



Hogere Zeevaartschool Antwerpen

# Production d'eau potable à bord d'un navire à l'échelle industrielle

Ifig d'Epinay

Mémoire présenté pour l'obtention  
du titre de  
Bachelor en Mécanique Navale

Promoteur : Geert Potters

Année académique : 2019 – 2020



# Avant-propos

Ce mémoire est réalisé en vue de l'obtention du diplôme de Bachelor de l'Ecole Supérieure de Navigation d'Anvers en Mécanique Navale. Il étudiera la production d'eau potable à bord d'un navire à l'échelle industrielle. L'idée de ce mémoire de recherche est venue du constat que, de par l'augmentation exponentielle de la population mondiale ainsi que du réchauffement climatique, l'eau commence à devenir une denrée rare et donc de plus en plus coûteuse.

En effet depuis plusieurs années, de nombreuses villes tels que Sao Paulo au Brésil ou la ville du Cap en Afrique du Sud sont touchées de plein fouet par les sécheresses à répétition. Non seulement les réservoirs d'eau potable se tarissent de plus en plus mais la demande en eau augmente dangereusement dû, principalement, à l'augmentation de la population. Sao Paulo est passé d'un peu plus de 230 000 habitant en 1900 à 10 millions en 2000 pour atteindre plus de 12 millions en 2018. De plus les populations les plus atteintes sont en grandes parties touchées par la pauvreté et elles n'ont donc pas la possibilité, ni l'infrastructure, d'importer de l'eau des pays voisins.

Cette étude a pour objectif de mettre en lumière les difficultés que rencontrent les populations touchées par le manque d'eau mais aussi de démontrer que de nombreuses solutions existent pour venir en aide à ces populations grâce à des systèmes déjà existants.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de mémoire, Mr. Geert Potters, pour le temps qu'il m'a consacré ainsi que ses conseils avisés malgré la situation actuelle de confinement et les difficultés qu'elle engendre, ainsi que le professeur Marjolein Vanoppen pour son expertise. Je remercie également ma fiancée qui m'a inspiré dans le choix de ce sujet et qui m'a apporté son assistance tout au long de ce mémoire. Et enfin je remercie mes parents pour leurs aide et soutien durant ce mémoire mais également tout au long de mes études.



# Résumé

Sous l'effet de la croissance démographique et du réchauffement climatique les ressources se font de plus en plus rares. Et la ressource la plus fondamentale sans laquelle aucun être vivant ne peut vivre est l'eau. Or c'est une des ressources que l'on a en abondance sur notre planète, mais elle est répartie de façon très inégale du fait de multiples facteurs tels que la guerre, les déplacements démographiques ou la sécheresse dans certaines régions. De plus, 97,5% de l'eau sur terre est salée et contenu dans les océans et seuls 35,2 millions de milliards de mètres cubes sont de l'eau douce dont moins de la moitié est liquide. Notre objectif est donc de voir comment exploiter cette gigantesque quantité d'eau salée, qui est encore trop peu utilisée, pour faire parvenir à des villes ou à des pays qui sont en difficulté hydrique une eau potable à moindre prix. Pour cela nous avons comparé plusieurs systèmes de dessalination : Multi-Flash Desalination, Multi-Effect Distillation, Mechanical Vapour Compression et enfin Reverse Osmosis. Suite à cette étude nous avons pu en déduire que le système d'osmose inverse répond le plus à nos attentes autant sur la quantité et la simplicité de production que sur le coût de celle-ci.



# Abstract

As a result of population growth and global warming, resources are becoming increasingly scarce. And the most fundamental resource without which no living being can live is water. It is one of the resources that we have in abundance on our planet, but it is very unevenly distributed due to multiple factors such as war, population displacements, drought in some regions ... More than 97.5% of the water on earth is salty and contained in the oceans and only 35.2 million billion cubic meters are fresh water, less than half of which is liquid. Our objective is therefore to exploit this huge quantity of salt water, which is still too little used, to provide cities or countries with water problems with drinking water at a lower price. For this purpose, we have compared several desalination systems: Multi-Flash Desalination, Multi-Effect Distillation, Mechanical Vapour Compression and Reverse Osmosis. Following this study, we were able to deduce that the reverse osmosis system best meets our expectations in terms of quantity and simplicity of production as well as its cost.



# Table des matières

|   |      |
|---|------|
| Liste des figures   | xii  |
| Liste des tableaux  | xiii |
| Liste des abréviations  | xv   |
| 1 Introduction  | 1    |
| 2 Le problème de l'eau dans le monde                              | 3    |
| 2.1 Quelques chiffres . . . . .                                   | 3    |
| 2.2 Demande et utilisation de l'eau . . . . .                     | 4    |
| 2.3 Qualité de l'eau . . . . .                                    | 5    |
| 2.4 Quantité d'eau disponible . . . . .                           | 5    |
| 2.5 Qui sont les laissés-pour-compte ? . . . . .                  | 6    |
| 2.6 Les régions . . . . .   | 7    |
| 2.6.1 Le Moyen-Orient . . . . .                                   | 7    |
| 2.6.2 L'Asie et le Pacifique . . . . .                            | 7    |
| 2.6.3 L'Europe et l'Amérique du Nord . . . . .                    | 8    |
| 2.6.4 L'Amérique latine et les Caraïbes . . . . .                 | 8    |
| 2.6.5 L'Afrique subsaharienne . . . . .                           | 8    |
| 2.7 Les droits de l'homme à l'eau et à l'assainissement . . . . . | 9    |
| 2.8 L'accessibilité à l'eau . . . . .                             | 11   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3     | Etude de cas  | 13 |
| 3.1   | Sao Paulo . . . . .   | 13 |
| 3.2   | Cape Town . . . . .   | 14 |
| 4     | Objectif général  | 17 |
| 5     | Cahier des charges  | 19 |
| 5.1   | Production . . . . .  | 19 |
| 5.2   | Quel type d'eau ? . . . . .                                       | 21 |
| 5.3   | Quel type de navire ? . . . . .                                   | 22 |
| 5.4   | Avantages de l'utilisation d'un navire de dessalination . . . . . | 22 |
| 6     | Systèmes de dessalination   | 25 |
| 6.1   | Introduction . . . . .  | 25 |
| 6.2   | Multi-stage flash desalination : MSF . . . . .                    | 26 |
| 6.2.1 | Description du système MSF . . . . .                              | 27 |
| 6.2.2 | Système flash à un seul étage . . . . .                           | 30 |
| 6.2.3 | Système MSF classique . . . . .                                   | 31 |
| 6.2.4 | MSF avec mélange de saumure (MSF-M) . . . . .                     | 31 |
| 6.2.5 | Avantages/Inconvénients . . . . .                                 | 32 |
| 6.3   | Multi-effect distillation (MED) . . . . .                         | 33 |
| 6.3.1 | Description du système MED . . . . .                              | 33 |
| 6.3.2 | Avantages/Inconvénients . . . . .                                 | 34 |
| 6.4   | Mechanical Vapour Compression (MVC) . . . . .                     | 35 |
| 6.4.1 | Introduction . . . . .  | 35 |
| 6.4.2 | Description du système MVC . . . . .                              | 35 |
| 6.4.3 | Modèle du compresseur mécanique de vapeur . . . . .               | 38 |

---

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 6.4.4  | Facilité d'évaporation et d'entretien . . . . .  | 39 |
| 6.4.5  | Fiabilité et résistance à la corrosion . . . . . | 39 |
| 6.4.6  | Fonctionnement économique . . . . .              | 39 |
| 6.4.7  | Avantages/Inconvénients . . . . .                | 40 |
| 6.4.8  | Conclusion . . . . .                             | 40 |
| 6.5    | Reverse Osmosis (RO) . . . . .                   | 41 |
| 6.5.1  | Introduction . . . . .                           | 41 |
| 6.5.2  | Description du système RO . . . . .              | 41 |
| 6.5.3  | Prétraitement . . . . .                          | 42 |
| 6.5.4  | Pompe à haute pression . . . . .                 | 44 |
| 6.5.5  | Membrane . . . . .                               | 44 |
| 6.5.6  | Post-traitement . . . . .                        | 45 |
| 6.5.7  | La saumure . . . . .                             | 45 |
| 6.5.8  | Coût de l'osmose inverse . . . . .               | 47 |
| 6.5.9  | Le futur . . . . .                               | 48 |
| 6.5.10 | Avantages/Inconvénients . . . . .                | 48 |
| 6.6    | Conclusion . . . . .                             | 49 |
| 7      | Sources d'énergie . . . . .                      | 51 |
| 7.1    | L'énergie solaire . . . . .                      | 52 |
| 7.2    | L'énergie éolienne . . . . .                     | 53 |
| 7.3    | L'énergie nucléaire . . . . .                    | 53 |
| 8      | Les défis . . . . .                              | 55 |
| 8.1    | Financiers . . . . .                             | 55 |
| 8.2    | Trouver un navire adapté . . . . .               | 55 |

|     |                                   |    |
|-----|-----------------------------------|----|
| 8.3 | Formation de l'équipage . . . . . | 56 |
| 8.4 | Droit international . . . . .     | 56 |
| 8.5 | Sécurité . . . . .                | 57 |
| 9   | Conclusion                        | 59 |
|     | Bibliographie                     | 61 |

# Liste des figures

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figure 1  | Demande mondiale en eau par secteur d'ici 2020 . . . . .   | 4  |
| Figure 2  | Pays actuellement en stress hydrique . . . . .   | 5  |
| Figure 3  | Couverture mondiale en eau potable en 2015 . . . . .   | 9  |
| Figure 4  | Pays reconnaissant l'eau et l'assainissement comme un droit de l'Homme dans leur constitution ou législation . . . . . | 10 |
| Figure 5  | Consommation d'eau potable à Cape Town par secteur en 2017 . . . . .   | 15 |
| Figure 6  | Stockage de l'eau de surface des réservoirs Lesotho, Mzimvubu Tsitsikamma, Breede Gouritz et De Bos Dam . . . . .      | 16 |
| Figure 7  | Premier exemple de pipeline pour le transfert de l'eau . . . . .   | 20 |
| Figure 8  | Deuxième exemple de pipeline pour le transfert de l'eau . . . . .  | 20 |
| Figure 9  | (a) Capacité de désalination par région (b) Capacité de production par système de désalination . . . . .               | 27 |
| Figure 10 | Schéma du système Multi-stage flash desalination . . . . .   | 28 |
| Figure 11 | Partie : Section rejet de chaleur . . . . .  | 29 |
| Figure 12 | Système Flash à un seul étage . . . . .  | 30 |
| Figure 13 | MSF avec mélange de saumure . . . . .  | 32 |
| Figure 14 | Système MED . . . . .  | 34 |
| Figure 15 | Système MVC . . . . .  | 36 |
| Figure 16 | Système MVC . . . . .  | 36 |

---

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figure 17 | Exemple de membrane pour le prétraitement . . . . .                      | 43 |
| Figure 18 | Caractéristique chimique de la saumure . . . . .                         | 46 |
| Figure 19 | Classification des différentes techniques de dessalinisation . . . . .   | 49 |
| Figure 20 | Prévision de la production mondiale d'électricité renouvelable . . . . . | 51 |

# Liste des tableaux

Tableau 1 Typical Properties of Pressure-Driven Membranes . . . . . 44

Tableau 2 Aperçu des principaux procédés de dessalement . . . . . 50



# Liste des abréviations

|           |   |
|-----------|---|
| BWRO      | Brackish Water Reverse Osmosis  |
| CoCT      | Cape Town   |
| ED        | Electrodialyse  |
| MED       | Multi-Effect Distillation   |
| MEE-P/MVC | Multiple Effect Evaporation Parallel feed Mechanical Vapour Compression |
| MEE-P/TVC | Multiple Effect Evaporation Parallel feed Thermal Vapour Compression    |
| MF        | Microfiltration   |
| MSF       | Multi-Stage Flash desalination  |
| MSF-M     | Multi-Stage Flash desalination Mixt                                     |
| MVC       | Mechanical Vapour Compression   |
| NaCl      | Chlorure de Sodium  |
| NF        | Nanofiltration  |
| OMS       | Organisation Mondiale de la Santé                                       |
| OI        | Osmose Inverse  |
| PV        | Photovoltaïque  |
| RO        | Reverse Osmosis   |
| SSF       | Système Flash à un seul étage   |
| SWRO      | Sea Water Reverse Osmosis   |

|       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| UF    | Ultrafiltration                  |
| UV    | Ultra-Violet                     |
| VC    | Vapour Compression               |
| WCWSS | Western Cape Water Supply System |

# Chapitre 1

## Introduction

D'ici quelques années, en 2025, 63% de la population mondiale devrait subir un stress hydrique soit moins de  $1700\text{ m}^3$  d'eau par an et par habitant ou une pénurie d'eau qui correspond respectivement à moins de  $1000\text{ m}^3$  par habitant. En 1950, la ressource mondiale en eau était estimée à  $17\,000\text{ m}^3$  par personne et par an. La forte croissance démographique, l'industrialisation, l'urbanisation, l'intensification agricole ont changé la donne. En 1995, on estimait que la ressource en eau renouvelable et disponible n'était plus que de  $7\,500\text{ m}^3$  par personne et par an[16]. Or 97% de l'eau de notre planète est dite salée, contenant entre 30 et 40 grammes de sel dissous par litre d'eau. Il existe donc un réel marché à prendre, intéressant d'un point de vue économique et écologique : dessaliniser l'eau.

L'intérêt de ce mémoire est de savoir s'il est possible de produire une quantité suffisante d'eau potable à bord d'un navire pour une consommation à grande échelle et quelle technique de traitement de l'eau de mer serait la plus adaptée. De plus le fait de traiter l'eau de mer directement sur un navire a de nombreux avantages. La compagnie serait à la fois productrice, fournisseur, pourrait s'occuper elle-même de sa maintenance ... Ce qui permettrait d'avoir un minimum de sous-traitant et donc de faire des économies non négligeables. D'autre part la production d'eau potable pourra s'effectuer durant l'acheminement ce qui permettra une économie de temps et donc à nouveau des économies financières. Il faut noter que dans les pays défavorisés, les problèmes d'accès à l'eau ne sont pas toujours liés à l'absence de réserves d'eau mais à un manque de moyens financiers ou/et une absence d'organisation pour rendre potable, stocker et distribuer l'eau aux populations. La création d'une flotte de navire pouvant dessaler l'eau pourrait en partie régler ces problèmes.

Selon le site ENGIE, la consommation moyenne en eau potable en Belgique pour un célibataire est de  $34\text{m}^3$  par an[17]. Il existe déjà des osmoseurs capables de produire jusqu'à  $1200\text{ m}^3$  par jours avec une consommation électrique inférieure à  $3\text{kWh}/\text{m}^3$  d'eau

potable produite[30]. L'avantage de l'osmose inverse par rapport aux procédés classiques tels que la distillation est la simplicité d'utilisation, les couts d'investissement ainsi que la consommation en énergie qui sont beaucoup plus faibles. L'énergie osmotique pourrait également être utilisée pour réduire la consommation en énergie électrique. Mais d'autres techniques tels que le multi-stage flash distillation ou encore le multi-effect distillation ont largement fait leurs preuves.

# Chapitre 2

## Le problème de l'eau dans le monde

### 2.1 Quelques chiffres

Afin de se faire une rapide idée de la situation actuelle vis à vis de l'eau à travers le monde voici quelques chiffres[24] :

- La population mondiale utilisant au moins un service d'eau potable de base est passée de 81% à 89% entre 2000 et 2015.
- 2,1 milliards de personnes, soit 29% de la population mondiale, n'utilisaient pas un service d'eau potable géré de manière sûre en 2015. (76% en Afrique Subsaharienne).
- En 2015, 844 millions de personnes n'avaient toujours pas accès à un service d'eau potable, même de base.
- 1 personne sur 3 utilisant des services d'eau potable gérés de manière sûre vivait dans des zones rurales.
- Dans le monde, 2 milliards de personnes utilisent des points d'eau contaminés par des matières fécales.
- On estime que l'eau potable contaminée est à l'origine chaque année de plus de 485 000 décès par diarrhée dont 297 000 enfants.
- D'ici 2025, plus de la moitié de la population mondiale vivra dans des régions soumises au stress hydrique.
- Dans les pays en voie de développement, 22% des établissements de santé n'ont aucun service d'alimentation en eau, 21% aucun service d'assainissement et 22% aucun service de gestion des déchets.
- Environ 80% des eaux usées dans le monde sont rejetées dans l'environnement sans traitement.

## 2.2 Demande et utilisation de l'eau

L'utilisation de l'eau a augmenté dans le monde entier d'environ 1% par an depuis les années 1980. Cette augmentation constante est principalement due à l'augmentation de la demande dans les pays en voie de développement et les économies émergentes bien que la quantité d'eau par habitant dans la majorité de ces pays reste très inférieure à celle des pays développés. Cette croissance est une conséquence de la croissance démographique, du développement socio-économique et de l'évolution des modes de consommation. L'agriculture, y compris l'irrigation, l'élevage et l'aquaculture, est de loin la plus grande consommatrice d'eau, puisqu'elle représente 69% des prélèvements annuels d'eau dans le monde. L'industrie, comprenant la production d'électricité, représente 19% et les ménages 12% [84]. La demande mondiale en eau devrait continuer à augmenter à un rythme similaire jusqu'en 2050, ce qui représente une augmentation de 20% à 30%.

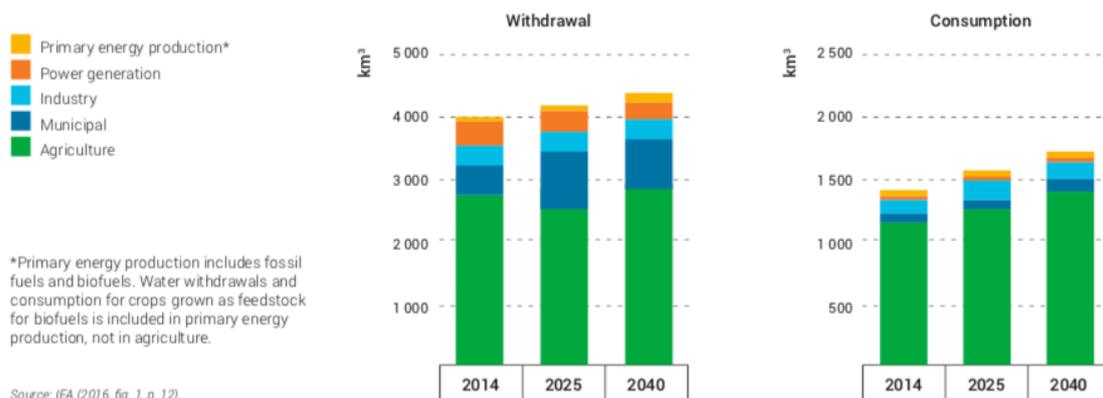


Figure 1 Demande mondiale en eau par secteur d'ici 2020

Source : Stuart et Woodroffe [81]

Plus de 2 milliards de personnes vivent dans des pays où la demande en eau dépasse les ressources en eau disponible dans ce même pays, c'est ce qu'on appellera le stress hydrique. Des estimations récentes montrent que 31 pays connaissent un stress hydrique compris entre 25% (qui est défini comme le seuil minimum de stress hydrique) et 70% [71]. Vingt-deux autres pays se situent au-dessus de 70% et sont donc soumis à un grave stress hydrique. Un stress hydrique croissant indique une utilisation importante des ressources en eau, avec des impacts plus importants sur la durabilité des ressources et un potentiel croissant de conflits entre les utilisateurs. On estime qu'environ 4 milliards de personnes, représentant près des deux tiers de la population mondiale, souffrent d'une grave pénurie d'eau pendant au moins un mois de l'année.

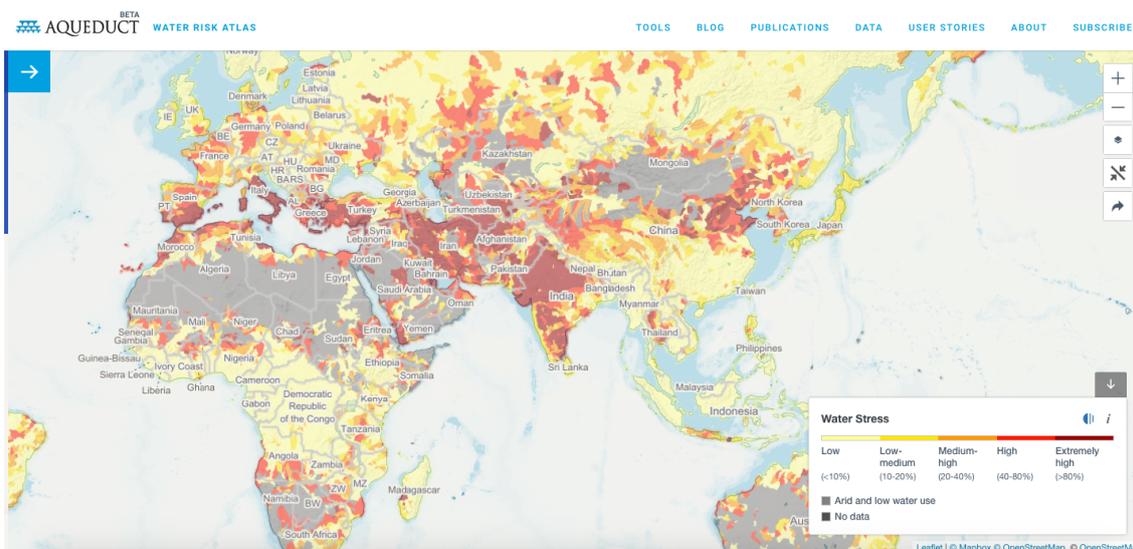


Figure 2 Pays actuellement en stress hydrique  
 Source : Mezher et al. [58]

### 2.3 Qualité de l'eau

Dans le monde, plus de 80% des eaux usées retournent dans l'environnement sans être traitées.

Plusieurs maladies liées à l'eau, notamment le choléra et la schistosomiase, restent répandues dans de nombreux pays en voie de développement, où seule une très petite fraction (dans certains cas moins de 5%) des eaux usées domestiques et urbaines est traitée avant d'être rejetée dans l'environnement[64].

L'eau contenant des agents infectieux ou des produits chimiques toxiques sont un risque pour la santé. C'est pourquoi l'OMS a instauré des normes internationales quant à la qualité de l'eau potable, sur lesquelles se basent les pays aussi bien développés qu'en développement pour la mise en place de leurs propres normes.

Par exemple en France l'eau potable doit être en accord avec près de 70 critères de qualité comme la présence de fer à ne pas dépasser par litre[75]. Ces critères sont mis en place grâce aux recherches scientifiques sur la quantité d'un produit qu'une personne tel qu'un bébé ou une femme enceinte peut absorber chaque jour sans danger pour sa santé.

### 2.4 Quantité d'eau disponible

Environ 90% de toutes les catastrophes naturelles sont liées à l'eau. Sur la période 1995-2015, les inondations ont représenté 43% de toutes les catastrophes naturelles répertoriées,

affectant 2,3 milliards de personnes, tuant 157 000 autres et causant 662 milliards de dollars de dommages. Les sécheresses représentaient 5% des catastrophes naturelles, affectant 1,1 milliard de personnes, en tuant 22 000 autres et causant 100 milliards de dollars de dommages sur la même période de 20 ans[66].

Une moyenne de 25,3 millions de personnes sont déplacées chaque année par des catastrophes naturelles[18]. Si les chiffres peuvent varier considérablement d'une année à l'autre en fonction de la fréquence et de l'ampleur des catastrophes, le risque global d'être déplacé par des catastrophes a doublé depuis les années 1970, principalement en raison de la croissance démographique, de l'exposition et de la vulnérabilité accrue aux risques naturels, une tendance qui devrait se poursuivre avec les effets néfastes du changement climatique.

Sont exclues de ces chiffres les personnes qui se déplacent en raison d'événements à évolution lente et de facteurs de stress (par exemple, sécheresse chronique, élévation du niveau de la mer, désertification ou perte d'écosystèmes etc). Car les facteurs à l'origine de ces déplacements sont souvent complexes.

Il est de plus en plus évident que l'épuisement des ressources naturelles, tels que l'eau est principalement dû à une combinaison d'utilisation excessive, de dégradation de l'environnement et de changement climatique. Le changement climatique devrait accroître la fréquence et l'ampleur des phénomènes météorologiques extrêmes.

Toutefois, les services d'eau potable et d'assainissement inadéquats touchent un plus grand nombre de personnes que les conséquences des inondations, des sécheresses et des conflits. Des barrages et des réservoirs de petite taille, à proximité et adaptés à l'usage des populations locales peuvent contribuer à la sécurité de l'eau et à la prévention des inondations ainsi que de fournir de l'énergie renouvelable. En plus de ce problème climatique et de la gestion des infrastructures l'être humain a tendance à se créer ses propres barrières pour des raisons éthiques, religieuses ou sociales.

## 2.5 Qui sont les laissés-pour-compte ?

Il existe de multiples motifs d'inégalité d'accès à l'eau, mais la pauvreté y occupe généralement une place importante.

Dans de nombreuses régions du monde, les femmes sont régulièrement victimes de discriminations et d'inégalités dans l'exercice de leurs droits fondamentaux à l'accès à l'eau potable et à l'assainissement en particulier dû aux lois de leur religion[47]. Les minorités ethniques, les peuples indigènes, les personnes de certaines ascendances (comme les castes) sont souvent victimes de discrimination, car ils représentent des minorités religieuses et

linguistiques. Le handicap, l'âge et l'état de santé peuvent également être un facteur, car les personnes souffrant de déficiences physiques, mentales, intellectuelles ou sensorielles sont représentées de manière disproportionnée parmi celles qui n'ont pas accès à l'eau potable et à l'assainissement. Les différences de propriété, d'occupation, de résidence et de statut économique et social peuvent également entraîner des discriminations. La vague migratoire que connaît l'Europe actuellement peut également avoir un effet sur le partage des ressources et sur la consommation en eau[13].

Il est important de noter que certaines personnes peuvent souffrir de plusieurs formes de discrimination.

## 2.6 Les régions

### 2.6.1 Le Moyen-Orient

La pénurie d'eau au Moyen-Orient va continuer à augmenter en raison de la croissance démographique et du changement climatique[56]. La difficulté à garantir l'accès aux services d'eau pour tous dans des conditions de rareté de l'eau est exacerbée dans les situations de conflit où les infrastructures d'eau ont été endommagées, détruites et ciblées pour être détruites. C'est également une région avec une grande partie de la population qui appartient à des branches radicales de la religion musulmane qui limitent l'accès à l'eau aux minorités, aux femmes et aux enfants.

L'aide humanitaire est de plus en plus étroitement liée au travail de développement visant à fournir un approvisionnement en eau et des installations sanitaires plus permanentes dans les camps de réfugiés et les établissements informels. Cela a parfois provoqué des conflits et des tensions avec les communautés d'accueil, en particulier si les parties n'ont pas un accès égal aux services d'eau[7].

### 2.6.2 L'Asie et le Pacifique

En 2016, 29 des 48 pays de la région étaient considérés "à risque" en raison de la faible disponibilité de l'eau et du prélèvement non durable des eaux souterraines[45]. La rareté de l'eau est aggravée par les effets du changement climatique. Les catastrophes naturelles deviennent plus fréquentes et plus intenses. Cela a des répercussions majeures sur la distribution en eau dans les zones touchées par les catastrophes, en raison de l'endommagement des infrastructures d'approvisionnement en eau et d'assainissement et des problèmes de

qualité de l'eau. C'est également un défi important que de fournir des services adéquats aux zones qui accueillent des personnes déplacées en provenance de zones sinistrées.

Les catastrophes causent des pertes disproportionnées aux pays et aux populations les plus pauvres, car ceux-ci manquent souvent de fond pour atténuer l'impact des catastrophes.

### 2.6.3 L'Europe et l'Amérique du Nord

L'accès à des services d'assainissement bien entretenus reste un défi dans de nombreux pays, en particulier dans les zones rurales. Si la situation est particulièrement grave pour une grande partie de la population en Europe orientale, dans le Caucase et en Asie centrale, de nombreux citoyens d'Europe occidentale et centrale, ainsi que d'Amérique du Nord, souffrent également de l'absence ou de l'inégalité d'accès aux services d'eau et d'assainissement[3]. Les inégalités sont souvent liées à des différences socioculturelles, à des facteurs socio-économiques et au contexte géographique[77].

### 2.6.4 L'Amérique latine et les Caraïbes

Des millions de personnes dans la région sont toujours privées d'une source d'eau potable adéquate, tandis qu'un nombre encore plus important de personnes souffre de l'absence d'installations sûres et décentes pour l'évacuation des excréments[85]. De nombreuses personnes sans accès aux services sont concentrées dans les zones périurbaines, principalement dans les bidonvilles qui existent à la périphérie de nombreuses villes de la région. Il s'est avéré difficile de fournir à ces zones marginales des services de qualité acceptable.

Dans de nombreux pays, la décentralisation a laissé le secteur de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement avec une structure très fragmentée composée de nombreux prestataires de services sous la responsabilité de municipalités qui ne disposent pas des ressources nécessaires pour faire face efficacement à la complexité des systèmes d'approvisionnement en eau.

### 2.6.5 L'Afrique subsaharienne

Le manque d'infrastructures de gestion de l'eau, tant au niveau du stockage, de la distribution, de l'amélioration des services d'eau potable que de l'assainissement, joue un rôle direct dans la persistance de la pauvreté en Afrique subsaharienne[12].

Les personnes vivant dans les zones rurales représentent environ 60% de la population totale de l'Afrique subsaharienne, et beaucoup d'entre elles restent dans la pauvreté. En 2015, trois habitants sur cinq des zones rurales de la région avaient accès à au moins un approvisionnement de base en eau et seulement un sur cinq avait accès à au moins un assainissement de base. Environ 10% de la population buvait encore de l'eau de surface non traitée, et de nombreuses personnes dans le besoin des zones rurales, en particulier les femmes, passaient un temps considérable à aller chercher de l'eau.

Plus de la moitié de la croissance démographique prévue d'ici 2050 (1,3 sur 2,2 milliards dans le monde) se produira en Afrique[81]. Cependant, fournir à cette population croissante un accès aux services d'eau n'est pas le seul défi pour l'Afrique, car les demandes en énergie, en nourriture, en emplois, en soins de santé et en éducation vont également augmenter. La croissance démographique se produit surtout dans les zones urbaines, et sans une planification adéquate, pourrait entraîner une augmentation spectaculaire des bidonvilles.

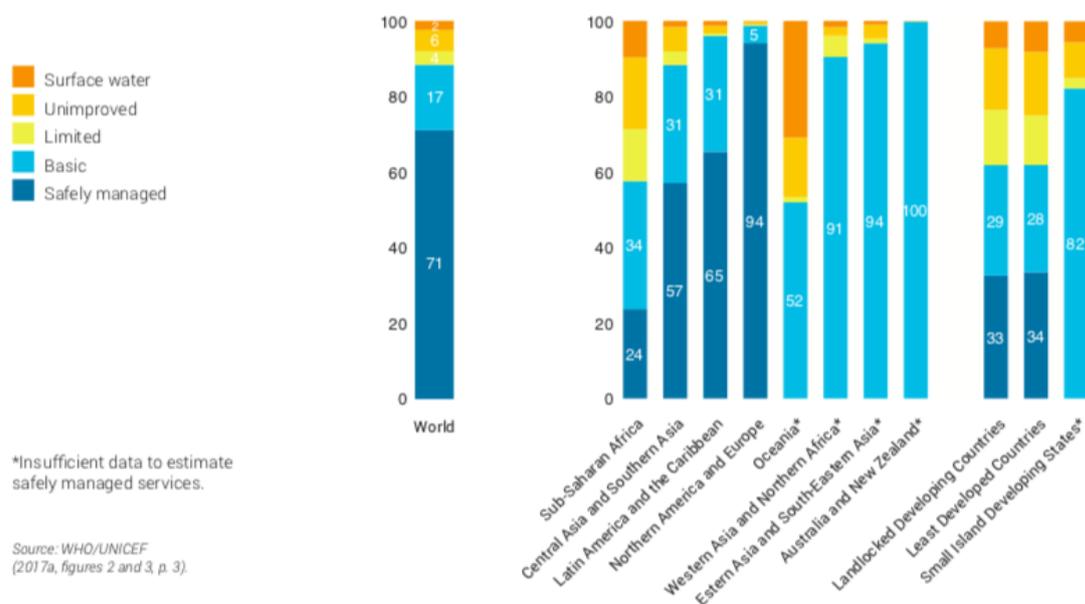


Figure 3 Couverture mondiale en eau potable en 2015  
Source : Stuart et Woodroffe [81]

## 2.7 Les droits de l'homme à l'eau et à l'assainissement

Lors de la 108<sup>ème</sup> séance plénière du 28 juillet 2010, l'assemblée générale des Nations Unies «reconnait que le droit à l'eau potable et à l'assainissement est un droit de l'Homme, essentiel à la pleine jouissance de la vie et à l'exercice de tous les droits de l'Homme ;»

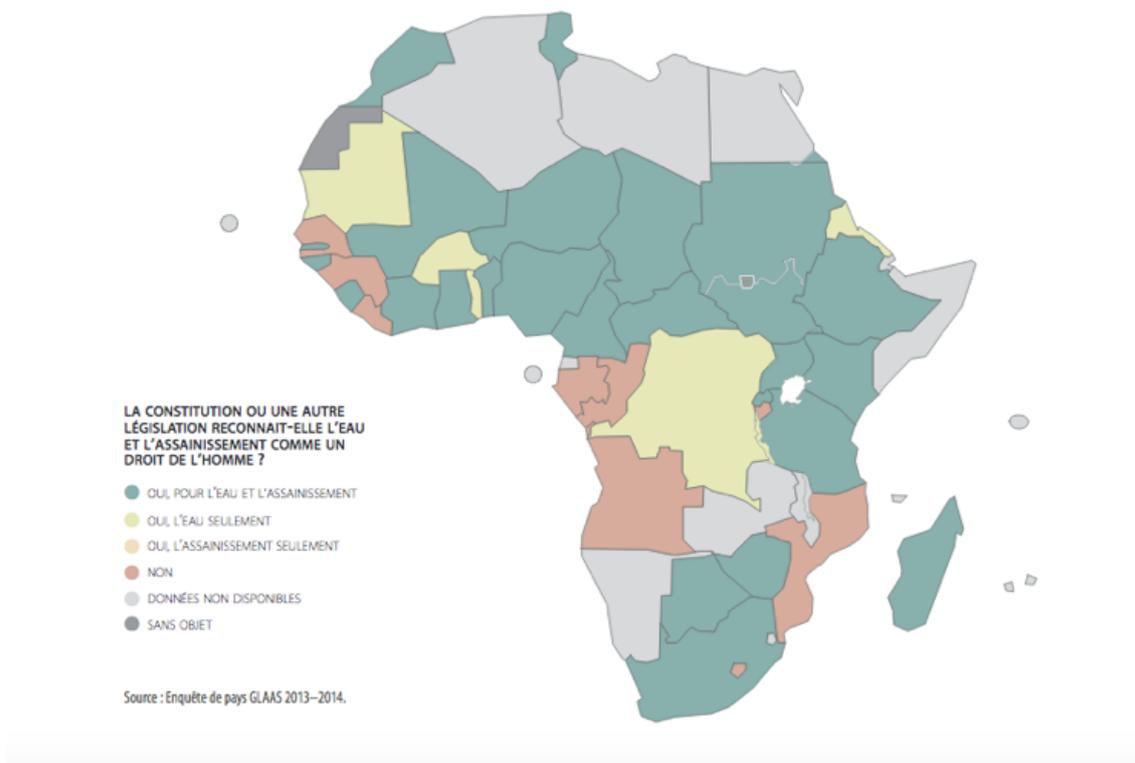


Figure 4 Pays reconnaissant l'eau et l'assainissement comme un droit de l'Homme dans leur constitution ou législation

Source : GLASS Survey 2013-2014

et demande également aux états d'intensifier leurs efforts pour fournir une eau potable et des services d'assainissement qui soient accessibles et abordables pour tous en particulier dans les pays en développement[50].

Le droit international relatif aux droits de l'Homme oblige les États à œuvrer à la réalisation de l'accès universel à l'eau et à l'assainissement pour tous, sans discrimination, tout en accordant la priorité à ceux qui en ont le plus besoin. La réalisation des droits de l'Homme à l'eau et à l'assainissement exige que les services soient disponibles, physiquement accessibles, équitablement abordables, sûrs et culturellement acceptables. Il convient de faire preuve de prudence afin d'établir une distinction claire entre les "droits à l'eau" et les droits de l'homme à l'eau et à l'assainissement. Les droits à l'eau, qui sont normalement réglementés par les lois nationales, sont conférés à un individu ou à une organisation par le biais de droits de propriété ou de droits fonciers, ou par un accord négocié entre l'État et le(s) propriétaire(s) des terres. Ces droits sont souvent temporaires et peuvent éventuellement être retirés. Les droits de l'Homme à l'eau et à l'assainissement ne sont ni temporaires ni soumis à l'approbation de l'État, et ne peuvent pas être retirés.

## 2.8 L'accessibilité à l'eau

L'accessibilité de l'eau fait référence à la manière dont l'eau est physiquement fournie ou obtenue. L'eau courante est la méthode la moins coûteuse pour transporter l'eau dans les zones densément peuplées. Lorsque les réseaux de canalisations ne sont pas disponibles, les gens dépendent principalement des puits ou des systèmes communautaires d'approvisionnement en eau (par exemple, la distribution de l'eau par des kiosques et des vendeurs, ou par des camions citernes). Dans ce dernier cas, la population paie souvent des prix beaucoup plus élevés pour une eau de moindre qualité, ce qui aggrave encore les inégalités entre les riches et les défavorisés.

Le traitement de l'eau concerne les procédés utilisés pour purifier, désinfecter et protéger l'eau contre la contamination[65]. Les méthodes les plus courantes de traitement de l'eau dépendent de la disponibilité de l'énergie (généralement l'électricité) 24 heures sur 24, ce qui est rarement le cas dans la plupart des pays en développement. Il existe également des solutions de faible technicité et basées sur la nature, mais elles ne sont généralement pas appliquées à grande échelle et ne garantissent généralement pas une qualité d'eau potable.

C'est là que notre projet rentre en action. En effet la majorité des pays en stress hydrique est située sur les côtes et donc accessible en bateau. Avec notre installation nous pourrons avoir un contrôle sur un grand nombre de paramètres : nous nous adapterons aux normes de chaque pays concernant les critères pour l'eau potable, le stockage sera contrôlé pour éviter toute contamination, nous produirons notre propre énergie et donc nous ne serons dépendant de personne. Enfin le conditionnement sera si possible effectué par le navire.



# Chapitre 3

## Etude de cas

Afin d'illustrer ce réel problème qu'est le manque d'eau à travers le monde nous avons décidé de prendre deux crises hydriques qui ont eu lieu récemment sur deux continents différents. Ces deux études de cas ne sont que des exemples parmi de nombreux autres crises hydriques et montrent le mieux l'urgence de la situation ainsi que le marché disponible.

### 3.1 Sao Paulo

Sao Paulo est une ville Brésilienne qui se situe sur un plateau à 700 mètres au-dessus du niveau de la mer assez proche de la côte. Pour s'approvisionner en eau la ville pompe  $33m^3$  d'eau par seconde en amont des bassins fluviaux de Piracicaba, Capivari et Jundiai à travers 48 kilomètres de tunnels et six réservoirs de Cantareira. Sao Paulo s'appuie également sur cinq systèmes de réservoirs, plus petit que ceux de Cantareira, qui s'approvisionnent en eau dans le bassin d'Alto Tiete[76].

En 2014, Sao Paulo a failli manquer d'eau au milieu de la pire sécheresse en huit décennies. Les écoles ont fermé, les récoltes ont diminué et les réservoirs se sont vidés. Au plus fort de la crise, le principal réservoir de la ville a chuté à 3% de sa capacité et la ville avait moins de vingt jours d'approvisionnement en eau. Grâce à des restrictions d'eau extrêmes, des correctifs techniques à court terme et à un peu de pluie, la ville de 22 millions d'habitants a pu être sauvée d'une catastrophe hydrique. La crise de l'eau a été jugée «terminée » en 2016, mais en janvier 2017, les principales réserves étaient toujours inférieures de 15% aux prévisions pour la période considérée[73].

Aujourd'hui les robinets fonctionnent de nouveau librement, mais les experts préviennent qu'une nouvelle crise de l'eau est possible à Sao Paulo. La saison sèche de 2018 a fait

craindre une nouvelle crise hydrique. D'après le président de Sabesp, Jerson Kelman, fournisseur en eau de la ville, la déforestation en cours en Amazonie serait une des causes principales des graves pénuries d'eau qui sévissent dans la région. En référence à la probabilité d'une nouvelle crise de l'eau à Sao Paulo, Malu Ribeiro, membre du mouvement de conservation "SOS Mata Atlantica" déclare : «Il est possible de s'améliorer en investissant dans les forêts et le traitement de l'eau, mais cela ne se produit pas. Alors bien sûr, ce [genre de sécheresse] se reproduira. La ville continue de croître. Il y a plus de déforestation. De plus en plus de personnes vivent près des sources d'eau. Nous avons peu ou rien appris de la crise.». Les écologistes tentent de changer le point de vue du gouvernement en leur faisant prendre des mesures durables telles que la construction de forêts et le nettoyage des cours d'eau ainsi que de moderniser les infrastructures hydrauliques. En effet, Sao Paulo a été critiquée par des experts des Nations Unies pour avoir perdu 31% de son eau traitée à cause de fuites et de vols, contre une moyenne de 16% aux Etats-Unis. Ça reste toutefois inférieur à la moyenne nationale de 40% au Brésil. Abritant le plus grand approvisionnement en eau douce du monde, le Brésil n'avait pas auparavant beaucoup de raisons de conserver cette eau[8].

Anicia Pio, chef du département de l'environnement de l'association industrielle Fiesp de Sao Paulo a déclaré : «C'est cyclique. C'est arrivé en 2004, c'est arrivé en 2014. Nous n'avons pas de boule de cristal pour savoir quand cela pourrait se reproduire.»[79]

## 3.2 Cape Town

Le Cap (ou Cape Town) est une ville côtière qui se situe dans la région du Cap Occidental en République d'Afrique du Sud. Cette ville est en pleine expansion et compte actuellement plus de 4 millions d'habitants. Elle est menacée de pénurie d'eau depuis de nombreuses années dûe à son climat sec et sa consommation d'eau par habitant relativement importante, figure 5. Cette région du Cap Occidental a un climat méditerranéen, avec des hivers humides et frais ainsi que des étés chauds et secs. La plupart des pluies tombent au Cap pendant l'hiver (mai-août), avec des précipitations annuelles moyennes de 749 mm. Début 2018, après trois hivers simultanés de faibles précipitations et la pire période depuis plus de 100 ans, la ville du Cap (CoCT) a annoncé que la population devrait prendre des mesures drastiques pour éviter de manquer d'eau, une situation appelée «Jour zéro», pour la première fois de son histoire. Si le jour zéro devait arriver la majorité du système de distribution d'eau de la ville serait fermée et l'eau serait distribuée par des bornes fontaines communes aux résidents et limitée à 25 litres par personne et par jour, conformément aux recommandations minimales de survie d'urgence à court terme de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Au moment de l'annonce, 60% de la popu-

lisation utilisait régulièrement plus de 87 litres par jour et par personne. La constitution de l'Afrique du Sud garantit à toute la population le droit d'accéder à «suffisamment d'eau » de sorte que le gouvernement sud-africain est tenu de veiller à ce que l'approvisionnement en eau soit suffisant. La question a donc été juridiquement et politiquement très controversée[82]. Les approvisionnements en eau en surface de Cap sont stockés dans six grands réservoirs, alimentés par la pluie ainsi qu'une petite partie des sources d'eau souterraines. Le Western Cape Water Supply System (WCWSS) alimente en eau ces réservoirs via ses réseaux de distribution. Lorsque les restrictions d'eau ne s'appliquent pas, environ 70% de l'eau fournie par le WCWSS est alloué aux utilisateurs urbains et industriels, dont 30% à des fins agricoles.

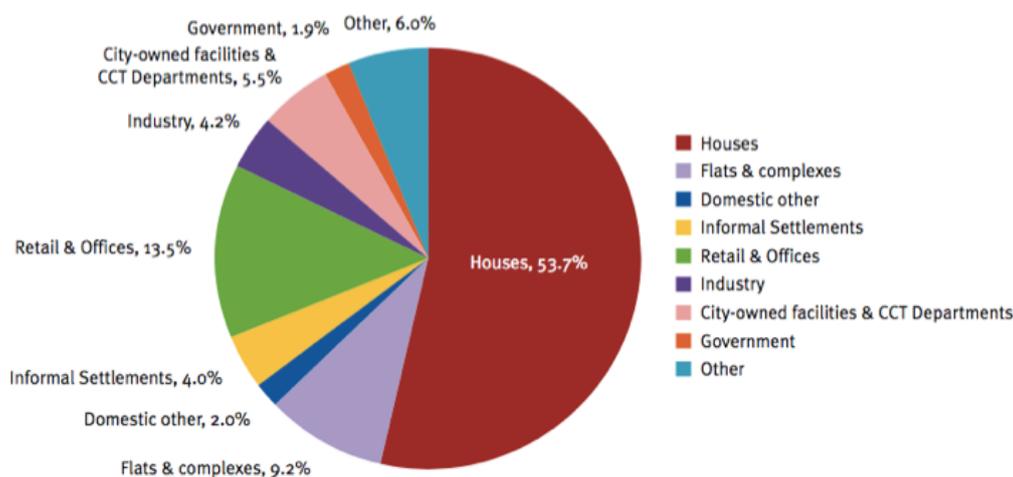


Figure 5 Consommation d'eau potable à Cape Town par secteur en 2017  
Source : « The 11 cities most likely to run out of drinking water » [82]

Les pénuries d'eau récentes sont principalement dues à un manque de précipitations et sont exacerbées par d'autres facteurs comme la consommation élevée et le manque d'investissements dans la capacité d'approvisionnement en eau[8].

Depuis 2015, les précipitations sont anormalement faibles, figure 6. Alors que la population du Cap est passée de 1,6 million en 1980 à plus de 4 millions en 2018, l'eau disponible par personne chaque année a considérablement diminué, passant de plus de 500 000 litres par personne au début des années 80, à environ 200 000 litres par personne en 2016. L'augmentation de l'utilisation de l'eau à des fins agricoles a également contribué aux récentes pénuries. Le CoCT a introduit des restrictions d'eau de plus en plus strictes au cours de la période de crise. Ces restrictions ont été modifiées et améliorées au fil du temps à mesure que la pénurie d'eau est devenue de plus en plus aiguë. Des amendes comprises entre 70\$ et 700\$ ont été infligées pour sanctionner les comportements transgressifs et les ménages à forte consommation. Ces restrictions ont défini des limites sur la façon dont l'eau pourrait être utilisée, en quelles quantités et à quelles fins. Au niveau des restrictions

les plus extrêmes mis en œuvre, le niveau 6B, les résidents étaient limités à un maximum de 50 litres d'eau par personne et par jour. Les restrictions ont été révisées au cas par cas par le CoCT, certaines révisions ayant eu lieu dans le mois suivant la restriction précédente.

L'impact de ces restrictions d'eau a été très efficace, la consommation moyenne d'eau quotidienne de la ville étant passée de 1 200 millions de litres en février 2015 à 500 millions de litres en février 2018. A partir de décembre 2017 à mars 2018, le pourcentage de maisons unifamiliales utilisant moins de 10 500 litres d'eau par mois est passé de 64% à 81% et celles utilisant moins de 6 000 litres passant de 31% à 49%[67].

Ces restrictions ont donc permis d'empêcher l'arrivée du Jour zéro mais les réserves d'eau continuent à diminuer dangereusement. Il va donc falloir trouver une solution plus efficace et plus radicale dans un futur proche.

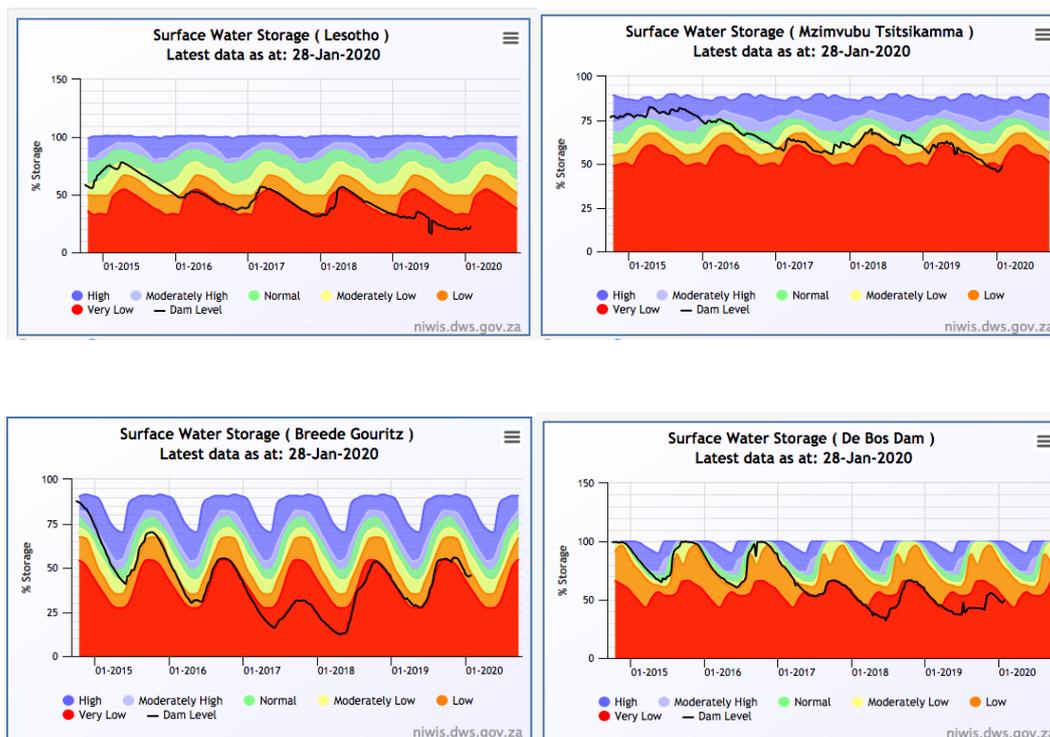


Figure 6 Stockage de l'eau de surface des réservoirs Lesotho, Mzimvubu Tsitsikamma, Breede Gouritz et De Bos Dam  
Source : niwis.dws.gov.za

# Chapitre 4

## Objectif général

Dans les parties précédentes nous avons pu nous rendre compte de la difficulté qu'il y a à produire de l'eau saine et surtout de l'inégalité qu'il y a entre les différentes régions du monde.

L'objectif de ce mémoire est donc de pouvoir fournir de l'eau potable à partir de l'eau de mer, dans un premier temps, aux populations les plus atteintes par le manque d'eau. Celui-ci devra bien entendu correspondre aux normes sanitaires du pays. Dans la mesure du possible le prix de production ne dépassera pas le prix de l'eau dans la région voire sera moins cher. Pour y arriver le choix du système de dessalement sera primordial. Dans un premier temps les navires seront équipés de cuves pour contenir l'eau dessalé. Ce choix permettra de faire des économies sur l'emballage, limiter la pollution créée par le bateau et faciliter le transport de cette eau vers les villes situées à l'intérieur des terres, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

Le pompage de l'eau se fera dans la majeure partie des missions à une bonne distance de la côte afin de pomper l'eau de mer la plus pure possible et ainsi diminuer le temps du processus de dépollution. Il se fera également à une profondeur assez importante, environ 300 mètres. En effet à cette profondeur la température de l'eau de mer y est beaucoup plus froide ce qui empêche le développement des bactéries tout en conservant tous les minéraux présents dans l'eau. Avant d'être dessalée, cette eau à très basse température, environ 6 degrés, pourra être utilisée pour refroidir les différents systèmes présents à bord. Mais l'eau pourra également être pompée sur la côte afin de faciliter son acheminement vers la terre via une infrastructure fixe.

Si notre objectif premier est de produire de l'eau pure et dessalée, cela doit se faire, dans la mesure du possible, dans le respect de l'environnement. Et le choix de notre système de dessalement se fera également avec ce critère. Pour diminuer notre production de carbone

beaucoup de choses peuvent être faites. Par exemple dans le choix de notre source d'énergie pour le dessalement ainsi que pour la propulsion du navire, faire en sorte de stopper les moteurs dès que cela devient possible. . .

Un des objectifs secondaires serait d'avoir, dans un premier temps, des officiers uniquement franco-belge ce qui permettrait de créer des emplois dans les deux pays. Par la suite on peut imaginer que pour un contrat sur le long terme avec un pays on puisse recruter du personnel d'équipage de ce même pays afin de les former, de créer des emplois dans la région et quand le contrat arrivera à son terme ce personnel pourra retrouver du travail plus facilement avec les connaissances et l'expérience qu'ils auront acquise à bord.

# Chapitre 5

## Cahier des charges

### 5.1 Production

Notre objectif dans un premier temps sera la mise en service d'un navire polyvalent. C'est-à-dire qu'il sera capable de rester proche d'une côte et donc d'un port et d'une ville pendant une longue période si cette dernière en a besoin. Mais en cas d'urgence tel que le passage d'un ouragan au large des côtes de la Floride, ou d'un typhon au large des côtes de la Chine par exemple, nous pourons très rapidement nous écarter de la côte, puis, dès que le danger sera passé nous pouvons nous installer de nouveau et commencer à produire de l'eau douce pour la région ou la ville. Autre que les risques naturels, cette mobilité peut servir en période de troubles politiques, économiques ou de guerre. Pour ce qui est du transfert de l'eau produite à bord jusqu'à la terre le plus simple, le plus économique, le plus rapide et le plus sûr serait d'utiliser un système de pipelines. On peut imaginer deux sous systèmes :

Soit un système de tuyaux à la surface de l'eau pour les contrats à court terme ou pour les urgences, figure 7. Il faut que ce système soit capable d'être mis en place rapidement et qu'il puisse rester en activité durant plusieurs jours voire semaines en fonction des besoins[28].

Soit un système, figure 8, qui serait adapté aux contrats à long terme, de plusieurs années, et donc constitué de tuyaux enterrés dans les fonds marins. Ce système est approprié pour des profondeurs pouvant aller jusqu'à 3500 mètres[35].

Ces deux systèmes ont été testés et approuvés pour le transfert de pétrole ou de gaz. L'avantage en ce qui concerne le transfert d'eau est que les mesures de sécurité devront être beaucoup moins strictes. En effet en cas d'avarie et donc de fuite, il n'y aurait



Figure 7 Premier exemple de pipeline pour le transfert de l'eau

Source : Floating Transfer Terminal concept promises jettiless LNG ship-to-shore transfer [28]

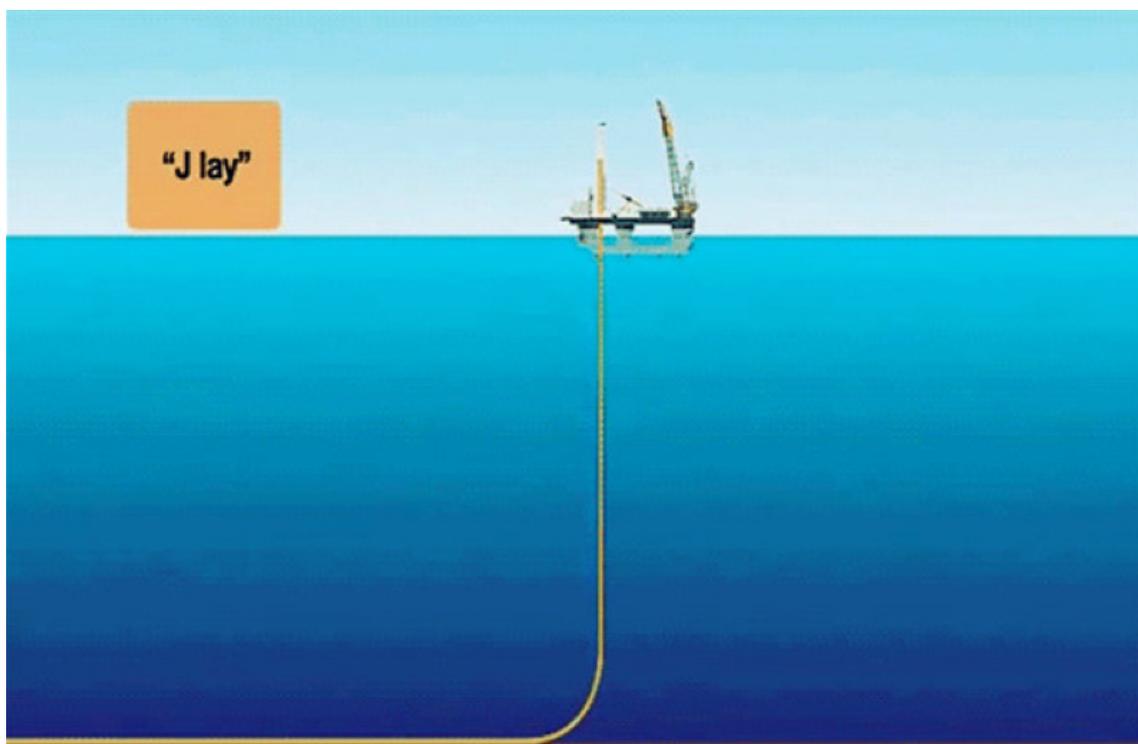


Figure 8 Deuxième exemple de pipeline pour le transfert de l'eau

Source : Floating Transfer Terminal concept promises jettiless LNG ship-to-shore transfer [28]

pratiquement aucun danger de pollution du fait de l'absence de produit chimique ou d'huile. Ce qui veut dire que le coût de production et de la mise en place de ces pipelines serait considérablement moins élevé que pour les pipelines transportant du pétrole ou du gaz[28][35].

On pourrait très rapidement penser qu'un navire de dessalement serait bénéfique seulement aux villes côtières. Mais qu'en est-il des villes qui sont en stress hydrique à l'intérieur des terres ? Il faut savoir que la plupart des villes côtières ne peuvent pas pomper l'eau qui se trouve sous leurs pieds car celle-ci est très souvent contaminée par l'eau de mer. Ces villes vont donc chercher l'eau qui se trouve dans les nappes phréatiques qui se trouvent . . . à l'intérieur des terres. Ce concept de navire de dessalement permettrait donc de fournir de l'eau pure aux villes côtières et de laisser les nappes phréatiques aux villes se situant à l'intérieur des terres. On éviterait ainsi un déplacement de l'eau parfois sur des centaines de kilomètres ce qui permettrait des économies considérables.

## 5.2 Quel type d'eau ?

Dans un premier temps l'objectif est de dessaler l'eau de mer. Pour cela plusieurs étapes seront nécessaires. Tout d'abord il faudra pomper l'eau à une profondeur assez importante pour qu'elle soit la plus pure possible. Ce qui permettra un premier filtrage naturel. Dans un second temps il y aura toute la partie de dessalinisation que nous verrons un peu plus loin qui sera suivi d'une reminéralisation si besoin. Et enfin il y aura la partie stockage et transfert de l'eau douce vers la terre. Sur le plus long terme ce concept pourrait être adapté pour nettoyer l'eau polluée et ainsi être transformée en eau grise pour être utilisée dans l'agriculture ou l'irrigation.

La reminéralisation est nécessaire car les minéraux disponibles dans les aliments, fruits, légumes, viandes, poissons. . . se sont dégradés ces dernières années tant en quantité qu'en qualité. Cela affaiblit le système immunitaire des êtres humains et conduit à différentes synergies toxiques pour notre corps. Cependant, il existe une deuxième chaîne alimentaire sur Terre, une chaîne qui peuple naturellement les océans et qui fournit des nutriments minéraux qui ne se trouvent pas dans les aliments industriels. Le phytoplancton, la biomasse la plus importante de la planète module tous les minéraux existants grâce au processus de photosynthèse au soleil et qui les transfère à l'eau de mer[1].

La quantité d'eau produite dépendra de plusieurs facteurs. Premièrement et principalement de la technologie utilisée pour la dessalinisation. En effet certaines technologies peuvent produire une grande quantité d'eau dessalée mais à un prix très élevé ou en faisant de grandes concessions écologiques. Le deuxième facteur sera le type de navire que

l'on choisira. Un navire avec des citernes? De quelle taille? ... Il y aura également le facteur prix. Quel est notre budget? Et comment le répartir? D'autres facteurs un peu moins importants entreront en compte tels que le choix de l'équipage, les réglementations en vigueur dans les zones que nous exploiterons, l'état initial du navire ...

### 5.3 Quel type de navire?

Notre choix se portera sur d'anciens pétroliers et transporteurs de pétrole brut qui ont subi une enquête d'évaluation conditionnelle indiquant que le navire ne peut plus être utilisé pour transporter du pétrole ou des produits huileux en raison de l'épaisseur réduite de sa coque. Ces navires seront achetés et transformés en navires de dessalement d'eau de mer.

La modification se fera en cale sèche où les citernes à cargaison seront converties en réservoirs de stockage d'eau douce, et nous installerons les nouveaux ensembles d'usine pour le dessalement de l'eau de mer. L'eau traitée est ensuite stockée dans les réservoirs de stockage et conservée prête à être évacuée sur les plates-formes appropriées.

Sur le rivage, nous construirons des structures semblables à des plates-formes aquatiques où le navire peut atteindre la plate-forme et fournir de l'eau douce au rivage via un conduit flexible reliant le déchargement du navire aux réservoirs latéraux.

Normalement, les plates-formes seront construites près du rivage à une distance de 1 à 2 km. Ainsi le navire pourra directement venir sur la plate-forme et pomper l'eau douce vers les réservoirs du rivage.

### 5.4 Avantages de l'utilisation d'un navire de dessalinisation

1. Ce système est une source d'eau fiable même dans des conditions météorologiques extrêmes.
2. Il est mobile, ce qui réduit le coût du transport de l'eau douce produite, comme dans le cas des systèmes de dessalement terrestres, l'eau douce de l'usine devant être transportée du lieu de production vers les villes voisines par voie terrestre. Le transport par voie terrestre étant très coûteux, nous pouvons plutôt installer de nouvelles plates-formes d'eau douce sur le rivage près de la ville.
3. La construction du navire de dessalement est bon marché car il est modifié à partir d'un pétrolier, et la construction de la plate-forme est également rentable : dans la majorité des cas, elle sera proche du rivage où la profondeur de l'eau sera moindre.

4. Ces navires génèreront leur propre électricité, ce qui réduira les pertes de transmission entre le réseau électrique et l'usine de dessalement.
5. Les navires pourront fournir de l'eau douce à une ou plusieurs villes car ils peuvent être amarrés près du rivage.
6. Ils réduiront la quantité de produits chimiques utilisés pour le prétraitement de l'eau car l'eau de mer ne sera pas prélevée près du rivage, ce qui réduit les coûts de prétraitement, car l'électricité, les produits chimiques et l'élimination des déchets sont très peu utiles dans les eaux profondes.



# Chapitre 6

## Systèmes de dessalinisation

Le dessalement de l'eau utilise deux technologies principales : les procédés de distillation thermique (changement de phase) et les procédés membranaires. Les processus de distillation thermique comprennent la distillation flash à plusieurs étages, la distillation à effets multiples et la compression de vapeur. Les processus communs de dessalement des membranes sont l'osmose inverse et l'électrodialyse. Dans les processus de distillation thermique, deux formes d'énergie sont nécessaires pour le fonctionnement. Le premier est la chaleur, qui représente la partie principale de l'apport d'énergie et est généralement fournie au système par un certain nombre de sources externes. Le second est l'électricité, qui entraîne les pompes du système et d'autres composants électriques. Pour les processus membranaires, seule l'électricité est requise comme apport d'énergie[19].

### 6.1 Introduction

Le dessalement est une technologie qui élimine le sel et les autres minéraux des eaux d'alimentation telles que l'eau de mer, les eaux saumâtres souterraines ou les eaux usées industrielles. Aujourd'hui, ce sont les moyens les plus importants de produire et de rentabiliser la production d'eau douce dans la plupart des pays arabes du Golfe et dans certaines autres parties du monde. Sa technologie peut être divisée en deux catégories : les processus de changement de phase et les processus membranaires. Les processus de changement de phase impliquent soit un changement de phase liquide-vapeur tel que dans les processus de distillation flash à plusieurs étages (MSF), multi-effet (MED) et de compression de vapeur (VC), soit un changement de phase liquide-solide tel comme le processus de congélation. Les processus membranaires impliquent l'utilisation de la membrane soit pour permettre à l'eau douce de traverser et de rejeter le sel sous forme de

concentré, comme dans le processus d'osmose inverse (RO), soit pour permettre à certains ions de passer comme dans le processus d'électrodialyse (DE). Les procédés de distillation à changement de phase (MSF, MED) ne sont viables que dans l'eau d'alimentation à haute salinité et utilisés à grande capacité. Ils sont principalement utilisés dans les centrales de cogénération, où les eaux usées d'une centrale électrique peuvent être utilisées comme source de chaleur pour les processus de distillation. Les procédés à membrane peuvent être utilisés à la fois pour l'eau à haute salinité et l'eau saumâtre et dans les usines de grande et de petite capacité. Le processus de congélation et d'autres processus alternatifs tels que l'humidification-déshumidification, la distillation à membrane et les processus alimentés par des énergies renouvelables sont actuellement à l'échelle du laboratoire ou utilisés dans des régions éloignées où l'énergie conventionnelle n'est pas disponible. Le choix d'utiliser une certaine technologie dépend de plusieurs facteurs, tels que la capacité de l'usine, la qualité de l'eau d'alimentation, le type de sources d'énergie et les conditions d'élimination de la saumure[4]. Le fonctionnement technique et l'économie des principaux processus de dessalement seront discutés dans ce chapitre.

Le Reverse osmosis et le Multi-stage flash distillation sont les techniques les plus utilisées. La décision pour une certaine technologie de dessalement est influencée par la salinité de l'eau d'alimentation, la qualité requise du produit ainsi que par des facteurs spécifiques au site tels que le coût de la main-d'œuvre, la superficie disponible, le coût de l'énergie et la demande locale d'électricité.

Une grande partie de la capacité mondiale de dessalement est installée au Moyen-Orient, et bien que le RO gagne rapidement des parts de marché, les processus thermiques dominent toujours le marché du Moyen-Orient en raison du faible coût de l'énergie basée sur les combustibles fossiles dans cette région et en raison de à leur aptitude à se combiner avec la production d'énergie électrique (cogénération de vapeur et d'électricité). Les pays arides et semi-arides d'Europe utilisent également le dessalement comme moyen de surmonter la pénurie d'eau régionale. L'Espagne est le pays européen qui possède de loin la capacité de dessalement la plus élevée. En Europe, presque toutes les usines de dessalement récemment installées utilisent l'osmose inverse[20].

## 6.2 Multi-stage flash desalination : MSF

Le procédé MSF présente de nombreuses caractéristiques intéressantes qui le distinguent des autres configurations de dessalement. Depuis sa création à la fin des années 50, une énorme expérience de terrain s'est accumulée dans la technologie des procédés, la procédure de conception, les pratiques de construction et l'exploitation. Cela a abouti au

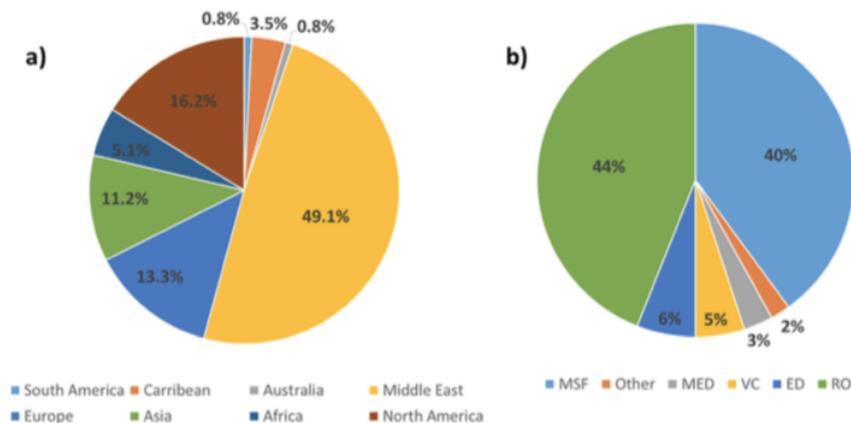


Figure 9 (a) Capacité de désalination par région (b) Capacité de production par système de désalination

Source : Nationen [62]

développement de procédures opérationnelles simples et fiables. De plus, le développement a abordé et résolu divers problèmes opérationnels, notamment la formation de tartre, de mousse, l'encrassement et la corrosion. L'expérience acquise dans le fonctionnement et la conception des usines MSF a conduit à l'utilisation de matériaux de construction peu coûteux capables de résister à des conditions difficiles à haute salinité. Le système MSF ne comprend pas de pièces mobiles, autres que les pompes conventionnelles. La construction des usines MSF est simple et implique un petit nombre de tubes de raccordement, ce qui limite les problèmes de fuite et simplifie la maintenance.

### 6.2.1 Description du système MSF

La figure 10 montre un schéma du système MSF. Le système comprend six flux principaux : l'eau de mer d'admission, l'eau de mer de refroidissement rejetée, le produit distillé, la saumure rejetée, le recyclage de la saumure et la vapeur de chauffage. Le système comprend des étages de détente, un réchauffeur de saumure, des unités de pompage, un système de ventilation et une boucle de contrôle de l'eau de refroidissement. Les étages de détente sont divisés en deux sections : la récupération de la chaleur et le rejet de la chaleur. Le nombre d'étages de détente dans la section de rejet de chaleur est généralement limité à trois. En revanche, le nombre d'étages de détente dans la section de récupération de chaleur varie entre 21 et 40. L'eau de mer d'admission est introduite à l'intérieur des tubes du préchauffeur/condenseur du dernier étage de la détente dans la section de rejet de chaleur. De même, le flux de recyclage de la saumure est introduit à l'intérieur des tubes du préchauffeur/condenseur du dernier étage de vaporisation dans la section de récupération de la chaleur. La saumure de détente s'écoule à contre-courant du recyclage de la saumure du premier au dernier étage de détente[14].

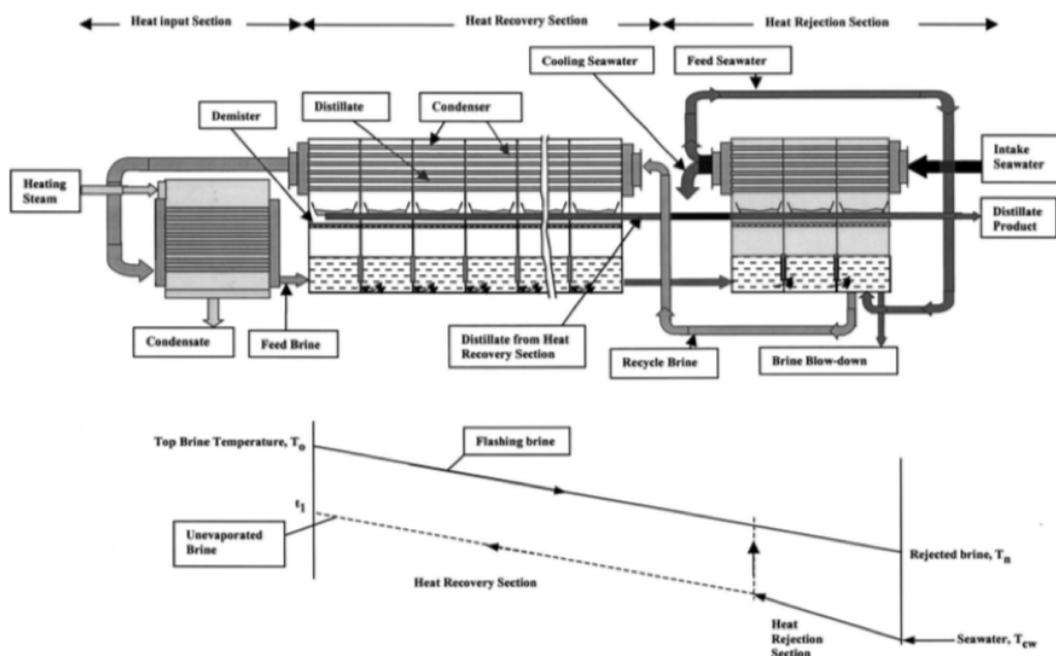


Figure 10 Schéma du système Multi-stage flash desalination  
Source : El-Dessouky et al. [22]

La vapeur de chaleur saturée avec une plage de température de 97 °C à 117 °C conduit au processus de flash. La vapeur de chauffage circule à l'extérieur des tubes et la vapeur de saumure circule à l'intérieur des tubes. Lorsque la vapeur de chauffage se condense, le flux de saumure gagne la chaleur latente de condensation et sa température atteint la température supérieure souhaitée de la saumure. Ce paramètre, ainsi que la température de flash dans la dernière étape, définissent la plage totale de flash. La saumure chaude entre dans le premier étage de flash, où une petite quantité de vapeur de produit est formée. Le processus de détente réduit la température de la saumure non évaporée. La réduction de la température dans les différentes étapes de la distillation est associée à une baisse de la pression de l'étape, où la pression la plus élevée se trouve dans la première étape après le réchauffeur de saumure et la pression la plus basse est celle de la dernière étape. La chute de pression entre les étapes permet l'écoulement de la saumure sans l'utilisation de groupes de pompage entre les étapes.

À chaque étage, la vapeur qui s'échappe passe par le demister, qui élimine les gouttelettes de saumure non évaporée. La vapeur se condense ensuite sur la surface extérieure des tubes du condenseur. La vapeur condensée s'accumule sur les plateaux de distillat à travers les étages de flash pour former l'eau dessalée final, qui est retirée du dernier étage de flash. Le processus de condensation libère la chaleur latente de la vapeur, qui est utilisée pour préchauffer le flux de recyclage de la saumure dans la section de récupération de la chaleur. Le même processus a lieu dans les tubes du condenseur dans la section de rejet de la chaleur. Il en résulte une augmentation de la température de l'eau de mer à une

valeur plus élevée, égale à la température flash de la saumure, dans le dernier étage de la section de rejet de chaleur[43].

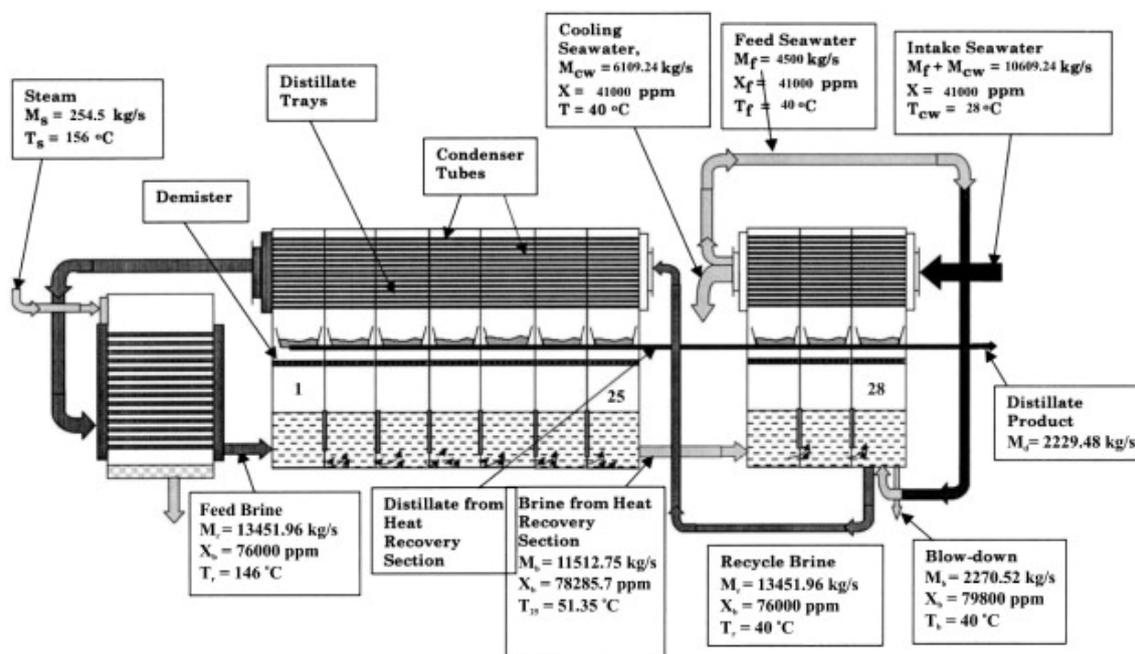


Figure 11 Partie : Section rejet de chaleur  
Source : Kotb [42]

Le courant d'eau de mer d'admission quitte la section de rejet de chaleur, où il se divise en deux courants. Le premier flux est le flux d'eau de mer de refroidissement, qui est rejeté à la mer, et le second est le flux d'eau de mer d'alimentation, qui est mélangé dans le bassin de saumure au cours de la dernière étape de la section de rejet thermique. Avant le point de mélange du flux d'eau de mer d'alimentation, le flux de saumure rejeté est retiré de la piscine de saumure. D'autre part, le recyclage de la saumure est retiré d'un endroit situé après le point de mélange. La purge de la saumure est rejetée à la mer et le recyclage de la saumure est introduit dans la dernière étape de la section de récupération de la chaleur.

Les unités supplémentaires de l'usine de dessalement comprennent le prétraitement des flux d'eau de mer d'alimentation et d'admission. Le traitement de l'eau de mer d'admission se limite à une simple filtration. En revanche, le traitement de l'eau de mer d'alimentation est plus étendu et comprend la désaération et l'ajout d'antitartre et d'inhibiteurs de mousse. Les autres unités de base du système comprennent des unités de pompage pour l'eau de mer d'alimentation, le recyclage de la saumure et la purge de la saumure[78]. Le dégagement de gaz non condensables se produit simultanément avec le processus de détente. La présence de gaz non condensables réduit l'efficacité du processus de condensation de la vapeur. Cela est dû à la faible conductivité thermique des gaz non condensables, qui agissent comme une couche isolante autour des tubes du condenseur.

De plus, la présence de gaz non condensables réduit la pression de saturation de la vapeur de flash, ce qui entraîne une température de condensation plus basse. Par conséquent, la force motrice de la condensation est réduite, de même que l'efficacité thermique globale du processus. Pour éviter l'accumulation de gaz non condensables et leurs effets néfastes sur le processus de condensation, des unités de dégazage sont utilisées pour retirer les gaz non condensables de plusieurs étapes de la vaporisation. Des éjecteurs à jet de vapeur sont adoptés pour générer un vide suffisant pour retirer les gaz des points de collecte situés près des tubes du condenseur. La sélection de ces points est nécessaire pour minimiser les pertes indésirables de vapeur de flash[41].

Il est essentiel de comprendre la nature complexe du schéma MSF et les fonctions et relations des différents éléments du processus pour réussir l'analyse, l'optimisation, l'exploitation et le contrôle du système. Cela est également important pour la mise au point et la conception de nouveaux procédés de dessalement plus efficaces.

Nous allons donc commencer par la configuration la plus simple, à savoir le système flash à un seul étage (SSF). L'analyse se poursuivra avec la configuration de MSF conventionnel.

### 6.2.2 Système flash à un seul étage

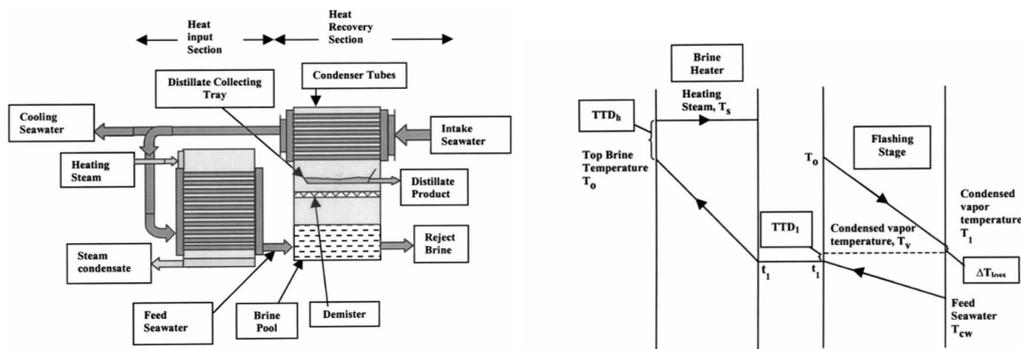


Figure 12 Système Flash à un seul étage

Source : El-Dessouky et al. [22]

Le système flash à un étage, illustrée à la figure 12, contient un réchauffeur de saumure, des tubes de condenseur et un bassin flash. De la vapeur saturée à un débit égal à  $M_s$  est utilisée pour augmenter la température de l'eau de mer d'alimentation de  $t_1$  à  $T_0$ . L'eau de mer d'alimentation,  $M_f$ , entre dans le bassin de détente et sa température tombe à  $T_1$ . La vapeur formée,  $M_d$ , est à une température,  $T_{v1}$ , qui est inférieure à  $T_1$  par les pertes thermodynamiques. La vapeur se condense autour des tubes du condenseur et libère sa chaleur latente dans le flux d'eau de mer d'alimentation,  $M_{cw} + M_f$ . La température du courant passe ainsi de  $T_{cw}$  à  $t_1$ . Typique du système SSF, la quantité d'eau distillée

produite est inférieure à la quantité de vapeur de chauffage. Ceci est donné par la relation :

$$PR = \frac{\Delta T_{st}}{\Delta T_{st} + \Delta T_{loss} + \Delta TTD_c} \quad (6.1)$$

La somme des pertes thermodynamiques,  $\Delta T_{loss}$ , et la différence de température terminale,  $TTD_c$ , peut varier sur une plage de 5°C à 10 °C. D'autres inconvénients sont les grandes quantités d'eau de mer d'alimentation et de refroidissement par rapport à la quantité d'eau produite, où le  $sM_f$  est de 11,54 et le  $sM_{cw}$  de 103,9. Cela augmente la consommation d'énergie de l'unité de pompage, ainsi que la quantité d'additifs chimiques et de prétraitement[62].

### 6.2.3 Système MSF classique

Le système MSF montre un fonctionnement stable en hiver et en été, le rapport de performance thermique variant dans une fourchette étroite de 8 à 8,56. Cette stabilité est le résultat des caractéristiques de conception de la section de rejet de la chaleur. Pendant le fonctionnement en hiver, une partie du flux d'eau de mer de refroidissement du rejet est recyclée et mélangée au flux d'admission. En été, le contrôle de la température de l'eau de mer de refroidissement d'admission n'est pas nécessaire, puisque la différence de température entre l'eau de mer d'admission, 30°C, et la saumure de purge, 40°C, est de 10°C. Par conséquent, l'augmentation de la température de 10°C du flux d'eau de mer d'admission a lieu dans les unités de préchauffage et de condensation[40]. Un autre mérite du système MSF conventionnel est le faible débit de l'eau de mer d'alimentation :  $2,5Kg.s^{-1}$  pour chaque  $1Kg.s^{-1}$  d'eau produite. Cela permet de réduire le taux de consommation d'additifs chimiques et de diminuer la taille des équipements de prétraitement. Le faible débit d'alimentation se traduit par une salinité élevée du flux de saumure de purge,  $70000ppm$ , ce qui implique une utilisation efficace du flux d'eau de mer d'alimentation par la génération de la quantité maximale possible d'eau produit. De plus, la surface spécifique totale de transfert de chaleur est faible :  $287,93m^2Kg^{-1}s^{-1}$ [78].

### 6.2.4 MSF avec mélange de saumure (MSF-M)

Le système MSF-M est un nouveau procédé proposé par El-Dessouky[22]. L'objectif principal de ce procédé est de réduire les pertes d'énergie dans le courant d'eau de mer de refroidissement, que l'on trouve dans les MSF classiques. L'énergie récupérée permettra d'améliorer les performances globales du système.

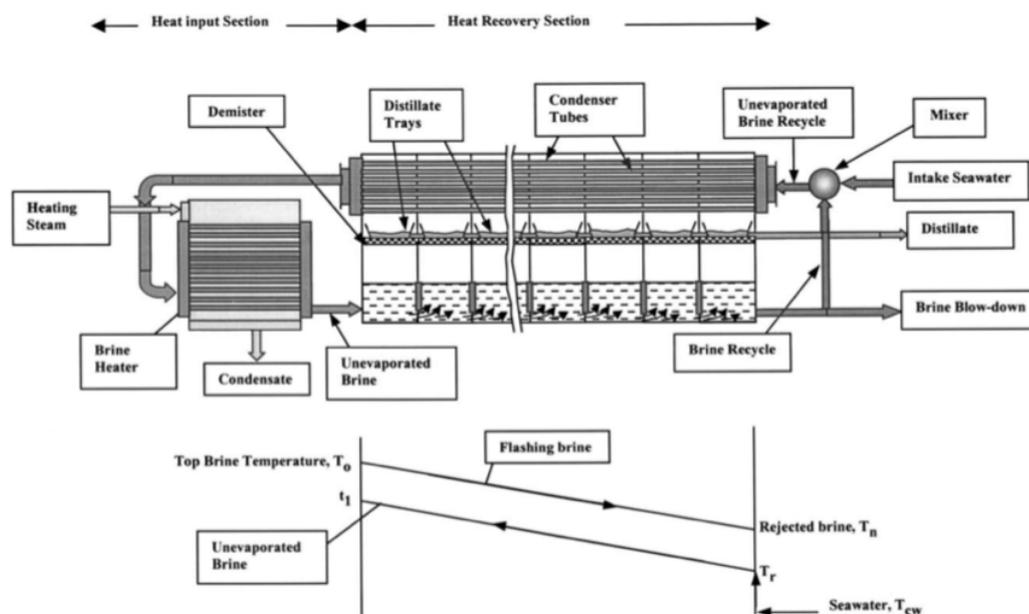


Figure 13 MSF avec mélange de saumure  
Source : El-Dessouky et al. [22]

La configuration du procédé, illustrée à la figure 13, comprend un réchauffeur de saumure, une section de récupération de chaleur et un réservoir de mélange pour le recyclage de la saumure. Une comparaison de la configuration du procédé (figure 13) avec celle de la MSF classique (figure 10) montre :

- La suppression de la section de rejet de la chaleur ;
- L'absence de la boucle d'eau de refroidissement utilisée dans les MSF pour contrôler la température de flash dans le dernier étage et pour éliminer l'énergie excédentaire ajoutée au système dans le réchauffeur de saumure ;
- La suppression de la boucle de recyclage de l'eau de refroidissement, qui sert à régler la température de l'eau du dernier étage de flash dans la section de rejet de chaleur, lorsque la température de l'eau de mer devient très basse pendant le fonctionnement en hiver ;
- Le mélange de la saumure recyclée et de l'eau de mer d'alimentation se fait dans un réservoir de mélange externe plutôt qu'à l'intérieur des étages de flash ;
- La salinité de la saumure rejetée peut être inférieure à la valeur limite ; cela dépend de la température de l'eau de mer d'alimentation ;
- Le débit de l'eau de mer d'alimentation n'est pas constant et est régulé en fonction de la température et de la salinité de l'eau de mer.

### 6.2.5 Avantages/Inconvénients

Les principaux avantages de MSF sont les suivants :

- Simplicité d'utilisation ;
- Génère une eau de haute qualité ;
- Les coûts diminuent de manière significative pour les grandes capacités ;
- Peut-être semi-opérationnel pendant les périodes de nettoyage ou de remplacement des équipements, ce qui limite les temps d'arrêt ;
- Peu d'exigences en matière de prétraitement ;
- Ne génère pas de déchets provenant du lavage à contre-courant des filtres de prétraitement.

Les principaux inconvénients de MSF sont les suivants :

- Consommation d'énergie élevée par rapport à l'osmose inverse ;
- Crée une grande quantité de pollution atmosphérique (principalement due à une forte consommation d'énergie) ;
- Taux élevé d'entartrage dans les tubes.

## 6.3 Multi-effect distillation (MED)

### 6.3.1 Description du système MED

Le procédé MED est la plus ancienne méthode de distillation à grande échelle utilisée pour le dessalement de l'eau de mer. Actuellement, 3,5% de l'eau dessalée dans le monde est produite par les usines MED. Une eau distillée de haute qualité, une capacité unitaire élevée et une grande efficacité thermique sont ses caractéristiques les plus évidentes. En outre, les usines MED sont traditionnellement utilisées dans le secteur de la distillation industrielle pour l'évaporation du jus de la canne à sucre dans la production de sucre et de sel par le procédé d'évaporation. Le procédé MED, comme le MSF, se déroule dans une série de cuves ou d'évaporateurs appelés effets, et il utilise également le principe de l'évaporation et de la condensation en réduisant la pression ambiante dans les différents effets[33]. Ce processus permet à l'alimentation en eau de mer de subir plusieurs ébullitions sans apport de chaleur supplémentaire après le premier effet. L'eau de mer entre dans le premier effet et est portée au point d'ébullition après avoir été préchauffée dans des tubes. L'eau de mer est pulvérisée sur la surface des tubes de l'évaporateur pour favoriser une évaporation rapide. Les tubes de l'évaporateur sont chauffés par de la vapeur fournie par l'extérieur, généralement par une centrale électrique à double usage[58]. La vapeur est condensée sur le côté opposé des tubes, et le condensat de vapeur est recyclé dans la centrale électrique pour son eau d'alimentation de chaudière, comme le montre la figure 14.

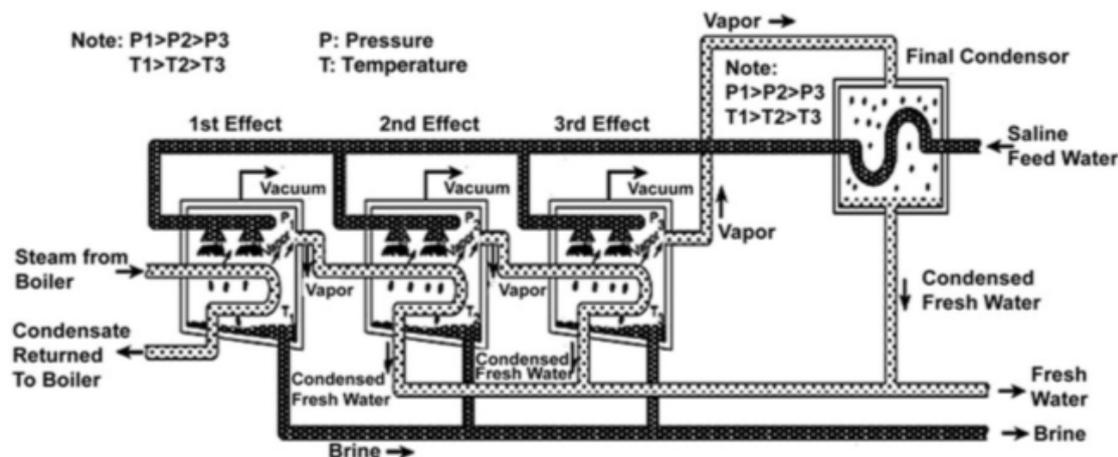


Figure 14 Système MED  
Source : Shatat et Riffat [78]

L'économie de vapeur de la centrale MED est proportionnelle au nombre d'effets. Le nombre total d'effets est limité par la plage de température totale disponible et la différence de température minimale admissible entre un effet et le suivant. Seule une partie de l'eau de mer appliquée sur les tubes du premier effet est évaporée. Le reste de l'eau d'alimentation est acheminé vers le deuxième effet, où il est à nouveau appliqué à un faisceau de tubes. Ces tubes sont à leur tour chauffés par les vapeurs créées dans le premier effet. Cette vapeur est condensée pour former le produit d'eau douce, tout en cédant de la chaleur pour évaporer une partie de l'eau de mer restante dans le prochain effet[61]. Le processus d'évaporation et de condensation se répète d'un effet à l'autre, chacun à une pression et une température successivement plus basses. Cela continue sur 4 à 21 effets et un rapport de performance entre 10 et 18 peut être atteint dans les grandes usines[78].

### 6.3.2 Avantages/Inconvénients

Le processus MED est conçu pour fonctionner à des températures plus basses d'environ 70°C. Cela minimise la corrosion des tubes et le potentiel de formation d'écailles autour des surfaces des tubes.

- La qualité de l'eau d'alimentation n'est pas aussi importante que dans la technologie du système d'osmose inverse. Par conséquent, les coûts de prétraitement et d'exploitation du système MED sont faibles.
- La consommation d'énergie du système MED est inférieure à celle de l'usine MSF.
- Le rendement des usines MED est plus élevé que celui des usines MSF ; par conséquent, le procédé MED est plus efficace que le procédé MSF en termes de transfert de chaleur et de coût de production d'eau douce.

## 6.4 Mechanical Vapor Compression (MVC)

### 6.4.1 Introduction

Le Vapor compression (VC) est un processus thermique dans lequel l'énergie de chauffage externe provient de la compression d'une partie de la vapeur produite. Les vapeurs peuvent être comprimées en utilisant soit la Thermal Vapor Compression (TVC), soit la Mechanical Vapor Compression (MVC). Les méthodes de compression de la vapeur sont généralement utilisées en parallèle avec d'autres technologies, en particulier avec le système MED. Cependant, les petites usines utilisent la VC avec un ou deux effets. L'énergie requise pour la VC est d'environ  $7,5-13 \text{ kWh/m}^3$ , soit moins que la MSF. Le coût de l'eau produite à l'aide du VC est en général supérieur à celui des MSF et des MED, car la capacité du VC est plus faible. Mais s'il est couplé avec le système MED le coût sera similaire à ce dernier.[1]. Le système MEE-MVC est censé augmenter la capacité du système. Comme on le verra plus loin, l'utilisation de cette configuration n'a pas d'effet sur la consommation électrique spécifique. La part de marché du système MEE-MVC est inférieure à 1%. En revanche, la part de marché du système MEE-TVC est plus élevée, proche de 5%. Les deux procédés présentent des caractéristiques attrayantes qui les rendent très compétitifs par rapport à d'autres procédés de dessalement bien établis, notamment le MSF et le RO.

### 6.4.2 Description du système MVC

Les figures, 15 et 16 montrent les processus MEE-P/TVC (Multiple Effect Evaporation Parallel feed Thermal Vapor Compression) et MEE-P/MVC (Multiple Effect Evaporation Parallel feed Mechanical Vapor Compression). Comme on peut le voir, les deux systèmes comprennent  $n$  effets et  $n - 1$  cases de flash. Chaque effet comprend un espace de vapeur, un demister, des tubes de condenseur/évaporateur, des buses de pulvérisation de saumure et un bassin de saumure. Dans les deux systèmes, les effets sont numérotés de 1 à  $n$  de gauche à droite (la direction du flux de chaleur). La vapeur s'écoule de gauche à droite, dans le sens de la chute de pression, tandis que l'eau de mer d'alimentation s'écoule dans la direction opposée. La vapeur comprimée est introduite dans le côté du tube dans le premier effet ; tandis que, du côté de la coque, l'eau de mer d'alimentation est pulvérisée sur les rangées supérieures des tubes. La saumure pulvérisée forme une fine pellicule qui tombe sur les rangées suivantes de l'évaporateur[90]. Dans le premier effet, le film de saumure absorbe la chaleur latente de la vapeur comprimée. Par conséquent, la température de la saumure augmente jusqu'à saturation, où l'évaporation commence et une plus petite

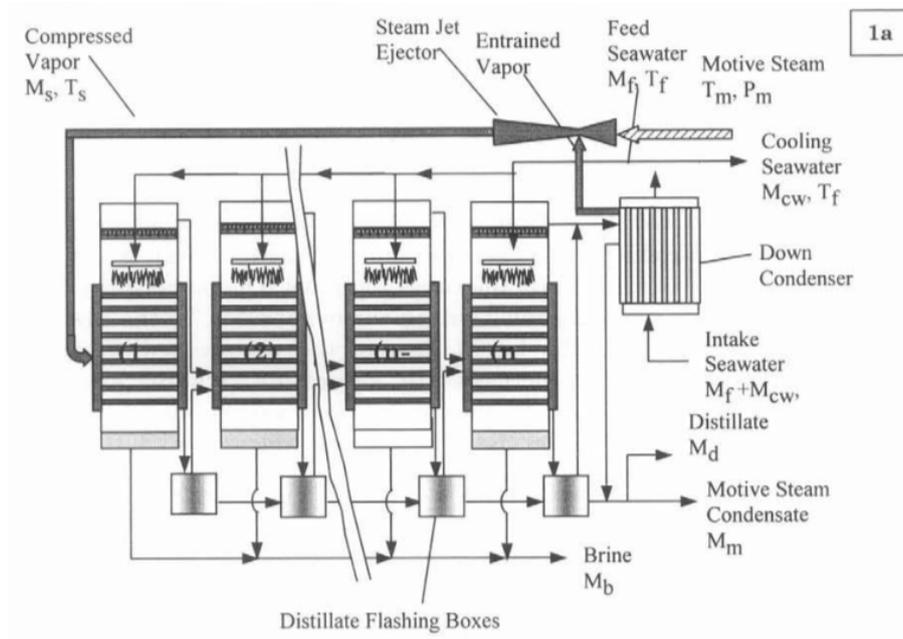


Figure 15 Système MVC  
Source : El-Dessouky et Ettouney [23]

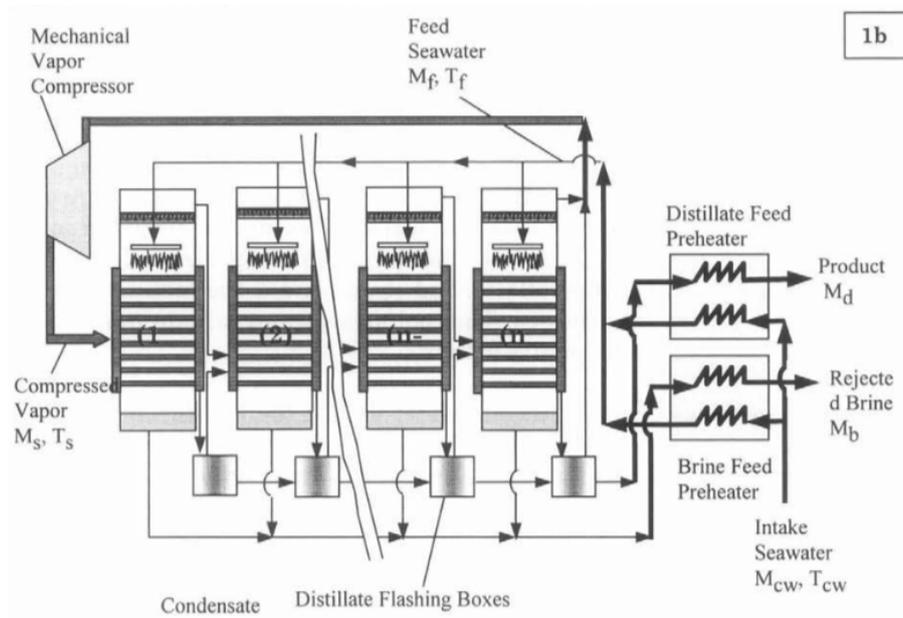


Figure 16 Système MVC  
Source : El-Dessouky et Ettouney [23]

quantité de vapeur se forme. Cette vapeur est utilisée pour chauffer le second effet, où elle se condense sur le côté du tube et libère sa chaleur latente au film de saumure qui tombe. Ce processus est répété pour tous les effets, jusqu'à l'effet  $n$ .

Dans les deux systèmes, la vapeur condensée dans les effets 2 à  $n$  est introduite dans la boîte de flash associée, où la température de la vapeur condensée est réduite par le flash d'une petite quantité de vapeur. La vapeur qui flash est acheminée vers le côté tube de l'effet suivant avec la vapeur formée par l'ébullition ou le flash dans l'effet précédent[6].

Dans le système MEE-P/TVC, la vapeur formée dans le dernier effet est introduite dans le condenseur inférieur. Une quantité contrôlée d'eau de mer d'admission est acheminée dans le côté tube du condenseur inférieur, où elle condense une partie de la vapeur formée dans le dernier effet. L'éjecteur de jet de vapeur entraîne la partie restante de la vapeur, où elle est comprimée par la vapeur motrice à la pression et à la température souhaitées. Le flux d'eau de mer chaude d'admission quittant le condenseur inférieur est divisé en deux parties ; la première est le flux d'eau de mer d'alimentation, qui est réparti entre les effets d'évaporation, et la seconde est le flux d'eau de mer de refroidissement, qui est rejeté à la mer. Le flux d'eau de mer de refroidissement élimine la chaleur ajoutée au système par la vapeur motrice[23]. Dans la section convergente de l'éjecteur à jet de vapeur, l'énergie cinétique de la vapeur motrice augmente considérablement et sa vitesse devient supersonique près du point de contraction. Par conséquent, sa pression chute à des valeurs basses et permet l'aspiration de la vapeur entraînée. Le mélange de la vapeur motrice et de la vapeur entraînée a lieu après la contraction de l'éjecteur. Dans la section divergente, la vitesse du mélange est réduite, tandis que sa pression commence à augmenter. Le processus de compression est contrôlé par la géométrie de l'éjecteur et les propriétés de la vapeur motrice.

Le système de compression mécanique de la vapeur se distingue par l'absence de condenseur et l'utilisation de préchauffeurs d'alimentation. L'élimination du condenseur inférieur est le résultat de l'acheminement de la totalité de la vapeur formée dans le dernier effet vers le compresseur mécanique de vapeur, où la vapeur est surchauffée à la température et à la pression souhaitées. À l'autre extrémité, les préchauffeurs d'alimentation récupèrent une partie de la chaleur sensible présente dans les flux de saumure et de produits distillés rejetés. Cela améliore l'efficacité thermique du système et maintient la production aux niveaux prévus, en particulier pendant le fonctionnement en hiver. La principale différence entre le MEE-P et le MEE-PC est que dans ce dernier système, l'effet de sortie de la saumure ( $i$ ) est introduit dans le pool d'effet de la saumure ( $i + 1$ ). En raison de la différence de température positive pour la saumure des effets ( $i$ ) et ( $i + 1$ ), une petite partie de la saumure d'alimentation s'évapore lorsqu'elle est introduite dans l'effet ( $i + 1$ ). Les vapeurs qui s'échappent améliorent la productivité et l'efficacité thermique du système. Dans l'ef-

fet  $(i + 1)$ , les vapeurs rejetées sont ajoutées à la vapeur formée par l'ébullition dans le même effet. Comme pour le procédé MEE-P, la saumure sortant de chaque étape est directement rejetée à la mer.[6]

### 6.4.3 Modèle du compresseur mécanique de vapeur

La consommation d'énergie spécifique du compresseur

$$Q_c = \frac{W_{\rho_d}}{3600} \quad (6.2)$$

où  $\rho_d$  est la densité du produit distillé,  $W$  est le travail spécifique réel du compresseur, qui est donné par :

$$W = H_s - H_v \quad (6.3)$$

Les enthalpies  $H_s$  et  $H_v$  sont calculées à la température de la vapeur comprimée,  $T_s$ , et la température de la vapeur formée dans le dernier effet,  $T_v$ , qui est inférieure à  $\bar{T}_{v_n}$  par la dépression de température causée par la chute de pression dans le système de demister. Le travail polytropique spécifique du compresseur est donné par :

$$\frac{W_m}{W_n} = \eta \left[ \frac{\left(\frac{P_s}{P_v}\right)^{\gamma - \frac{1}{\gamma\eta}} - 1}{\left(\frac{P_s}{P_v}\right)^{\gamma - \frac{1}{\gamma}} - 1} \right] \quad (6.4)$$

Dans l'équation 6.4, le facteur de compressibilité adiabatique est défini comme :

$$\lambda = \frac{1}{1 - (1 + X)^2 \left(\frac{ZR}{C_{pv}}\right) / Y} \quad (6.5)$$

où  $X = 0.1846(8.36)^{\frac{1}{2}} - 1.539$  et  $Y = 0.074(6.65)^{\frac{1}{2}} + 0.509$ , ASHRAE (1997). Dans l'équation 4, le facteur de compressibilité  $Z$  est égal à 1. Le travail adiabatique du compresseur,  $W_n$ , donné dans l'équation 6.4 est défini comme la différence d'enthalpie :

$$W_n = H_n - H_v \quad (6.6)$$

Dans l'équation 6.6,  $H_n$  et  $H_v$  sont calculés respectivement à  $T_n$  et  $T_{v_n}$ , où  $T_n$  est calculé à partir de la relation :

$$T_n = T_{v_n} \left( \frac{P_v}{P_n} \right)^{\lambda-1/\lambda} \quad (6.7)$$

L'enthalpie et la température de la vapeur surchauffée (ou comprimée) sont obtenues à partir des relations suivantes :

$$\eta = \frac{W_m}{H_s - H_v} \quad (6.8)$$

$$H_s = H_d + C_{p_v}(T_s - T_d) \quad (6.9)$$

où  $H_d$  et  $T_d$  sont l'enthalpie de saturation et la température de la vapeur comprimée, et  $H_s$  et  $T_s$  sont l'enthalpie de surchauffe et la température de la vapeur comprimée[15].

#### 6.4.4 Facilité d'évaporation et d'entretien

Tous les auxiliaires de l'installation (pompes, échangeurs de chaleur, ...) sont installés sur le patin supportant l'évaporateur et sont donc facilement accessibles pour la maintenance. Il faut également noter que la faible température de fonctionnement choisie pour ce procédé (inférieure à 65°C) limite l'entartrage des tubes au minimum et permet à l'installation d'atteindre ses performances garanties sans nettoyage acide des zones d'échange de chaleur.

#### 6.4.5 Fiabilité et résistance à la corrosion

Cette faible température de fonctionnement, combinée à une sélection rigoureuse des matériaux en contact avec l'eau de mer, confère à cette installation une excellente résistance à la corrosion. L'évaporateur est entièrement fabriqué en acier inoxydable, soit massif, soit revêtu, et toutes les zones d'échange de chaleur sont en titane (échangeurs de chaleur à plaques) ou en titane et en laiton d'aluminium (faisceaux de tubes)[31].

#### 6.4.6 Fonctionnement économique

Le procédé offre à la fois l'avantage d'une faible consommation d'énergie et d'un prétraitement simple et économique de l'eau de mer. L'antitartre se limite à une injection d'antitartre dans le flux d'appoint de l'eau de mer, qui est à peine supérieur à deux fois (environ

2,2 fois) la production de distillat, ce qui simplifie la conception et la construction de la prise d'eau de mer. La consommation d'additif varie entre 4 et 6 grammes par tonne de distillat et le prétraitement de l'eau de mer se limite à une filtration et une chloration conventionnelles[91].

#### 6.4.7 Avantages/Inconvénients

- La simplicité et la fiabilité du fonctionnement de la centrale en font une unité motrice pour les petites unités de dessalement. Elles sont généralement construites jusqu'à une capacité de  $3000 \text{ m}^3/\text{jour}$  et sont souvent utilisées pour les stations balnéaires, les industries et les sites de forage où des produits frais sont utilisés.
- La faible température de fonctionnement de la distillation du VC en fait un processus simple et efficace en termes d'exigence de puissance.
- Les basses températures de fonctionnement (inférieures à  $70^\circ\text{C}$ ) réduisent le potentiel de formation de tartre et de corrosion des tubes.

#### 6.4.8 Conclusion

L'analyse du système est présentée pour deux configurations de l'évaporation à effets multiples à alimentation parallèle. Chaque système est analysé pour les modes de compression thermique et mécanique de la vapeur. À la lumière de l'analyse des systèmes, les conclusions suivantes sont formulées :

- Le rapport de performance thermique pour les systèmes MEE-P/TVC et MEE-PC/TVC, surtout aux températures les plus basses de la saumure, sont plus de 50 à 100% plus élevées que le mode autonome.
- La zone spécifique de transfert de chaleur pour toutes les configurations, y compris les configurations thermiques et la compression mécanique de la vapeur, qui diminue considérablement lorsque la saumure de tête est plus élevée en raison de l'augmentation de la force motrice du transfert de chaleur.
- La consommation d'énergie spécifique du système de compression mécanique de vapeur a des valeurs similaires pour les deux systèmes, car elle dépend de la différence de température des vapeurs d'admission et comprimées ainsi que de la saumure de tête température, qui étaient toutes similaires pour les deux systèmes.
- La surface spécifique de transfert de chaleur pour le MEE-PC/MVC est inférieure à celle du MEE- Système P/MVC. Ceci est dû à l'augmentation de la quantité totale du débit de produit, qui est causée par le flashage de la saumure dans chaque effet.

## 6.5 Reverse Osmosis (RO)

### 6.5.1 Introduction

La technologie des membranes d'osmose inverse s'est développée au cours des 40 dernières années pour atteindre une part de 44% de la capacité mondiale de production de dessalement et une part de 80% du nombre total d'usines de dessalement installées dans le monde. L'utilisation du dessalement par membrane a augmenté grâce à l'amélioration des matériaux et à la diminution des coûts. Aujourd'hui, les membranes d'osmose inverse sont la technologie de pointe pour les nouvelles installations de dessalement, et elles sont appliquées à diverses ressources d'eau salée grâce à un prétraitement et à une conception de système membranaire sur mesure. Deux branches distinctes du dessalement par osmose inverse ont émergé : l'osmose inverse de l'eau de mer et l'osmose inverse de l'eau saumâtre. Les différences entre les deux sources d'eau, notamment les encrassements, la salinité, les options d'élimination de la saumure résiduelle (concentré) et l'emplacement de l'usine, ont créé des différences importantes dans le développement et la mise en œuvre des procédés, ainsi que des problèmes techniques majeurs. Les options de prétraitement sont similaires pour les deux types d'osmose inverse et dépendent des composants spécifiques de la source d'eau[29]. L'eau saumâtre et l'eau de mer par osmose inverse continueront à être utilisées dans le monde entier ; les nouvelles technologies de récupération de l'énergie et d'énergie renouvelable, ainsi que la conception innovante des usines, permettront une plus grande utilisation du dessalement pour les communautés intérieures et rurales, tout en fournissant une eau plus abordable pour les grandes villes côtières[43].

### 6.5.2 Description du système RO

L'osmose inverse est un procédé de séparation par membrane dans lequel l'eau d'une solution saline sous pression est séparée des solutés (la matière dissoute) en s'écoulant à travers une membrane. Aucun chauffage ou changement de phase n'est nécessaire pour cette séparation. La principale énergie nécessaire au dessalement est la pression de l'eau d'alimentation. En pratique, l'eau d'alimentation saline est pompée dans une cuve fermée où elle est pressurisée contre la membrane. Lorsqu'une partie de l'eau passe à travers la membrane, la teneur en sel de l'eau d'alimentation restante augmente. Dans le même temps, une partie de cette eau d'alimentation est évacuée sans passer à travers la membrane. Sans cette décharge contrôlée, l'eau d'alimentation pressurisée continuerait à augmenter en concentration de sel, créant des problèmes tels que la précipitation de sels sursaturés et une pression osmotique accrue. La quantité d'eau d'alimentation rejetée dans le flux

de saumure varie de 20% à 70% du débit d'alimentation, selon la teneur en sel de l'eau d'alimentation, la pression et le type de membrane[89]. Un système d'OI est composé des éléments de base suivants :

- Prétraitement
- Pompe à haute pression
- La membrane
- Post-traitement

### 6.5.3 Prétraitement

Le but premier de tout système de prétraitement de l'OI est de réduire l'encrassement de l'eau dans le système de membrane de l'OI. Les eaux de surface (eau de mer et eau saumâtre) ont généralement une plus grande tendance à l'encrassement des membranes et nécessitent des systèmes de prétraitement plus étendus que les ressources en eau souterraine. En général, l'OI d'eau de mer a tendance à utiliser des sources d'eau de surface, tandis que l'OI d'eau saumâtre utilise souvent des sources d'eau souterraines[11]. Une compréhension approfondie de la qualité et des caractéristiques de l'eau à dessaler, ainsi que du type de ressource en eau (par exemple, eau de surface, eau saumâtre, eau de mer et eau salée industrielle) est essentielle pour sélectionner la technologie de prétraitement appropriée avant le système d'OI. Par exemple, les eaux de surface ont une turbidité, une IDD et une NOM élevées par rapport à l'eau provenant du puits, en raison de l'effet d'adsorption et de filtration sur les réserves d'eau souterraines. De même, les eaux de puits ont une teneur élevée en silice par rapport aux eaux de surface. Les particules initialement grosses, qui peuvent être pompées du puits, sont éliminées de l'eau d'alimentation à l'aide de crépines à mailles ou de tamis mobiles. Les tamis mobiles sont plus utiles pour les sources d'eau de surface, qui présentent généralement de grandes concentrations de débris biologiques[37]. Le processus de prétraitement classique peut comprendre toutes ou certaines des étapes de traitement suivantes [53] :

- Élimination des grosses particules par un filtre grossier
- Chloration
- Clarification par flottation ou floculation
- Élimination de la dureté par traitement à la chaux
- Filtration
- Réduction de l'alcalinité par le contrôle du pH
- Inhibiteur d'échelle
- Élimination du chlore libre par le bisulfite de sodium ou le charbon actif
- Le rayonnement UV
- Élimination des particules en suspension par filtration sur cartouche

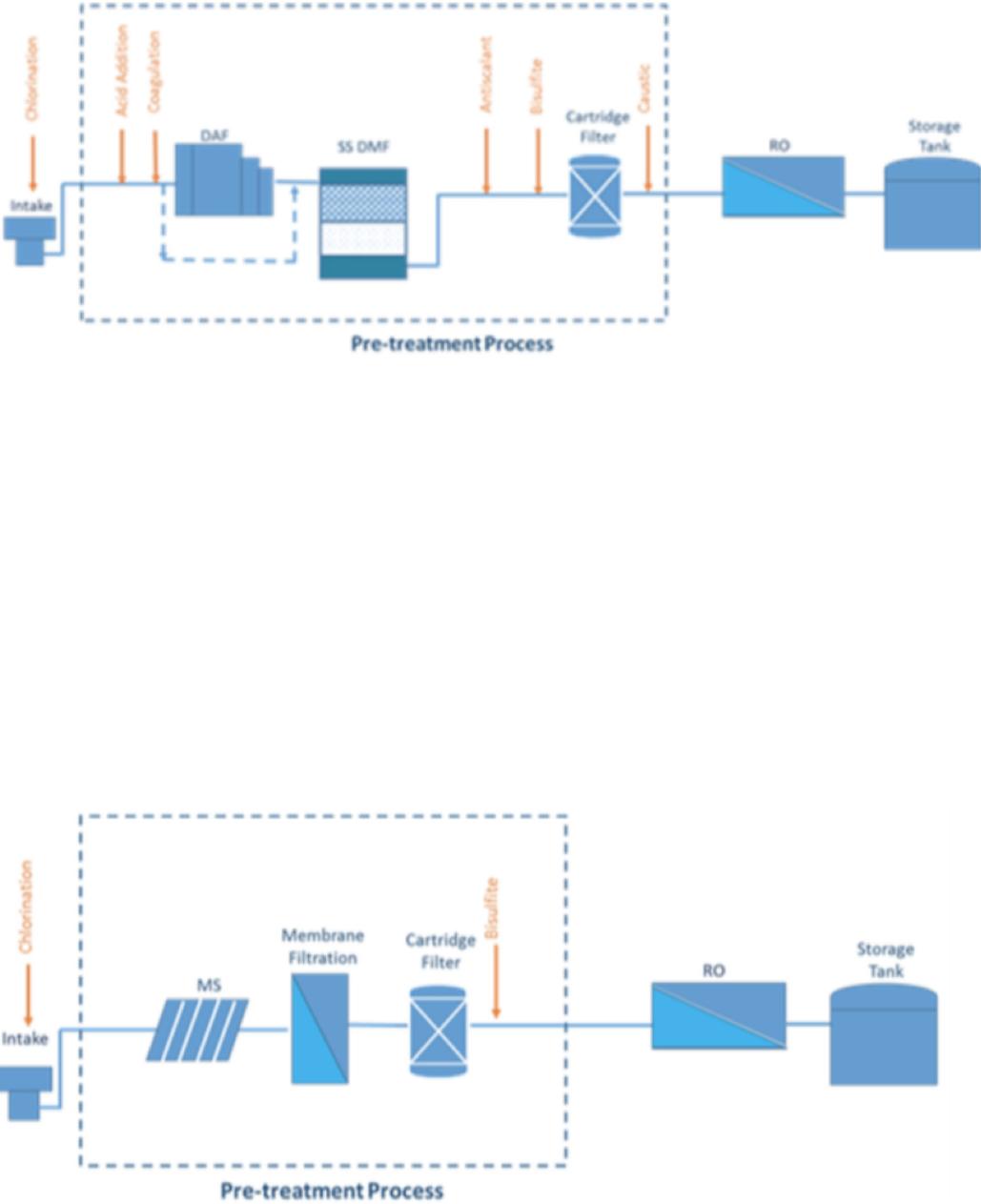


Figure 17 Exemple de membrane pour le prétraitement  
Source : Badruzzaman et al. [11]

|                                     | Microfiltration                              | Ultrafiltration                           | Nanofiltration   | Reverse Osmosis                                  |
|-------------------------------------|--|---|--|--|
| Surface pore size (nm)              | 50-10,000                                    | 1-100                                     | ~ 2  | <2   |
| Operating pressure (bar)            | 0.1-2.0                                      | 1.0-5.0                                   | 20-10  | 10-100   |
| Water permeability ( $L/m^2h/bar$ ) | >500   | 20-500                                    | 5-50   | 0.5-10   |
| MWCO (Da)                           | Not applicable                               | 1000-300 000                              | >100   | >10  |
| Targeted contaminants               | Bacteria, algae, suspended solids, turbidity | Bacteria, virus, colloids, macromolecules | Di-and multivalent ions, natural organic matter, small organic molecules | Dissolved ions, small molecules                  |
| Membrane materials                  | Polymeric, inorganic                         | Polymeric, inorganic                      | Thin-film composite polyamide, cellulose acetate, etc.                   | Thin-film composite polyamide, cellulose acetate |

Tableau 1 Typical Properties of Pressure-Driven Membranes  
Source : Wang et Wang [89]

#### 6.5.4 Pompe à haute pression

Sur les installations d'eau de mer, la pompe à haute pression est de type centrifuge, de configuration horizontale et à plusieurs étages. Le corps de la pompe peut être soit axial, soit fendu, soit radial, de type anneau segmenté. La pompe à haute pression fournit la pression nécessaire pour permettre à l'eau de passer à travers la membrane et de rejeter les sels. Cette pression varie de 15 à 25 bars (225 à 375 psi) pour l'eau saumâtre et de 54 à 80 bars (800 à 1 180 psi) pour l'eau de mer[2][55].

#### 6.5.5 Membrane

Les propriétés de base de la membrane d'osmose inverse sont résumées dans le tableau 1, ainsi que d'autres types de membranes sous pression comme la nanofiltration (NF), l'ultrafiltration (UF) et la microfiltration (MF), qui sont classées en fonction de la taille des pores ou de la plage de pression de fonctionnement.

Les membranes MF et UF sont des membranes à basse pression avec des pores relativement plus grands. Elles sont généralement adoptées dans le prétraitement des procédés d'OI/NF pour protéger les membranes d'OI/NF. Elles sont également utilisées comme support pour la fabrication des membranes d'OI et de NF TFC. Les membranes d'OI ont les

"pores" de surface les plus serrés ( $< 2$  nm de diamètre), généralement considérés comme des membranes non poreuses) et sont capables de retenir les ions dissous (y compris les ions monovalents  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) et les petites molécules organiques[53]. Les membranes d'osmose inverse peuvent être divisées en membranes d'osmose inverse d'eau de mer (SWRO) et d'eau saumâtre (BWRO). Les membranes SWRO ont un taux élevé de rejet de  $\text{NaCl}$  ( $> 99\%$ ) et sont utilisées pour le dessalement de l'eau de mer. Le compromis pour ce rejet élevé est la faible perméabilité à l'eau ( $< 1 \text{ L/m}^2\text{h/bar}$ ). Une pression élevée, supérieure à 60 bars, est généralement nécessaire en fonctionnement réel pour surmonter la pression osmotique de l'eau de mer afin de produire un flux d'eau raisonnablement élevé[89]. Les membranes BWRO ont un rejet de  $\text{NaCl}$  relativement faible ( $> 95\%$ ) et une perméabilité à l'eau plus élevée ( $1 - 10 \text{ L/m}^2\text{h/bar}$ ), et sont utilisées pour le traitement de l'eau/des eaux usées où la teneur en sel d'alimentation est beaucoup plus faible par rapport à celle de l'eau de mer[26]. Les membranes NF sont similaires aux membranes OI, mais la taille plus importante des "pores" des membranes NF par rapport aux membranes OI entraîne une perméabilité à l'eau plus élevée et un rejet beaucoup plus faible des ions monovalents (par exemple, un rejet de 10 à 90% de  $\text{Na}^+$  dépend fortement des charges de surface de la membrane)[74]. Les membranes NF peuvent éliminer efficacement les ions di- et multivalents, ce qui les rend utiles pour l'adoucissement de l'eau.

### 6.5.6 Post-traitement

Le post-traitement consiste à stabiliser l'eau et à la préparer pour sa distribution. Le post-traitement peut consister à ajuster le pH et à désinfecter l'eau. Si l'eau dessalée est combinée avec d'autres sources d'approvisionnement en eau, il est très important de garantir des caractéristiques de qualité similaires dans les deux sources d'eau[11].

### 6.5.7 La saumure

Le terme "saumure" est utilisé en dessalement pour définir le flux concentré contenant les sels et les composés extraits du système. Les caractéristiques de la saumure dépendent essentiellement de la qualité de l'eau brute et de la récupération par les usines. Pour les usines d'osmose inverse d'eau de mer, la récupération est généralement de l'ordre de 40 à 45%, ce qui signifie que la salinité de la saumure sera environ le double de celle de l'eau de mer. Dans le cas de l'eau saumâtre, si l'on considère une récupération moyenne typique de 75%, la concentration de sels dans la saumure sera multipliée par quatre[92]. La saumure des usines de dessalement d'eau de mer contient des niveaux élevés de sodium et de chlorure (comme l'eau de mer), avec d'autres ions majeurs comme le calcium, le

magnésium et les sulfates, comme le montre la figure 18, avec de légères différences selon les caractéristiques régionales de l'eau de mer et de la récupération par l'usine.

| Plant                        |       | Aguilas               | SSDP      | Mantoverde | Las Palmas III                         | Marina Baja           |
|------------------------------|-------|-----------------------|-----------|------------|--|-----------------------|
| Location                     |       | Spain (Mediterranean) | Australia | Chile      | Spain (Canary Islands, Atlantic ocean) | Spain (Mediterranean) |
| Plant type                   |       | SWRO                  | SWRO      | SWRO       | SWRO                                   | SWRO                  |
| Raw water type               |       | Seawater              | Seawater  | Seawater   | Seawater                               | Seawater              |
| <b>Brine characteristics</b> |       |                       |           |            |  |                       |
| Calcium                      | mg/L  | 790                   |           | 845        | 873                                    |                       |
| Magnesium                    | mg/L  | 2479                  |           | 2550       | 2900                                   |                       |
| Sodium                       | mg/L  | 21,921                |           | 21,070     | 23,200                                 |                       |
| Potassium                    | mg/L  | 743                   |           | 784        | 918                                    |                       |
| Ammonium                     | mg/L  |                       |           |            |  |                       |
| Barium                       | mg/L  |                       |           |            |  |                       |
| Strontium                    | mg/L  | 8.9                   |           | 15         |  |                       |
| Iron                         | mg/L  |                       |           |            |  |                       |
| Bromides                     | mg/L  |                       |           |            |  |                       |
| Chlorides                    | mg/L  | 38,886                |           | 38,014     | 43,790                                 |                       |
| Sulfates                     | mg/L  | 5316                  |           | 5342       | 5964                                   |                       |
| Nitrates                     | mg/L  | 1.8                   |           |            | 4.0                                    | 5.11                  |
| Bicarbonates                 | mg/L  | 173                   |           | 274        | 283                                    |                       |
| Carbonates                   | mg/L  | 155                   |           | 19.5       |  |                       |
| Fluoride                     | mg/L  | 2                     |           | 1.8        | 6.3                                    |                       |
| Silica                       | mg/L  | 0.5                   |           |            | 0.42                                   |                       |
| Boron                        | mg/L  | 8.7                   |           | 8.6        | 9.3                                    |                       |
| Phosphate                    | mg/L  |                       |           |            |  | <0.01                 |
| TDS                          | mg/L  | 70,488                | 63,000    | 68,967     |  | 63,580                |
| Conductivity                 | µS/cm |                       | 91,000    |            | 84,500                                 |                       |
| pH                           |       | 7.9                   | 7.8       | 7.92       | 7.8                                    | 7.88                  |

Figure 18 Caractéristique chimique de la saumure

Source : Zarzo [92]

Les saumures contiennent des composants naturels de l'eau et des additifs chimiques utilisés dans le système de traitement. En outre, les concentrés d'eau saumâtre (y compris ceux générés par les eaux usées) peuvent contenir des polluants organiques, des métaux lourds, des nutriments et d'autres composants susceptibles d'accroître la toxicité de la saumure et, par conséquent, d'avoir un impact négatif sur l'environnement[49]. En outre, le processus de dessalement peut fournir des saumures (en fonction du processus de l'usine), des additifs chimiques tels que des coagulants (généralement de l'aluminium et du chlorure ferrique), des anti-tartre (polyphosphates, phosphonates, polymaléates, etc.), du chlore, et des composés et produits dérivés du nettoyage chimique des membranes (détergents, biocides, etc.) et des stations d'épuration des eaux usées (coagulants et floculants).

Avec l'avènement des concepts de protection de l'environnement et d'économie circulaire, l'industrie du dessalement ne peut pas simplement rejeter la saumure dans l'environnement, mais elle doit également s'engager à valoriser les saumures de différentes manières, ce qui améliore en outre l'image écologique du dessalement.

La première mesure à appliquer avant d'envisager le rejet ou l'élimination des saumures est de tenter de les utiliser à l'intérieur des usines de dessalement à différentes étapes et parties du processus. L'une des principales utilisations actuelles des saumures dans

les usines de dessalement est comme source d'eau pour le lavage à contre-courant du prétraitement ; cela a été appliqué principalement pour les prétraitements conventionnels (filtration) et plus récemment pour les prétraitements par membrane MF et UF[57].

Le sel est le plus ancien condiment utilisé par l'homme depuis des milliers d'années et son importance est telle qu'il a influencé le développement humain à différentes époques avec des implications sociales, économiques et gastronomiques. Par exemple, à l'époque romaine, le sel avait une telle valeur qu'il était utilisé comme monnaie ou mode de paiement, d'où l'origine du mot "salaire".

Les saumures des usines de dessalement peuvent être une source potentielle pour l'extraction de minéraux en raison de la forte concentration de certains sels présentant un intérêt commercial. Cette application peut être une alternative à l'extraction de sel parmi celles qui existent déjà.

### 6.5.8 Coût de l'osmose inverse

Une préoccupation majeure pour les systèmes d'osmose inverse reste le coût dicté à la fois par la consommation d'énergie et le coût de remplacement des membranes. Les coûts de production d'eau peuvent être réduits en utilisant un système hybride composé de deux ou plusieurs méthodes de dessalement. Des systèmes de récupération d'énergie tels que la roue Pelton, le turbocompresseur, l'échangeur de pression et la roue Pelton Grundfos ont été développés pour convertir l'énergie présente dans la saumure des systèmes d'osmose inverse en pompes à haute pression utilisées dans le traitement de l'eau. L'installation d'un système de récupération d'énergie peut réduire la consommation d'énergie de  $6 - 8 kWh/m^3$  à  $4 - 5 kWh/m^3$ , qui peut encore être réduite à  $2 kWh/m^3$ [31]. Les paramètres de coût qui pourraient être optimisés à l'avenir comprennent l'énergie électrique, le remplacement des membranes et l'ajout de produits chimiques. Les systèmes d'automatisation peuvent contribuer à améliorer la fiabilité et la sécurité des installations, ainsi qu'à réduire l'encrassement des membranes et à mieux contrôler les défauts. L'augmentation du nombre d'unités d'osmose inverse en série et l'augmentation de la taille des unités d'osmose inverse individuelles se sont également avérées être des stratégies prometteuses. Les systèmes d'osmose inverse entraînés par des turbines à gaz/vapeur ont un coût relativement faible ( $0,43\$/m^3$ ) et les unités de saumurage peuvent augmenter la récupération de l'eau et réduire la consommation d'énergie spécifique[25].

### 6.5.9 Le futur

La recherche sur les systèmes d'OI a été intensive et plusieurs innovations sont en cours. Celles-ci comprennent l'utilisation d'un système solaire photovoltaïque pour alimenter le dessalement par osmose inverse et de nouvelles membranes avec de nouveaux types de matériaux, tels que la barrière de polyétherurée et de polyamideurée, dont on a constaté qu'ils diminuaient l'adhérence microbienne et donc le potentiel d'encrassement. Parmi les autres innovations en matière de membranes, on peut citer une matrice réticulée de polymères et de nanoparticules conçues pour attirer les ions de l'eau mais repousser presque tous les contaminants, y compris les sels dissous, les matières organiques et les bactéries. Moins d'énergie est nécessaire pour pomper l'eau à travers les membranes et, comme elles repoussent les particules qui collent habituellement à la surface, les nouvelles membranes s'encrassent plus lentement que les membranes conventionnelles[31]. Les domaines qui nécessitent des recherches plus approfondies comprennent le rejet de concentré d'OI ou de saumure, le contrôle et la réduction de l'encrassement des membranes et l'utilisation de matériaux de membrane autres que les polymères. La résistance à l'encrassement à long terme des membranes modifiées chimiquement doit être étudiée. Bien que la plupart des études disponibles fassent état d'une élimination complète dans le cas où les membranes sont utilisées comme processus de traitement tertiaire, seules quelques études sont disponibles sur la performance du traitement membranaire à grande échelle pour l'élimination des composés de perturbation endocrinienne (EDC) et des produits pharmaceutiques. Des recherches sont également nécessaires sur certains composés tels que les halogénures organiques non identifiés produits par la désinfection et leur élimination potentielle par OI, ainsi que sur le nettoyage des membranes et la résistance aux acides humiques. L'automatisation et la modélisation précise des performances des systèmes est un autre domaine de recherche, car la fiabilité est essentielle dans les usines automatisées qui sont vulnérables à la défaillance d'un ou plusieurs composants[9]. En ce qui concerne le coût, le développement de systèmes moins gourmands en énergie est une préoccupation majeure. Les méthodes et outils d'évaluation des coûts existants ne sont pas suffisamment précis et ne tiennent pas compte de tous les paramètres qui y contribuent. Les coûts directs et indirects liés au rejet de la saumure doivent également faire l'objet de recherches plus approfondies.

### 6.5.10 Avantages/Inconvénients

Les principaux avantages des installations d'osmose inverse sont les suivants :

- Faible consommation d'énergie ;
- Faible impact thermique des rejets ;

- Moins de problèmes de corrosion ;
- Taux de récupération élevé (environ 45% pour l’eau de mer) ;
- Élimination des contaminants indésirables (tels que les précurseurs de trihalométhane, les pesticides et les bactéries) ;
- L’empreinte écologique de l’usine est plus petite que celle des autres procédés de dessalement ;
- Flexible pour répondre aux fluctuations de la demande en eau.

Les principaux inconvénients des installations d’osmose inverse sont les suivants :

- Sensibilité à la qualité de l’eau d’alimentation ;
- L’encrassement de la membrane nécessite un nettoyage chimique fréquent de la membrane et une perte de productivité ;
- Plus grande complexité d’exploitation ;
- Faible pureté de l’eau de production.

## 6.6 Conclusion

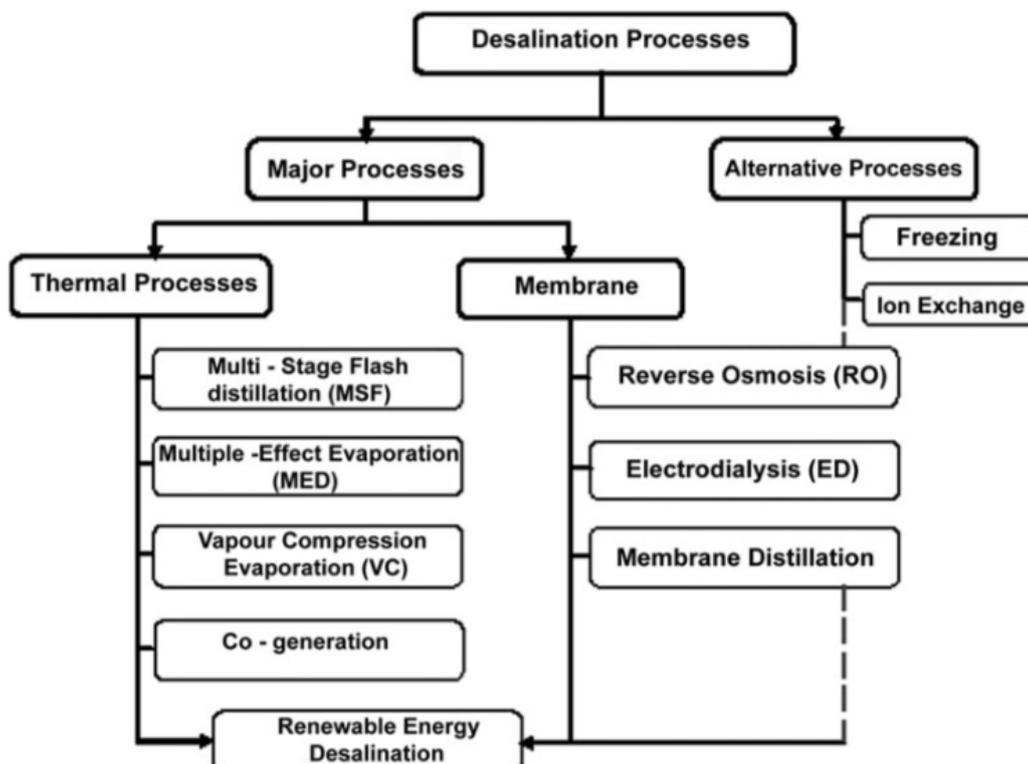


Figure 19 Classification des différentes techniques de dessalinisation  
 Source : Shatat et Riffat [78]

Au cours des dernières années, les procédés de dessalement par membrane ont connu

| Process | Thermal consumption ( $MJ/m^3$ ) | Equivalent electrical of thermal consumption ( $kWh/m^3$ ) | Electrical consumption ( $kWh/m^3$ ) | Total consumption ( $kWh/m^3$ ) | Product water quality | Product water cost |
|---------|----------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------|
| MSF     | 190–282                          | 15.83–23.5   | 2.5–5                                | 19.58–27.25                     | ~ 10                  | 0.56–1.75          |
| MED     | 145–230                          | 12.2–19.1  | 2–2.5                                | 14.45–21.35                     | ~ 10                  | 0.52–1.5           |
| MVC     | none                             | none   | 7–12                                 | 7–12                            | ~ 10                  | 2.0–2.6            |
| RO      | none                             | none   | 4–6                                  | 4–6                             | 400–500               | 0.45–1.72          |

Tableau 2 Aperçu des principaux procédés de dessalement  
Source : Al-Karaghoul et Kazmerski [38]

des développements considérables, notamment en termes de récupération d'énergie et de méthodes de prétraitement, ce qui les a rendus compétitifs par rapport aux procédés thermiques. Le choix de la technologie que nous utiliserons dépendra de beaucoup de paramètres. Toutefois en vue des nombreuses recherches qui sont actuellement en cours sur la technologie de l'osmose inverse et de l'énergie nécessaire pour la production d' $1m^3$  d'eau comparé aux autres technologies nous nous tournerons sûrement vers l'osmose inverse.

L'utilisation des énergies renouvelables pour le dessalement devient une alternative réelle et techniquement mature à la situation énergétique émergente et stressante et une solution durable à la pénurie d'eau. Actuellement, le couplage des usines de dessalement avec des ressources énergétiques propres et respectueuses de l'environnement est une question urgente en raison de l'augmentation spectaculaire du prix des combustibles fossiles et des effets néfastes de leur combustion.

# Chapitre 7

## Sources d'énergie

En 2008, 10% de l'électricité produite dans le monde provenait de sources d'énergie renouvelable telles que l'hydroélectricité, la biomasse, le solaire, l'énergie éolienne et bien d'autres encore. Une étude américaine prévoit que d'ici 2035, 14% de la consommation totale mondiale d'énergie sera produite grâce à des énergies renouvelables.

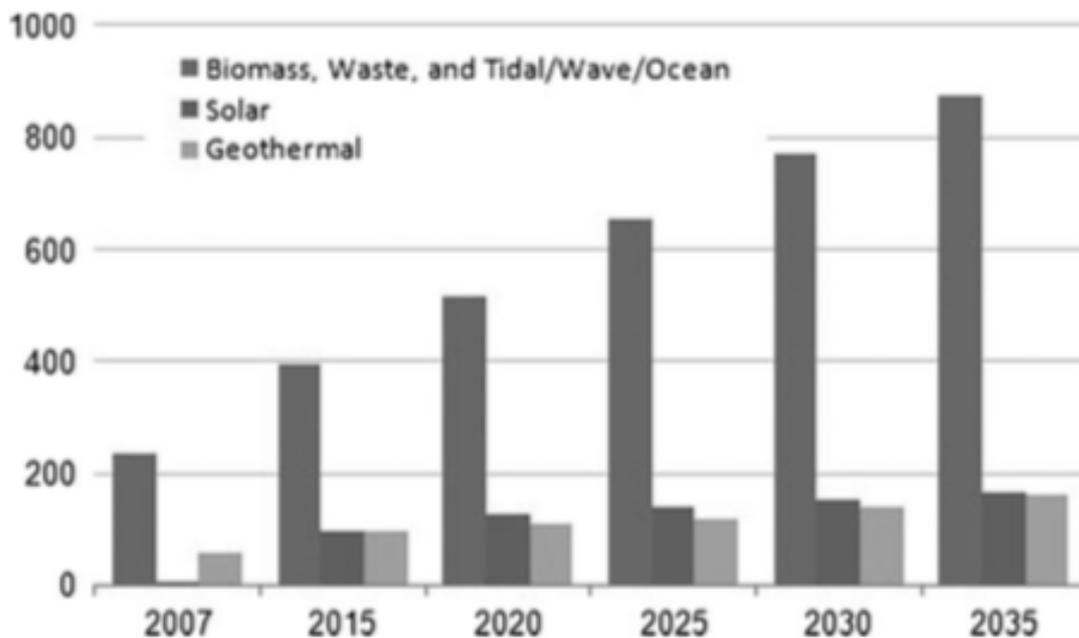


Figure 20 Prévision de la production mondiale d'électricité renouvelable  
Source : Shatat et Riffat [78]

L'utilisation d'une ou plusieurs énergies renouvelables pour notre usine de dessalement permettrait non seulement de réduire la pollution atmosphérique et donc de contribuer à notre échelle au problème du changement climatique mais également de réduire les coûts de production et donc de vendre, en particulier aux pays en stress hydrique, de l'eau

bon marché. En effet le coût des systèmes de dessalement et des énergies renouvelables ne cesse de diminuer, tandis que le prix des combustibles fossiles augmente et que les réserves s'épuisent. Certaines de ces options sont explorées dans ce chapitre, en se concentrant sur le coût d'approvisionnement du dessalement. Il est important de noter que si ces options ne sont pas conçues comme une solution miracle pour résoudre complètement la question du coût, le dessalement est passé d'un coût exorbitant à un coût simplement élevé[78].

L'énergie a un coût important dans l'exploitation d'une usine de dessalement. Il y a deux façons de réduire les coûts énergétiques, à savoir :

1. En augmentant l'efficacité énergétique du processus de dessalement.
2. En utilisant une source d'énergie moins coûteuse comme les énergies renouvelables.

L'efficacité énergétique peut être en partie résolue par une construction de qualité et avec une maintenance efficace, régulière et avec un personnel compétent. Mais dans cette partie nous nous concentrerons surtout sur le deuxième point : les énergies renouvelables.

## 7.1 L'énergie solaire

Une des énergies sujette à de nombreuses recherches est l'énergie solaire. Les régions telles que l'Afrique ou l'Amérique du Sud sont riches en énergie solaire et reçoivent en moyenne plus de  $4KWh/m^2/jour$  (équivalent électrique) d'énergie solaire, avec très peu de jours nuageux. L'énergie solaire pouvant être exploitée est donc abondante et la recherche et le développement faits dans ce domaine sont prometteurs. Ces recherches sont essentiellement faites pour des usines terrestres mais l'adaptation sur des navires ne devrait pas poser particulièrement de problèmes, voir même l'efficacité devrait être bien supérieure grâce à la réflexion du soleil sur l'eau[54]. On peut distinguer deux types d'énergie solaire : l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire thermique. L'énergie solaire PV est principalement développée pour les installations d'osmose inverse mais peut également fournir une partie de l'électricité dont ont besoin les installations thermiques. Le problème est que le photovoltaïque solaire est actuellement très coûteux et ne concurrence pas les autres formes de production d'électricité.

L'énergie solaire thermique est créée en concentrant ou en collectant les rayonnements solaires et en générant de la chaleur. Cette énergie thermique est ensuite utilisée pour produire de l'énergie électrique capable d'alimenter une usine de dessalement. Généralement, le solaire thermique prend la forme d'un collecteur qui concentre les rayons solaires sur un milieu liquide, généralement de l'huile, de l'eau ou du sel fondu, créant ainsi un fluide chaud. Pour le dessalement, ce fluide chaud peut être utilisé pour fournir l'énergie thermique directe nécessaire aux centrales thermiques, à savoir, MED ou MSF, ou peut être

utilisé pour créer de la vapeur pour générer de l'électricité. Pour les besoins en énergie thermique directe, le milieu liquide utilisé est souvent de l'huile ou de l'eau, tandis que pour la production d'électricité, le sel fondu est souvent utilisé en raison de son profil de température plus élevé. Une partie de l'énergie thermique créée pendant la journée peut être stockée afin de pouvoir continuer à fournir de l'énergie pendant la nuit[5]. Les sources d'énergie traditionnelles peuvent également être utilisées pour compléter l'énergie solaire thermique afin d'assurer une production d'énergie continue.

Actuellement, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique ne permettent pas de réaliser des économies par rapport aux sources de combustibles traditionnels pour le dessalement[69]. L'énergie solaire est utilisée uniquement à des fins de recherche ou pour des utilisations de niche, par exemple dans des régions éloignées non reliées au réseau électrique ou à une micro-échelle pour les utilisateurs qui n'ont pas accès à d'autres sources d'eau.

## 7.2 L'énergie éolienne

Si l'énergie éolienne peut fournir de l'électricité pour une usine de dessalement, elle ne peut pas fournir directement de l'énergie thermique. Par conséquent, l'avenir de l'énergie éolienne pour le dessalement consiste à fournir de l'énergie électrique aux usines utilisant l'osmose inverse. Par conséquent, l'énergie éolienne pour le dessalement repose principalement sur la réduction du coût du vent par kWh, ce qui la met en concurrence avec d'autres méthodes de production d'électricité. L'énergie éolienne devient de plus en plus compétitive par rapport aux sources d'énergie électrique conventionnelles, en particulier dans les régions venteuses. En général, l'énergie éolienne est compétitive dans les zones où la vitesse du vent est d'au moins 6 m/s. Ce qui est facilement le cas sur les côtes et encore plus en mer. Toutefois la place disponible à bord étant très limitée cette énergie ne peut être qu'un complément d'énergie. Mais on peut imaginer des genres de foils avec des turbines installées sous le navire et qui permettraient de produire de l'énergie marémotrice ou bien grâce aux courants[60].

## 7.3 L'énergie nucléaire

Selon moi l'énergie nucléaire est le futur pour la production d'électricité une fois que le problème de l'élimination des déchets nucléaires sera résolu. Malheureusement beaucoup trop peu de recherches sont réalisées dans ce domaine.

Le dessalement nucléaire est réalisé par une unité de cogénération qui couple une usine de dessalement avec un réacteur nucléaire utilisé comme source d'énergie. Les réacteurs nucléaires peuvent être couplés à des centrales thermiques pour fournir la vapeur nécessaire au processus de dessalement, ou à des centrales à membrane pour produire l'électricité nécessaire au processus de dessalement. En général, les réacteurs de petite ou moyenne taille sont les mieux adaptés au dessalement lorsque le réacteur est utilisé uniquement à des fins de dessalement. De plus le dessalement nucléaire ne produit pas de gaz à effet de serre, ce qui constitue un avantage majeur.

L'énergie nucléaire a connu un regain d'intérêt car les préoccupations liées au changement climatique et à l'interruption des approvisionnements en combustibles fossiles ont conduit à la construction de nouvelles centrales dans le monde entier. Aux États-Unis, la construction de centrales nucléaires est envisagée de manière réaliste pour la première fois en 1979. Le regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire s'accompagne de nouvelles conceptions de centrales standardisées qui pourraient théoriquement réduire le coût de l'énergie nucléaire. Au fur et à mesure que l'expérience pratique en matière de construction augmentera, le coût de la mise en service des centrales nucléaires et, par extension, des installations de dessalement nucléaire diminuera. Bien que les coûts estimés varient, en général, l'énergie nucléaire est considérée comme étant compétitive par rapport aux sources de combustibles fossiles lorsque les subventions et le coût d'opportunité sont pris en compte[39].

Le coût du dessalement nucléaire est basé sur le coût de l'énergie nucléaire. Par conséquent, des paramètres spécifiques au site tels que les coûts de construction, le prix du combustible et les taux d'intérêt déterminent si le dessalement nucléaire est une alternative économique. Aujourd'hui très peu de pays possèdent des navires civils à propulsions nucléaire aussi il y a peu de chance pour qu'un navire de dessalement produisant de l'énergie nucléaire voit le jour. La construction d'un tel navire serait beaucoup trop complexe et donc beaucoup trop onéreux. Il faudrait également former un équipage capable de réaliser une maintenance sur une centrale nucléaire.

# Chapitre 8

## Les défis

Comme tout projet, le notre comporte bien sur des obstacles à surmonter. Et ceux-ci sont multiples.

### 8.1 Financiers

En premier lieu il y a la partie budget. Pour cela je me base sur le lancement de la compagnie Ocean Fresh Water Ships qui a un projet très proche du notre, et qui a eu beaucoup de mal à trouver les fonds nécessaires pour lancer son entreprise. Il leur a dû falloir compter sur des donations privées. Les investisseurs sont toujours réticents à financer un nouveau concept qui n'a pas encore fait ses preuves. Pour les rassurer notre dossier devra être suffisamment claire et précis et aborder tous les points susceptibles d'être soulevés. Et comme tout investisseur attend des bénéfices, une étude de marché approfondie devra être effectuée dans les régions où nous souhaiterons nous implanter. Il faudra également fixer un prix pour l'eau afin d'éviter toute dérive. Vu la situation actuelle avec le réchauffement climatique, la demande sera de plus en plus forte et je suis convaincu que de nombreuses compagnies vont se créer dans l'optique de récupérer cette part du marché encore inexploités.

### 8.2 Trouver un navire adapté

En particulier au tout début de notre projet les fonds seront limités et donc notre choix de navire le sera également. L'idéal serait un ancien pétrolier aussi récent que possible possédant un moteur en bon état suffisamment puissant pour faire fonctionner notre

centrale de dessalement embarqué. Plusieurs sites internet proposent des annonces de navires marchand à vendre, mais pour espérer avoir le meilleur vecteur l'idéal serait de passer par du bouche à oreille et surtout surveiller les compagnies qui souhaite renouveler ou tout simplement se séparer d'un de leurs navires. Il faudra ensuite trouver un chantier naval bon marché pour la transformation et l'installation de l'usine. En plus d'être très couteuse cette partie du projet risque de prendre beaucoup de délais.

### 8.3 Formation de l'équipage

En école de marine marchande plusieurs cours sont consacrés à toutes les machines auxiliaires présentes à bord y compris les systèmes de dessalinisation. Toutefois les systèmes à bord de notre navire risquent d'être plus complexes et de demander une bonne connaissance en la matière. Pour cela, nous pouvons imaginer plusieurs scénarios.

1. Mettre en place d'une formation à terre d'une durée à déterminer. Celle-ci devra être basée sur le même principe que les formations spécifiques comme celle de «Advanced Tanker Training» avec des cours théoriques suivis de cours sur simulateur et d'une remise à niveau périodique (tous les 5 ans).
2. Soit d'embarquer certains ingénieurs ayant participé à la réalisation et à la mise en place du projet qui pourraient former les nouveaux équipages en mesure eux-mêmes de former les relèves.
3. Soit, en cas de manque de moyen, embaucher uniquement des marins ayant déjà navigué sur des navires avec des gros systèmes de dessalinisation tels que ceux des cruise ship.

### 8.4 Droit international

Lors de l'élaboration de notre projet la partie juridique tiendra un rôle d'une grande importance car nous allons exploiter les eaux internationales sur de nombreuses mer et océans. Or de nombreuses règlementations existent afin de réguler le ballastage et ainsi éviter de détruire ou de détériorer l'écosystème. Dans l'idéal notre navire exploitera les eaux du pays dans lesquelles il vendra l'eau. Ce qui veut dire étudier les lois du pays pour ainsi adapter la production. Si le navire a un contrat sur le long terme avec un pays ou une ville il serait judicieux d'examiner les avantages à prendre ou non le pavillon du pays concerné.

## 8.5 Sécurité

Le stress hydrique est particulièrement présent dans des régions pauvres ou des pays en voie de développement. Or ces pays sont souvent la proie de la mafia ou de groupes armés et donc à l'insécurité. Pour pallier à cela plusieurs solutions existent :

1. Faire appel à une milice privée présente sur le navire et surveiller qu'aucun intrus ne puisse monter à bord et/ou pour surveiller les installations à terre afin d'éviter toute dégradation du matériel ou vol.
2. Demander l'appui des forces armées locales.
3. Et dans tous les cas augmenter au maximum les moyens de sécurité à bord et à terre.

Même avec tous ces dispositifs la vigilance devra être présente continuellement. L'emploi d'un personnel local permettra également d'être rapidement apprécié par la population.



# Chapitre 9

## Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition de vérifier s'il était possible de produire suffisamment d'eau potable sur un navire pour la revendre à des villes ou des pays qui en ont l'utilité, tout en respectant l'environnement et avec des coûts les plus faibles possibles.

Il a fallu dans un premier temps comprendre pourquoi certaines populations étaient en pénurie d'eau et pas d'autres et examiner la demande. Il s'agissait aussi d'étudier deux cas concrets de villes qui ont été en stress hydrique afin de mieux cerner les besoins des populations.

Il convenait ensuite de dresser un cahier des charges afin de savoir exactement quel type d'eau nous voulions produire, le navire idéal pour la production de cette eau et enfin quels étaient les avantages d'un navire de dessalinisation.

Par la comparaison entre plusieurs systèmes de dessalement nous avons pu en conclure que le système d'osmose inverse correspondait le mieux à notre projet. Les problèmes de corrosion sont nettement moins importants que dans les procédés MSF et MED. De nombreuses recherches sont effectuées en vue d'améliorer ce système ce qui a pour avantage de faire diminuer les coûts d'exploitation, du fait de l'installation d'un dispositif de récupération d'énergie ... Afin d'alimenter cette usine de dessalement nous avons également comparé plusieurs sources d'énergie qui pourraient être installées à bord. Toutefois du choix de cette source d'énergie dépendra essentiellement la région dans laquelle évoluera notre navire.

Ce mémoire nous aura permis de soulever un réel problème qui est encore trop peu pris en compte : l'inégalité de la répartition de l'eau dans le monde. Je suis conscient que ce n'est pas grâce à mon mémoire que cette inégalité va disparaître mais s'il peut faire réagir des organismes internationaux qui pourraient entreprendre des projets en vue de faire diminuer cette inégalité : mon but serait alors atteint.

Comme chacun d'entre nous le sait : l'eau, c'est la vie, c'est la santé. Je souhaiterai donc finir ce mémoire par une citation du docteur Chauvot de Beauchêne «La santé est le trésor le plus précieux et le plus facile à perdre, c'est cependant le plus mal gardé».

# Bibliographie

- [1] About Desalination Ships. url : <https://www.brighthubengineering.com/naval-architecture/76829-desalination-water-purification-ships/>.
- [2] Achilli, Andrea, Cath, Tzahi Y. et Childress, Amy E. « Power generation with pressure retarded osmosis : An experimental and theoretical investigation ». In : Journal of membrane science 343.1 (2009). Publisher : Elsevier, p. 42-52.
- [3] Agence des droits fondamentaux de l'Union européenne et Cour européenne des droits de l'homme. Manuel de droit européen en matière de non-discrimination. OCLC : 780318423. Luxembourg : Office des publications de l'Union européenne, 2011. isbn : 978-92-9192-669-5 978-92-871-9994-2.
- [4] Ahdab, Yvana D., Thiel, Gregory P., Böhlke, J.K., Stanton, Jennifer et Lienhard, John H. « Minimum energy requirements for desalination of brackish groundwater in the United States with comparison to international datasets ». In : Water Research 141 (sept. 2018), p. 387-404. issn : 00431354. doi : 10.1016/j.watres.2018.04.015. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135418302999>.
- [5] Ahmed, Mohamed H., Amin, Amr M. A. et Fath, Hassan El Banna. « Modeling of Solar Power Plant for Electricity Generation and Water Desalination ». In : Journal of Solar Energy Engineering 141.1 (1<sup>er</sup> fév. 2019), p. 011015. issn : 0199-6231, 1528-8986. doi : 10.1115/1.4041260. url : <https://asmedigitalcollection.asme.org/solarenergyengineering/article/doi/10.1115/1.4041260/457957/Modeling-of-Solar-Power-Plant-for-Electricity>.
- [6] Aly, S. E. « Vapour compression distillation using waste heat absorption systems ». In : Desalination 68.1 (1988). Publisher : Elsevier, p. 57-68.
- [7] Amiot, Hervé. L'eau au Moyen-Orient - Les clés du Moyen-Orient. url : <https://www.lesclesdumoyenorient.com/L-eau-au-Moyen-Orient.html>.

- [8] Andréassian, Vazken. « Jour zéro » : du Cap à São Paulo, les grandes villes face à la pénurie d'eau. The Conversation. Library Catalog : theconversation.com. url : <http://theconversation.com/jour-zero-du-cap-a-sao-paulo-les-grandes-villes-face-a-la-penurie-deau-94620>.
- [9] Anis, Shaheen Fatima, Hashaikeh, Raed et Hilal, Nidal. « Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends : A comprehensive review ». In : Desalination 452 (2019). Publisher : Elsevier, p. 159-195.
- [10] Aqueduct Water Risk Atlas. url : [https://wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=w\\_\\_awr\\_\\_def\\_\\_tot\\_\\_cat&lat=30&lng=-80&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=optimistic&scope=baseline&timeScale=annual&year=baseline&zoom=3](https://wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=w__awr__def__tot__cat&lat=30&lng=-80&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=optimistic&scope=baseline&timeScale=annual&year=baseline&zoom=3).
- [11] Badruzzaman, Mohammad, Voutchkov, Nikolay, Weinrich, Lauren et Jacangelo, Joseph G. « Selection of pretreatment technologies for seawater reverse osmosis plants : A review ». In : Desalination 449 (2019). Publisher : Elsevier, p. 78-91.
- [12] Bascot, Séverine. Eau potable : toujours des milliards de 'laissés pour compte'. consoGlobe. Library Catalog : [www.consoglobe.com](http://www.consoglobe.com) Section : Actu environnement. 22 mar. 2019. url : <https://www.consoglobe.com/eau-potable-un-quart-de-la-population-mondiale-ny-pas-acces-cg>.
- [13] BFMTV. Femmes, enfants et migrants sont les premières victimes du manque d'accès à l'eau potable, alerte l'ONU. BFMTV. Library Catalog : [www.bfmtv.com](http://www.bfmtv.com) Publisher : BFMTV. url : <https://www.bfmtv.com/international/femmes-enfants-et-migrants-sont-les-premieres-victimes-du-manque-d-acces-a-l-eau-potable-alerte-l-onu-1655426.html>.
- [14] Buros, O. K. The ABCs of desalting. International Desalination Association Topsfield, MA, 2000.
- [15] Chipofya, V., Kraslawski, A. et Avramenko, Y. « Evaluation of case-based design principles in the design of Soche wastewater treatment plant, Blantyre, Malawi ». In : Desalination and Water Treatment 29.1 (2011). Publisher : Taylor & Francis, p. 302-309.
- [16] Cinq chiffres à connaître pour comprendre la crise mondiale de l'eau. Library Catalog : [www.novethic.fr](http://www.novethic.fr). url : <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/>

- eau/isr-rse/cinq-chiffres-a-connaître-pour-comprendre-la-crise-mondiale-de-l-eau-147636.html.
- [17] Consommation d'eau : êtes-vous dans la moyenne belge ? Library Catalog : [www.engie.be](http://www.engie.be)  
Section : Home Solutions. 20 mar. 2019. url : <https://www.engie.be/fr/blog/solutions-pour-la-maison/consommation-eau-moyenne-belge/>.
- [18] Cyrès, Groupe. Notre combat : de l'eau potable pour tous. SOLIDARITÉS INTERNATIONAL. Library Catalog : [www.solidarites.org](http://www.solidarites.org). url : <https://www.solidarites.org/fr/eau-potable/>.
- [19] Desalination. In : Wikipedia. Page Version ID : 950450535. 12 avr. 2020. url : <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Desalination&oldid=950450535>.
- [20] Desalination of sea and brackish water | ACCIONA | Experts in designing a better planet. Library Catalog : [www.acciona.com](http://www.acciona.com). url : <https://www.acciona.com/water-treatment/desalination/>.
- [21] Desalination of Water | IntechOpen. url : <https://www.intechopen.com/books/desalination-and-water-treatment/desalination-of-water>.
- [22] El-Dessouky, Hisham T., Ettouney, Hisham M. et Al-Roumi, Yousef. « Multi-stage flash desalination : present and future outlook ». In : Chemical Engineering Journal 73.2 (1999). Publisher : Elsevier, p. 173-190.
- [23] El-Dessouky, Hisham T. et Ettouney, Hisham Mohamed. Fundamentals of salt water desalination. Elsevier, 2002.
- [24] Eau. Library Catalog : [www.who.int](http://www.who.int). url : <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
- [25] Ebrahim, S. et Abdel-Jawad, M. « Economics of seawater desalination by reverse osmosis ». In : Desalination 99.1 (nov. 1994), p. 39-55. issn : 00119164. doi : 10.1016/0011-9164(94)00118-9. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0011916494001189>.
- [26] Evans, E. W. et Glover, F. A. « SUBJECT : MEMBRANE TECHNOLOGY : BASIC PRINCIPLES OF REVERSE OSMOSIS AND ULTRAFILTRATION ». In : International Journal of Dairy Technology 27.3 (juil. 1974), p. 111-119. issn : 1364-

- 727X, 1471-0307. doi : 10.1111/j.1471-0307.1974.tb01683.x. url : <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1471-0307.1974.tb01683.x>.
- [27] Fendri, Fredg, Mitchenko, Tatyana et Maletskyi, Zakhar. « Optimization of the reverse osmosis seawater demineralization technologies for a power producing industry ». In : *Desalination and Water Treatment* 25.1 (2011). Publisher : Taylor & Francis, p. 84-90.
- [28] Floating Transfer Terminal concept promises jettyleless LNG ship-to-shore transfer. LNG Industry. Library Catalog : [www.lngindustry.com](http://www.lngindustry.com) Section : Floating LNG. 24 mar. 2017. url : <https://www.lngindustry.com/floating-lng/24032017/floating-transfer-terminal-concept-promises-jettyleless-lng-ship-to-shore-transfer/>.
- [29] Fritzmann, Clemens, Löwenberg, Jonas, Wintgens, Thomas et Melin, Thomas. « State-of-the-art of reverse osmosis desalination ». In : *Desalination* 216.1 (2007). Publisher : Elsevier, p. 1-76.
- [30] Gamme XLE. SLCE Watermakers. Library Catalog : [slce-watermakers.com](http://slce-watermakers.com) Section : Eau de mer. url : <https://slce-watermakers.com/fr/osmoseur/gamme-xlexhe/>.
- [31] Ghaffour, Noredine, Missimer, Thomas M. et Amy, Gary L. « Technical review and evaluation of the economics of water desalination : current and future challenges for better water supply sustainability ». In : *Desalination* 309 (2013). Publisher : Elsevier, p. 197-207.
- [32] Greenlee, Lauren F., Lawler, Desmond F., Freeman, Benny D., Marrot, Benoit et Moulin, Philippe. « Reverse osmosis desalination : water sources, technology, and today's challenges ». In : *Water research* 43.9 (2009). Publisher : Elsevier, p. 2317-2348.
- [33] Guoping, Su, Yun, Liu, Hongguang, Zhou, Jianli, Zhang et Xiaoze, Du. « Numerical Simulation of Plate Evaporators in Multi-effect Distillation Seawater Desalination ». In : *Energy Procedia* 61 (2014). Publisher : Elsevier, p. 1335-1338.
- [34] <https://plus.google.com/+UNESCO>. Qui sont les exclus de l'eau? UNESCO. Library Catalog : [fr.unesco.org](http://fr.unesco.org). 19 mar. 2019. url : <https://fr.unesco.org/news/qui-sont-exclus-leau>.

- [35] Incroyable ! Le pipeline offshore est posé de cette façon | WORLD IRON & ACIER. url : <http://fr.worldironsteel.com/news/amazing-the-offshore-pipeline-is-laid-this-wa-15171032.html>.
- [36] International Decade for Action 'Water for Life' 2005-2015. Focus Areas : The human right to water and sanitation. Library Catalog : [www.un.org](http://www.un.org). url : [https://www.un.org/waterforlifedecade/human\\_right\\_to\\_water.shtml](https://www.un.org/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml).
- [37] Jamaly, S., Darwish, N. N., Ahmed, I. et Hasan, S. W. « A short review on reverse osmosis pretreatment technologies ». In : *Desalination* 354 (2014). Publisher : Elsevier, p. 30-38.
- [38] Al-Karaghoul, Ali et Kazmerski, Lawrence L. « Comparisons of technical and economic performance of the main desalination processes with and without renewable energy coupling ». In : *WORLD RENEWABLE ENERGY FORUM. ASES, [SI]*, 2012, p. 13-17.
- [39] Khan, Salah Ud-Din, Khan, Shahab Ud-Din, Danish, Syed Noman, Orfi, Jamel, Rana, Usman Ali et Haider, Sajjad. « Nuclear Energy Powered Seawater Desalination ». In : *Renewable Energy Powered Desalination Handbook*. Elsevier, 2018, p. 225-264. isbn : 978-0-12-815244-7. doi : 10.1016/B978-0-12-815244-7.00006-4. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128152447000064>.
- [40] Khoshrou, I., Nasr, MR Jafari et Bakhtari, K. « New opportunities in mass and energy consumption of the Multi-Stage Flash Distillation type of brackish water desalination process ». In : *Solar Energy* 153 (2017). Publisher : Elsevier, p. 115-125.
- [41] Kiesner, Christian et Eggers, Rudolf. « Concept of a sterile concentration process for milk by multistage flash evaporation ». In : *Chemical Engineering & Technology : Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology* 17.6 (1994). Publisher : Wiley Online Library, p. 374-381.
- [42] Kotb, O.A. « Optimum numerical approach of a MSF desalination plant to be supplied by a new specific 650MW power plant located on the Red Sea in Egypt ». In : *Ain Shams Engineering Journal* 6.1 (mar. 2015), p. 257-265. issn : 20904479. doi : 10.1016/j.asej.2014.09.001. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2090447914001154>.

- [43] Krishna, Hari J. « Introduction to desalination technologies ». In : Texas water development 2 (2004).
- [44] L'accès à l'eau potable : plus de 2 milliards de personnes toujours privées de ce droit fondamental (ONU). ONU DAES | Nations Unies Département des affaires économiques et sociales. Library Catalog : [www.un.org](http://www.un.org). 19 mar. 2019. url : <https://www.un.org/development/desa/fr/news/sustainable/new-un-water-development-report.html>.
- [45] L'accès à l'eau potable dans le monde. Observatoire des inégalités. Library Catalog : [www.inegalites.fr](http://www.inegalites.fr). url : <https://www.inegalites.fr/L-acces-a-l-eau-potable-dans-le-monde>.
- [46] L'eau. Library Catalog : [www.un.org](http://www.un.org). 21 déc. 2015. url : <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/water/index.html>.
- [47] L'eau ne doit plus creuser les inégalités femmes-hommes. Library Catalog : [www.afd.fr](http://www.afd.fr). url : <https://www.afd.fr/fr/actualites/leau-ne-doit-plus-creuser-les-inegalites-femmes-hommes>.
- [48] Le stress hydrique. Eau du Maroc. Library Catalog : [www.eaudumaroc.com](http://www.eaudumaroc.com). url : <http://www.eaudumaroc.com/2019/03/le-stress-hydrique.html>.
- [49] Lee, Lai Yoke, Ng, How Yong, Ong, Say Leong, Hu, Jiang Yong, Tao, Guihe, Kekre, Kiran et al. « Ozone-biological activated carbon as a pretreatment process for reverse osmosis brine treatment and recovery ». In : Water Research 43.16 (sept. 2009), p. 3948-3955. issn : 00431354. doi : 10.1016/j.watres.2009.06.016. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135409003947>.
- [50] LOI n 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques. Library Catalog : Légifrance. 30 déc. 2006.
- [51] Madani, A. A. « Economics of desalination for three plant sizes ». In : Desalination 78.2 (1990). Publisher : Elsevier, p. 187-200.
- [52] magazine, Le Point. Les oubliés de l'eau potable. Le Point. Library Catalog : [www.lepoint.fr](http://www.lepoint.fr). 19 mar. 2019. url : [https://www.lepoint.fr/monde/les-oublies-de-l-eau-potable-19-03-2019-2302172\\_24.php](https://www.lepoint.fr/monde/les-oublies-de-l-eau-potable-19-03-2019-2302172_24.php).

- [53] Malaeb, Lilian et Ayoub, George M. « Reverse osmosis technology for water treatment : state of the art review ». In : *Desalination* 267.1 (2011). Publisher : Elsevier, p. 1-8.
- [54] Manchanda, Himanshu et Kumar, Mahesh. « Study of water desalination techniques and a review on active solar distillation methods ». In : *Environmental Progress & Sustainable Energy* 37.1 (jan. 2018), p. 444-464. issn : 19447442. doi : 10.1002/ep.12657. url : <http://doi.wiley.com/10.1002/ep.12657>.
- [55] Martinho, Alberto. « The high pressure pump train on reverse osmosis plants. Experience and current trends ». In : *Desalination* 138.1 (2001). Publisher : Elsevier, p. 219-222.
- [56] MECHALI, Marion. La question de l'eau au Moyen-Orient : paradoxes et enjeux. Les Jeunes de l'IHEDN. Library Catalog : [jeunes-ihedn.org](http://jeunes-ihedn.org) Section : Actualités. 11 oct. 2015. url : <https://jeunes-ihedn.org/la-question-de-leau-au-moyen-orient-paradoxes-et-enjeux/>.
- [57] Mericq, Jean-Pierre, Laborie, Stéphanie et Cabassud, Corinne. « Vacuum membrane distillation of seawater reverse osmosis brines ». In : *Water Research* 44.18 (oct. 2010), p. 5260-5273. issn : 00431354. doi : 10.1016/j.watres.2010.06.052. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135410004392>.
- [58] Mezher, Toufic, Fath, Hassan, Abbas, Zeina et Khaled, Arslan. « Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies ». In : *Desalination* 266.1 (2011). Publisher : Elsevier, p. 263-273.
- [59] Mockrin, S. C., Byers, L. D. et Koshland, D. E. « Subunit interactions in yeast glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase ». In : *Biochemistry* 14.25 (16 déc. 1975), p. 5428-5437. issn : 0006-2960. doi : 10.1021/bi00696a008.
- [60] Mokheimer, Esmail M.A., Sahin, Ahmet Z., Al-Sharafi, Abdullah et Ali, Ahmad I. « Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia ». In : *Energy Conversion and Management* 75 (nov. 2013), p. 86-97. issn : 01968904. doi : 10.1016/j.enconman.2013.06.002. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890413002987>.
- [61] El-Nashar, Ali M. « System design optimization of a solar desalination plant using a multi-effect stack type distillation unit ». In : *Desalination* 97.1 (1994). Publisher : Elsevier, p. 587-618.

- [62] Nationen, Vereinte, éd. Role of desalination in addressing water scarcity. ESCWA water development report 3. OCLC : 705783610. New York, NY : United Nations, 2009. 46 p. isbn : 978-92-1-128329-7.
- [63] Nikitas, Nikitakos et Afrokomi-Afroula, Stefanakou. « Design and economics of a hybrid desalination system applied to an offshore platform ». In : Review of Business and Economics Studies 1 (2014). Publisher : Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего ...
- [64] OMS | Faits et chiffres sur la qualité de l'eau et la santé. WHO. Library Catalog : [www.who.int](http://www.who.int/water_sanitation_health/facts_figures/fr/) Publisher : World Health Organization. url : [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/facts\\_figures/fr/](https://www.who.int/water_sanitation_health/facts_figures/fr/).
- [65] OMS | La santé et les services d'approvisionnement en eau de boisson salubre et d'assainissement de base. WHO. Library Catalog : [www.who.int](http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/fr/) Publisher : World Health Organization. url : [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/mdg1/fr/](https://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/fr/).
- [66] Organization, Pan American Health, éd. Environmental health management after natural disasters. Scientific publication no. 430. Washington, D.C : Pan American Health Organization, Pan American Sanitary Bureau, Regional Office of the World Health Organization, 1982. 58 p. isbn : 978-92-75-11430-8.
- [67] Parks, Robbie, McLaren, Megan, Toumi, Professor Ralf et Rivett, Professor Ulrike. « Experiences and lessons in managing water from Cape Town ». In : (), p. 21.
- [68] Parks, ROBBIE, McLaren, MEGAN, Toumi, RALF et Rivett, ULRIKE. « Experiences and lessons in managing water from Cape Town ». In : London, England (2019).
- [69] Pugsley, Adrian, Zacharopoulos, Aggelos, Mondol, Jayanta D. et Smyth, Mervyn. « Solar Desalination Potential Around the World ». In : Renewable Energy Powered Desalination Handbook. Elsevier, 2018, p. 47-90. isbn : 978-0-12-815244-7. doi : 10.1016/B978-0-12-815244-7.00002-7. url : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128152447000027>.
- [70] Quelle est la consommation d'eau moyenne par ménage ? Centre d'Information sur l'eau. Library Catalog : [www.cieau.com](http://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/quels-sont-les-usages-domestiques-de-leau/). url : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/quels-sont-les-usages-domestiques-de-leau/>.

- [71] Quero, Yann. ONU et stress hydrique : des statistiques ubuesques. Club de Mediapart. Library Catalog : [blogs.mediapart.fr](https://blogs.mediapart.fr). url : <https://blogs.mediapart.fr/yann-quiero/blog/161016/onu-et-stress-hydrique-des-statistiques-ubuesques>.
- [72] Quilleret, Célia. Plus de deux milliards de personnes sans eau potable dans le monde : le constat alarmant de l'ONU. Library Catalog : [www.franceinter.fr](http://www.franceinter.fr) Section : Environnement. 19 mar. 2019. url : <https://www.franceinter.fr/environnement/plus-de-deux-milliards-de-personnes-sans-eau-potable-dans-le-monde-le-constat-alarmant-de-l-onu>.
- [73] Ritter, Kayla. São Paulo Heading To Another Dry Spell. Circle of Blue. Library Catalog : [www.circleofblue.org](http://www.circleofblue.org) Section : Cities. 7 mar. 2018. url : <https://www.circleofblue.org/2018/water-climate/drought/sao-paulo-heading-to-another-dry-spell/>.
- [74] Samodurov, A. N., Lysenko, S. E., Gromov, S. L., Panteleev, A. A. et Fedosseva, E. B. « The use of reverse osmosis technology for water treatment in power engineering ». In : Thermal engineering 53.6 (2006). Publisher : Springer, p. 439-443.
- [75] Santé, Ministère des Solidarités et de la et Santé, Ministère des Solidarités et de la. Qualité de l'eau potable. Ministère des Solidarités et de la Santé. Library Catalog : [solidarites-sante.gouv.fr](http://solidarites-sante.gouv.fr). 21 avr. 2020. url : <http://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/eau>.
- [76] Sao Paulo Faces Severe Water Shortage - Circle of Blue. url : <https://www.circleofblue.org/2014/world/sao-paulo-faces-severe-water-shortage/>.
- [77] Sarka-SPIP, Collectif. Le « droit à l'eau », menacé aux États-Unis? Partage des eaux. Library Catalog : [www.partagedeseaux.info](http://www.partagedeseaux.info). url : <https://www.partagedeseaux.info/Le-droit-a-l-eau-menace-aux-Etats-Unis>.
- [78] Shatat, Mahmoud et Riffat, Saffa B. « Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources ». In : International Journal of Low-Carbon Technologies 9.1 (2014). Publisher : Oxford University Press, p. 1-19.
- [79] Stauffer, Caroline. Drought ends in Brazil's Sao Paulo but future still uncertain - Reuters. url : <https://www.reuters.com/article/us-brazil-water/drought-ends-in-brazils-sao-paulo-but-future-still-uncertain-idUSKCN0VR1YJ>.

- [80] Strathmann, Heiner. « Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications ». In : *Desalination* 264.3 (2010). Publisher : Elsevier, p. 268-288.
- [81] Stuart, Elizabeth et Woodroffe, Jessica. « Leaving no-one behind : can the Sustainable Development Goals succeed where the Millennium Development Goals lacked ? » In : *Gender & Development* 24.1 (2 jan. 2016). Publisher : Routledge  
\_eprint : <https://doi.org/10.1080/13552074.2016.1142206>, p. 69-81. issn : 1355-2074. doi : 10.1080/13552074.2016.1142206. url : <https://doi.org/10.1080/13552074.2016.1142206>.
- [82] « The 11 cities most likely to run out of drinking water ». In : *BBC News* (11 fév. 2018). url : <https://www.bbc.com/news/world-42982959>.
- [83] The United Nations world water development report 2019 : leaving no one behind, executive summary - UNESCO Digital Library. url : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367303?posInSet=4&queryId=b841c8c1-37a3-4922-a277-8612c3008d84>.
- [84] The United Nations world water development report 2019 : leaving no one behind, facts and figures - UNESCO Digital Library. url : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276?posInSet=6&queryId=b841c8c1-37a3-4922-a277-8612c3008d84>.
- [85] Timbert, Aline. Argentine : Les indigènes victimes de discrimination et de marginalisation selon l'ONU. *Actu Latino*. Library Catalog : [www.actulatio.com](http://www.actulatio.com) Section : Argentine. 26 mai 2016. url : <https://www.actulatio.com/2016/05/26/argentine-les-indigenes-victimes-de-discrimination-et-de-marginalisation-selon-l-onu/>.
- [86] Unesco, World Water Assessment Programme (United Nations) et UN-Water. *Leaving no one behind : the United Nations World Water Development Report 2019*. OCLC : 1121476686. 2019. isbn : 978-92-3-100309-7.
- [87] USA : discrimination dans l'accessibilité à l'eau et l'assainissement, selon un expert. *ONU Info*. Library Catalog : [news.un.org](http://news.un.org). 4 mar. 2011. url : <https://news.un.org/fr/story/2011/03/210822-usa-discrimination-dans-laccessibilite-leau-et-lassainissement-selon-un-expert>.
- [88] Vanoppen, Marjolein, Blandin, Gaétan, Derese, Sebastiaan, Le Clech, Pierre, Post, Jan et Verliefde, A. R. D. « Salinity gradient power and desalination ». In : *Sustainable energy from salinity gradients*. Elsevier, 2016, p. 281-313.

- 
- [89] Wang, Yi-Ning et Wang, Rong. « Reverse Osmosis Membrane Separation Technology ». In : Membrane separation principles and applications. Elsevier, 2019, p. 1-45.
- [90] Wangnick, Klaus. « Selection of small desalination plants for specific locations—reverse osmosis, flash distillation, vapour compression ». In : Desalination 52.2 (1985). Publisher : Elsevier, p. 145-165.
- [91] Weinberg, J. et Fisher, U. « Present and future energy aspects in VC, MED single and dual purpose desalination plants ». In : Desalination 40.1 (1982). Publisher : Elsevier, p. 49-61.
- [92] Zarzo, Domingo. « Beneficial uses and valorization of reverse osmosis brines ». In : Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook. Elsevier, 2018, p. 365-397.