en fonctionnement continu pendant 15 heures, et aucun polluant n'a été détecté ni dans DS ni dans RO imprégné après la fin du temps de fonctionnement. De plus, l'eau le flux dans le processus FO diminuait légèrement avec le temps en raison à l'encrassement causé par la présence d'un mélange d'ions dans les Eaux usées. Il a montré que ce processus hybride peut économiser environ 20 % d'énergie par rapport au processus RO existant, consommant de 4 kWh à 10 kWh.[21]

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l’osmose inverse et l’osmose directe**

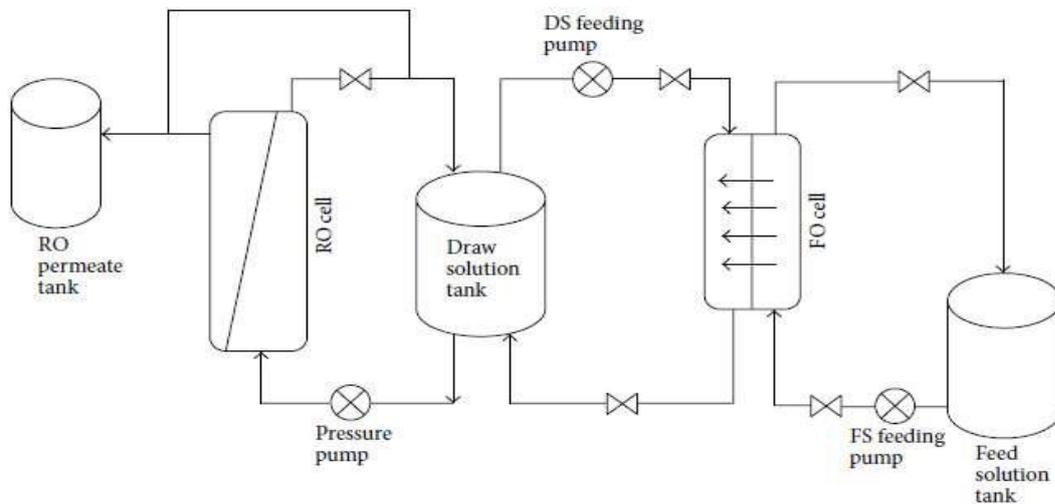


Figure III.1 : Schéma de principe du couplage RO FO [21]

Valladares et al,2016 ont effectué une analyse économique détaillée sur les dépenses d’un système hybride (FO-LPRO),utilisé pour le dessalement de l’eau de mer conventionnelle (SWRO) procédé de dessalement, et un bioréacteur à membrane – osmose inverse – avancé procédé d’oxydation (MBR-RO-AOP) pour le traitement et la réutilisation des eaux usées. Le plus important variables affectant la faisabilité économique sont obtenues grâce à une analyse de sensibilité d’un hybride Système FO-LPRO. Les principaux paramètres pris en compte pour les coûts du cycle de vie sont l’eau caractéristiques (eau d’alimentation similaire et eau produite similaire), capacité de production de 100 000 m³·d⁻¹ 32 d’eau potable, consommation d’énergie, matériaux, maintenance, exploitation, RO et FO coûts de module et produits chimiques. Par rapport à SWRO, les systèmes membranaires hybrides FO-LPRO ont un CAPEX supérieur de 21 % et un OPEX inférieur de 56 % grâce aux économies d’énergie et contrôle de l’encrassement. En termes de coût total de l’eau par mètre cube d’eau produite, l’hybride Le système de dessalement FO-LPRO a une réduction des coûts de 16% par rapport à la référence pour dessalement, principalement SWRO. Par rapport au MBR-RO-AOP, les systèmes FO-LPRO ont un 7% CAPEX inférieurs et OPEX supérieurs de 9 %, ce qui n’entraîne aucune réduction significative des coûts par m³ produit par FO-LPRO. Pour la première fois signalé, les systèmes membranaires hybrides FO-LPRO ont une avantage économique par rapport à la technologie actuellement disponible pour le dessalement, et coûts comparables avec un système de traitement et de

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

récupération des eaux usées. Basé sur le développement de modules de membrane FO, densité d'emballage et perméabilité à l'eau, le coût total de l'eau pourrait être encore réduit [22].

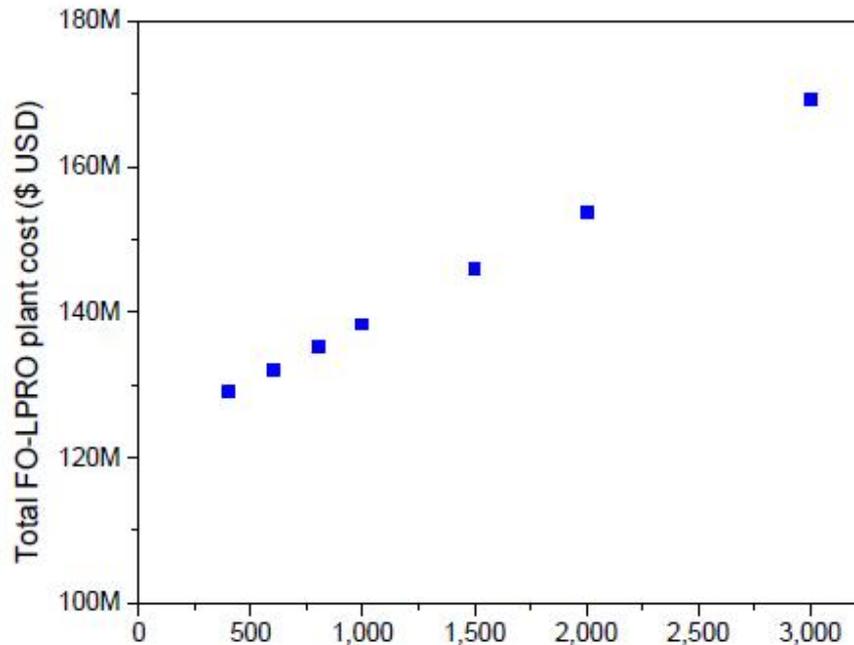


Figure III.2 :Analyse du cout de la technologie FO [22]

Mingheng et al,2011 l'équation caractéristique du module RO précédemment développée est utilisé pour décrire les OR à un ou plusieurs étages avec/sans énergie récupération. L'analyse se fait aussi bien à la limite théorique (avec solutions analytiques fournies si possible) et dans des conditions pratiques (en utilisant l'optimisation non linéaire contrainte). La réduction de la NSEC (ou $SEC_m/\Delta\pi_0$) dans les OR peut être poursuivie par un ou plus des trois méthodes indépendantes suivantes : (1) augmentation $\gamma = A_{total}L_p\Delta\pi_0/Q_f$, (2) nombre croissant d'étages, et (3) utilisant un DER. Le NSEC s'aplatit lorsque devient suffisamment grand. Un très grand large n'est pas recommandé car il affectera la vitesse d'avance, et donc, le taux de perméat. Pour les OR sans DRE, le la limite de NSEC est de 4, 3,60, 3,45, 3,38 et 3,33 si le nombre d'étages est 1 à 5. L'utilisation de plusieurs étapes réduit non seulement la NSEC, mais améliore également la récupération fractionnée de l'eau. Cependant, le NSEC s'aplatit lorsque le nombre d'étages augmente. Il est toujours supérieur à 3,1 même si le nombre d'étages devient 1000. Par conséquent, les OR à plusieurs étages sans

➤ **Chapitre 3 : Réduction de la consommation énergétique par couplage entre l'osmose inverse et l'osmose directe**

L'ERD n'est pas très efficace du point de vue de la consommation d'énergie. Il est pas recommandé d'avoir des RO avec plus de cinq étapes. L'ERD peut réduire considérablement le NSEC, théoriquement à 1, tandis que la récupération correspondante approche de zéro. Le NSEC s'agrandit lorsque la récupération d'eau requise augmente.

Il semble que les méthodes ci-dessus ont leurs propres avantages et limites. Une combinaison de tous est capable d'atteindre un faible NSEC et de maintenir une récupération et un débit de perméat élevés, si l'osmose inverse fonctionne à pressions scéniques optimales. Basé sur l'analyse des premiers principes présenté dans ce travail, il pourrait être possible d'obtenir une NSEC autour de 2,5 à 2,8 à l'aide d'un RO à plusieurs étapes et d'un ERD de 90 % d'efficacité exploité à un γ_{total} autour de 3–5 (le Q_f correspondant $= (0,2-0,33)A_{total}L_p\Delta\pi_0$) pour maintenir une récupération d'eau de 80%. En bref, ce travail fournit une théorie théorique basée sur les premiers principes. analyse pour réduire NSEC dans le dessalement RO. L'objectif du futur la recherche portera sur la validation expérimentale et la mise en œuvre des résultats théoriques présentés.

Roan et al,2011 ont comparés les besoins énergétiques théoriques et réels de l'osmose directe et inverse .les résultats de l'étude ont prouvés les effets de la solution utilisé par l'omose directe sur l'efficacité énergétique , et pa conséquent l'optimisation de la dose solution d'osmose directe est assez importante et cela afin de réduire les effets d'entartrage et de régénération de la membrane, et par conséquent il a été prouvé que même avec un mauvais suivi de l'omose directe les besous énergétiques serait beaucoup plus supérieur par rapport à l'osmose inverse [23]

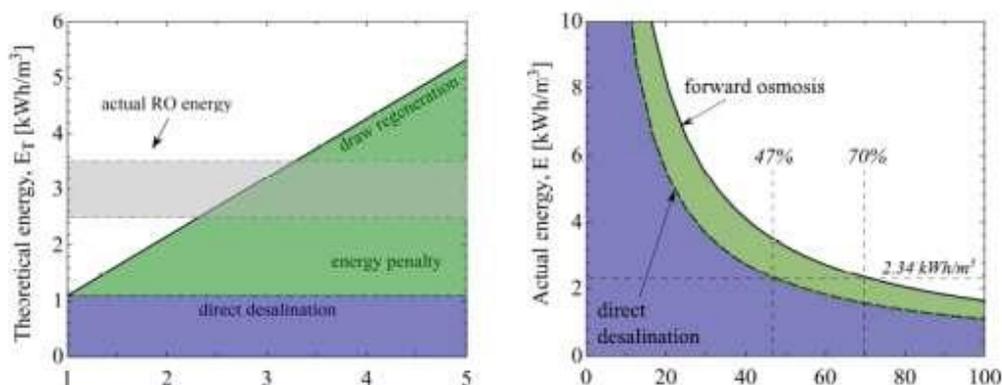


Figure III.3: Comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales entre l'osmose inverse et l'osmose directe [23]

Conclusion et recommandations

L'optimisation de la consommation énergétique dans les procédés de dessalement des eaux de mer est considéré comme un enjeu majeur pour plusieurs pays dans le monde .En particulier l'osmose inverse est considéré une technologie qui consomme beaucoup d'énergie et par conséquent l'augmentation du cout d'investissemenet des stations de dessalement .Dans ce contexte l'osmose directe est considéré comme une technologie assez prometteuse du point énergétique .Durant ce travail de recherche,nous avons effectué une recherche bibliographique en se basant sur de futur travaux établie à l'échelle international .Il a étiat constaté éffectivement que plusieurs paramètres influent sur les possibilités de mise en service de la technique d'osmose directe au niveau des stations de dessalement par RO . et par conséquent plusieurs recommandations seront proposés

- 1.Mettre une startégie de dimensionnement réel des stations de dessalement RO pour aboutir à une modèle de Couplage plus fiable ave la technologie FO
- 2.Prendre en considération la composition physique et chimique des eaux non traité avant toute opération de mise en service des stations
- 3 faire une étude technico économique du prétraitementbt et son impact sur la qualité des eaux
- 4.Faire des essais à l'échelle pilote avant la mise en service
- 5.faire un choix selon l'efficacité des solutions utilisé en osmose directe
- 6 Prendre en considération la composition de la membrane utilisé en osmose inverse
- 7.Choix de la position de couplage des modules d'osmose directe dans les stations d'osmose inverse

Notre pays dispose actuellement 13 stations de dessalement par RO utilisant une consommation énergétique moyenne de l'ordre de 8 millions KWh/jour ,et il serait important au spécialiste en dessalement par RO d'essayer de minmiser cette consommation par des méthodes de couplage avec les procédés qui utilise moins d'énergie tel que l'osmose directe

Référence

- [1] Water 2020, 12, 107; doi:10.3390/w12010107 www.mdpi.com/journal/water
- [2] See discussions, stats, and author profiles for this publication at:
<https://www.researchgate.net/publication/332028843>
- L'osmose directe et l'osmose inverse: techniques ennemies ou complémentaires Article ·
December 2018.
- [3] Bibnum Textes fondateurs de la science Sciences de la vie
L'osmose et la vie selon Dutroch et Jacques Bolard
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_l'osmom%C3%A9trie
- [5] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/chimie/la-constante-d-equilibre-c1043>
- [6] <http://thesis.univ-biskra.dz/1283/4/Chapitre1.pdf>
- [7] <https://condorchem.com/fr/blog/losmose-inversee-et-ses-differentes-applications/#:~:text=Par%20exemple%2C%20gr%C3%A2ce%20%C3%A0%20l%27expulsion%20de%20leurs%20d%C3%A9chets>
- [8] http://perso.wanadoo.fr/jose.braun/separation/uf_et_oi.htm – consulté en octobre 2002).
Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau FONDS NATIONAL POUR LE
DEVELOPPEMENT DES ADDUCTIONS D'EAU Office International de l'Eau SNIDE
Nouvelle version rédigée par Jean-Marc BERLAND et Catherine JUERY Décembre 2002
- [9] <http://www.hydranet.net>
- [10] <http://www.hydranet.net>
- [11] <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1281>
- [12] <https://www.memoireonline.com/11/13/7958/Influence-des-parametres-operatoires-sur-les-performances-d-un-systeme-de-dessalement-par-osmose.html>
- [13] <https://www.aquathermia.com/blog/1-le-taux-de-conversion-d-un-osmoseur.htm#:~:text=Pour%20optimiser%20la%20dur%C3%A9e%20de,%25%2C%20correspond%20au%20concentr%C3%A2t%20rejet%C3%A9>.

[14] <https://www.ec-eau-logis.com/la-filtration-par-osmose-inverse/#:~:text=Un%20bon%20osmoseur%20a%20un,chercher%20%C3%A0%20r%C3%A9cup%C3%A9rer%20ce%20rejet>

[15] Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°2 (2016) 157 – 164 Modélisation et optimisation de la consommation d'énergie d'une station de dessalement par procédé d'osmose inverse en Algérie A. Adda 1, W.M. Naceur 2 et M. Abbas 31 Département de Génie des Procédés et de l'Environnement, Université Docteur Yahia Farès, Bd de l'ALN Ain D'heb, 26000, Médéa, Algérie 2 Département de Génie des Procédés, Université Saâd Dahlab, Blida 1 Route de Soumâa, B.P. 270, 09000 Blida, Algérie 3 Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER 42004, Tipaza, Algérie (reçu le 20 Mai 2016 –accepté le 29 Juin 2016)

[16] See discussions, stats, and author profiles for this publication at :<https://www.researchgate.net/publication/332028843> L'osmose directe et l'osmose inverse: techniques ennemies ou complémentaires Article · December 2018

[17] DÉVELOPPEMENT DE SOLUTIONS DE SOUTIRAGE POUR LA RÉGÉNÉRATION DES EAUX USÉES PAR OSMOSE DIRECTE Présenté dans le cadre du Colloque de l'ARC du 85e Congrès de l'ACFAS, 8-9 mai 2017, Montréal, Qc., Canada Serge Alex¹, Prangya ROUT² et Puspendu BHUNIA² 'Institut des procédés industriels, Collège de Maisonneuve, Montréal, Qc., Canada; Indian Institute of Technology, Bubhaneswar, Odisha, Inde https://eduq.info/xmlui/bitstream/handle/11515/35147/ARC_Acfas2017_Affiche_Alex-S.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[18] <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/separation-par-membranes/les-differents-types-d-agencement-systemes-de-dessalement>

[19] MEMOIRE En vue de l'obtention DU DIPLOME DE MASTER EN GENIE CHIMIQUE ETUDE ET SIMULATION PAR MODELE MATHEMATIQUE D'UNE UNITE D'OSMOSE INVERSE POUR LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER Présenté par : GUEZLANE Widad AGGOUN Manel Promotion 2016/2017

[20] Techniques de l'ingénieur: articles relatifs à l'ultrafiltration et à l'osmose inverse

- [21] Ali, H. M., Gadallah, H., Ali, S. S., Sabry, R., & Gadallah, A. G. (2016). Pilot-Scale Investigation of Forward/Reverse Osmosis Hybrid System for Seawater Desalination Using Impaired Water from Steel Industry. *International Journal of Chemical Engineering*, 2016, 1–9. doi:10.1155/2016/8745943
- [22] Valladares Linares, R., Li, Z., Yangali-Quintanilla, V., Ghaffour, N., Amy, G., Leiknes, T., & Vrouwenvelder, J. S. (2016). Life cycle cost of a hybrid forward osmosis – low pressure reverse osmosis system for seawater desalination and wastewater recovery. *Water Research*, 88, 225–234. doi:10.1016/j.watres.2015.10.017