



Gestion Intégrée Durable de l'Eau – Mécanisme de Soutien (SWIM - SM)

Projet financé par l'Union européenne

Version RÉVISÉE du Rapport final
**Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le
dessalement en zones rurales/locales**

Version	Titre du document	Auteur	Révision et validation
2	Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales	Dr Adil Bushnak	Hosny Khordagui, Stavros Damianidis et Vangelis Konstantianos

Table des matières

Synthèse	8
1. Introduction	10
2. Aperçu des MTD pour le dessalement en zones rurales et description des technologies d'énergie renouvelable pour le dessalement.....	11
2.1 Description des technologies de dessalement disponibles, avantages et faiblesses d'une utilisation en zone rurale :	11
2.1.1 Distillation multflash (MSF)	11
2.1.2 Distillation multi-effets (DME)	13
2.1.3 Distillation par compression de vapeur	15
2.1.4 Osmose inverse	16
2.1.5 Électrodialyse	19
2.1.6 L'électrodialyse par métathèse (EDM)	20
2.1.7 Distillation membranaire (DM)	21
2.1.8 Dessalement Thermo-Ionique™ (Saltworks Technologies Inc.).....	23
2.1.9 Osmose directe (OD - FO Forward Osmosis).....	25
2.1.10 Distillateurs solaires	27
2.1.11 Humidification/Déshumidification (HD).....	28
2.2 Description des technologies à énergie renouvelable pour les MTD de dessalement	33
2.2.1 Énergie solaire.....	33
2.2.2 Énergie éolienne	33
2.2.3 Géothermie	34
2.2.4 Disponibilité de chaleur résiduelle.....	35
2.3 Procédés/Combinaisons de ressources ER	35
2.3.1 Capteur solaire-DME	35
2.3.2 Capteur solaire-HD.....	36
2.3.3 Capteur solaire-DM.....	37
2.3.4 PV-OI	38
2.3.5 PV-ED.....	39
2.3.6 Vent-OI	40
2.3.7 Vent-MVC.....	40
2.3.8 Géothermie DME	40
2.3.9 Géothermie HD et autres procédés thermiques.....	40

3. Décisions, données et informations avant d'envisager les technologies de mise en œuvre d'un projet de dessalement.	41
3.1 Plan de gestion intégrée des ressources en eau ou étude diagnostique	41
3.2 Capacités des installations de dessalement	42
3.2.1 Définitions	42
3.2.2 Capacité de l'installation de dessalement.....	42
3.3. Qualité de l'eau dessalée	43
3.4 Considérations démographiques et socioculturelles	43
3.5 Questions culturelles, religieuses et égalité des sexes :.....	44
3.6 Qualité et disponibilité des ressources en eau brute	44
3.7 Lieu de rejet de la saumure	44
3.8 Structures de prix et schémas financiers (faisabilité).....	45
3.9 Facteurs institutionnels et de contrôle.....	45
3.9.1 Facteurs institutionnels.....	45
3.9.2 Facteurs de réglementation.....	46
3.10 Projets de dessalement.....	47
3.11 Sélection du site de l'installation de dessalement	48
3.12 Coûts budgétaires et de mise en œuvre comprenant le coût total de l'eau.....	49
4. Lignes directrices pour le filtrage et l'évaluation des options MTD de dessalement destinées en priorité aux zones rurales.....	51
4.1 Évaluation des ressources en eau disponibles et des caractéristiques de la demande	51
4.2 Évaluation des sources d'énergie renouvelable disponibles et raccordement au réseau .	51
4.3 Liste de sélection des procédés de dessalement basée sur les SER disponibles.....	52
4.4 Maîtrise et niveau de déploiement des procédés	52
4.5 Besoins en prétraitement	53
4.6 Niveau de compétences requis.....	54
4.7 Options de stockage de l'énergie contre stockage de l'eau	55
4.8 Évacuation de la saumure	55
4.8.1 Méthodes d'évacuation de la saumure et comparaison.....	55
4.8.2 Généralités sur le rejet de saumure.....	60
4.9. Autres caractéristiques pratiques du site	61

4.10 Coûts d'investissement et de fonctionnement de la solution proposée (Voir aussi point 3.12)	61
5. Modalités pour l'évaluation des besoins des communautés	61
5.1 Considérations géographiques	61
5.2 Le facteur humain : considérations démographiques et socioculturelles.....	62
Questions culturelles, religieuses et égalité des sexes :	63
Renforcement des Capacités	64
5.3 Disponibilité des ressources en eau	64
5.4 Structures de prix et schémas financiers.....	65
5.5 Facteurs institutionnels et de contrôle.....	66
5.6 Lignes directrices supplémentaires pour le contrôle et l'évaluation des MTD de dessalement utilisant les SER.....	66
6. Recommandation pour l'intégration dans les plans GIRE nationaux.....	68
BIBLIOGRAPHIE	72

Liste des abréviations

SAD	Système autonome de dessalement
DMAG	Distillation membranaire air gap (AGMD)
MTD	Meilleure technologie disponible
CAET	Construction-appropriation-exploitation-transfert (BOOT)
CET	Construction-exploitation-transfert (BOT)
CDE	Experts en dessalement
GRD	Groupe restreint sur le dessalement
ESC	Énergie solaire à concentration (CSP)
CC	Courant continu
DMD	Distillation membranaire directe (DCMD)
DES	Dessalement
CE	Commission européenne
ED	Électrodialyse
EDM	Électrodialyse par métathèse
EDR	Électrodialyse réversible
EIE	Étude d'impact sur l'environnement
PPE	Plan de protection de l'environnement
UE	Union européenne
PF	Points focaux
RGO	Ratio de gain opérationnel (GOR)
GWP	Partenariat mondial pour l'eau
HAWT	Éolienne à axe horizontal
HD	Humidification-Déshumidification
TI	Technologie de l'information
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau

KSA Royaume d'Arabie saoudite

LLNL Laboratoire national de Lawrence Livermore

PAM Plan d'action pour la Méditerranée

DM Distillation membranaire

MECO Mechanical Equipment Company

DME Distillation multi-effets (MED)

MED-POL Programme pour l'évaluation et la maîtrise de la pollution marine dans la Région Méditerranéenne

MES Distillation à empilement vertical

MSF Distillation multiflash

MVC Compression de vapeur mécanique

NF Nanofiltration

ONG Organisation non gouvernementale

PP Pays participants

PPP Partenariat public-privé

PR Performance Ratio

PV Photovoltaïque

RBO Organisme de bassin

SER Source d'énergie renouvelable

OI Osmose inverse (RO)

SGMD Distillation membranaire à entraînement gazeux

PSM Pays du sud de la Méditerranée

GIDE Gestion Intégrée Durable de l'Eau

SWIM-SM Gestion Intégrée Durable de l'Eau – Mécanisme de Soutien

SWRO Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse

TSD Total des solides dissous (TDS)

TL Chef d'équipe

TVC Compression de vapeur thermique

TBT Température maximale de la saumure

PNUE Programme des Nations Unies pour l'Environnement

VAWT Éolienne à axe vertical

DMV Distillation membranaire sous vide (VMD)

VSEP Application d'intenses ondes vibratoires au niveau de la surface membranaire

WESCO Water and Environmental Services Co.

MT Module de travail (WP)

Synthèse

Les pays du Sud méditerranéen sont confrontés à une pénurie d'eau croissante. Cette pénurie induit la nécessité d'augmenter l'alimentation traditionnelle en eau via des sources alternatives. Les régions rurales et isolées sont particulièrement désavantagées car elles sont souvent situées loin des systèmes municipaux d'alimentation en eau et des sources conventionnelles, et souvent, elles ne sont pas reliées au réseau d'électricité.

Il existe des possibilités d'aborder le problème de la pénurie d'eau en zones rurales et isolées grâce à des technologies durables de dessalement de l'eau salée. Le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre est une industrie bien établie composée d'une large gamme de technologies disponibles avec une expérience de dizaines d'années.

Les zones rurales et isolées ont des besoins spécifiques qui influent sur le choix de technologies appropriées. Cela comprend des besoins techniques liés à une application à petite échelle utilisant des sources d'énergies renouvelables de fonctionnement et de maintenance faciles, et à la conception simple ; les besoins sont déterminés par la situation géographique ; les besoins socioéconomiques et socioculturels sont liés aux communautés qui souhaitent exploiter et bénéficier de cette technologie. La mise en œuvre réussie et la viabilité à long terme (viabilité environnementale et opérationnelle) des projets de dessalement pour les zones rurales et reculées nécessitent que tous les besoins soient identifiés et abordés dès les premières phases du projet.

Le présent rapport présente un examen des meilleures technologies disponibles (MTD) pour le dessalement en zones rurales, idéales pour les pays participants (PP) SWIM-SM. Son objectif concerne exclusivement les technologies renouvelables de dessalement. L'eau de mer et l'eau saumâtre sont prises en compte.

Le rapport débute par un résumé et une description des technologies de dessalement, tant celles disponibles actuellement que celles qui le seront à l'avenir. L'objectif de la discussion concerne la pertinence de l'application dans les zones rurales et reculées. Voir résumé dans le Tableau 1 page 31. Ensuite sont présentés un bref résumé des principales technologies d'énergie renouvelable utiles pour le couplage avec les MTD de dessalement ainsi qu'une discussion des principaux procédés/sources d'énergie renouvelable (SER) disponibles. Les principaux avantages et inconvénients de chaque SER utile à cet objectif sont examinés. L'énergie solaire (solaire thermique et PV), l'énergie éolienne et l'énergie géothermique constituent les principales sources d'énergie renouvelable disponibles dans les PP.

Deux facteurs principaux jouent un rôle majeur dans la restriction du choix des technologies de processus :

- 1) La salinité de l'eau qui alimente le procédé ;
- 2) Le type d'énergie disponible dans un lieu donné.

Pour les sources d'eau saumâtre jusqu'à 3000 ppm, l'OI ou l'ED peuvent se révéler être, dans ce cas, un bon choix de processus de dessalement. Pour les sources saumâtres de salinité plus élevée, l'ED ne convient plus, faisant de l'OI le meilleur choix disponible pour le moment. Ces deux processus fonctionnent à l'énergie électrique ou mécanique, ce qui signifie que le PV solaire et l'énergie éolienne conviennent aux sites hors réseau, selon la qualité de la source à cet endroit.

La situation est moins bien définie en cas de dessalement d'eau de mer. Actuellement, on peut affirmer que deux processus de dessalement semblent être les processus les plus fiables et maîtrisés ; un de chacune des deux familles de processus électrique et thermique : OI et DME. Le meilleur choix dépend en grande partie du type et de la qualité des SER disponibles dans le lieu en question.

Si la qualité de l'énergie éolienne est élevée sur un site, l'OI à énergie éolienne doit alors être prise en compte.

Lorsque l'énergie géothermique est disponible, la nature stable et continue de cette SER devient une caractéristique importante et doit être sérieusement examinée. L'énergie géothermique permet un fonctionnement de 24 heures sans nécessiter de stocker l'énergie. Dans un tel cas, la DME peut se révéler être un bon choix de processus en l'état actuel de la technologie mais d'autres choix sont possibles et devraient être pris en compte pour de faibles capacités tels que les DM et HD.

Dans la plupart des PP, le nombre de journées d'ensoleillement est élevé et l'énergie solaire peut donc presque être considérée comme la SER par défaut. Dans de tels cas, il y a deux alternatives possibles :

1. PV-OI : Le système doit être surdimensionné pour fournir la capacité journalière demandée durant les heures d'ensoleillement (~9-10 h. /jour) puisqu'il n'est pour l'instant pas économiquement faisable de stocker suffisamment d'énergie électrique pour la nuit.
2. DME-thermique solaire : Le stockage de l'énergie solaire représente un faible coût financier et le système peut être dimensionné à la capacité journalière souhaitée. D'autres options de processus thermiques sont disponibles pour de petites capacités.

Une comparaison détaillée entre ces deux alternatives doit être réalisée afin de choisir la meilleure option.

Ce processus de sélection est développé au Chapitre 3, où sont proposées des indications et méthodes pour sélectionner et choisir les technologies les plus adaptées à un cas particulier. Il faut souligner que la sélection des technologies optimales est une question à traiter au cas par cas et il est donc très difficile d'élaborer une solution générale ou des solutions universellement applicables. Le présent rapport préconise plutôt une méthodologie pour la sélection, en commençant par définir l'échelle du problème à traiter par la technologie et une identification des sources d'énergie renouvelable disponibles.

Le rapport insiste également sur l'importance d'identifier les besoins de la communauté locale en tant que facteur décisif pour la réussite du projet. Les modalités pour l'évaluation des besoins de la communauté figurent au Chapitre 4. Cela comprend des groupes de facteurs et besoins déterminés par les données géographiques, démographiques et socioculturelles, la disponibilité des ressources en eau, des schémas financiers et tarifaires appropriés ainsi que des facteurs institutionnels et de contrôle.

Enfin, le rapport évoque des orientations et recommandations pour l'intégration des MTD dans les projets de dessalement en zones rurales et reculées dans le contexte des plans nationaux de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Ceci prend en compte les principes essentiels de la GIRE et souligne plusieurs opportunités pour le niveau stratégique de l'Étude d'impact sur l'environnement (EIE), ainsi que les synergies qui peuvent être réalisées en intégrant le traitement et la réutilisation des eaux usées.

1. Introduction

La Gestion Intégrée Durable de l'Eau (SWIM) est un programme d'assistance technique régional [1] financé par l'Union européenne (UE) « visant à soutenir la gouvernance de l'eau et l'intégration en encourageant une gestion des ressources en eau équitable et durable qui doit devenir une caractéristique essentielle des politiques et stratégies de développement nationales (agriculture, industrie, tourisme, etc.). » [2]

Les pays du Sud méditerranéen sont confrontés à une pénurie d'eau croissante. Cette pénurie induit la nécessité d'augmenter l'alimentation traditionnelle en eau via des sources alternatives. Les régions rurales et isolées sont particulièrement désavantagées car elles sont souvent situées loin des systèmes municipaux d'alimentation en eau et des sources conventionnelles, et souvent, elles ne sont pas reliées au réseau d'électricité. Il existe des possibilités d'aborder le problème de la pénurie d'eau en zones rurales et isolées grâce à des technologies durables de dessalement de l'eau salée. Le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre est une industrie bien établie composée d'une large gamme de technologies disponibles avec une expérience de dizaines d'années. Les technologies de dessalement bénéficient de nombreuses avancées et évolutions. Les nombreuses technologies et procédés disponibles présentent différentes caractéristiques, avantages et inconvénients qui les rendent chacune adaptée à des marchés particuliers ou à des créneaux spécifiques. De plus, une grande partie de l'expérience technologique cumulée est liée à des installations d'alimentation urbaine importantes qui sont reliées au réseau ou font partie de grandes installations de combinant production d'énergie électrique et dessalement. Les zones rurales et isolées ont des besoins spécifiques qui influent sur le choix de technologies appropriées. Cela comprend des besoins techniques liés à une application à petite échelle utilisant des sources d'énergies renouvelables de fonctionnement et de maintenance faciles, et à la conception simple ; les besoins sont déterminés par la situation géographique ; les besoins socioéconomiques et socioculturels sont liés aux communautés qui souhaitent exploiter et bénéficier de cette technologie. La mise en œuvre réussie et la viabilité à long terme (viabilité environnementale et opérationnelle) des projets de dessalement pour les zones rurales et reculées nécessitent que tous les besoins soient identifiés et abordés dès les premières phases du projet.

C'est à cette fin que le SWIM-SM a commandé le présent rapport, pour présenter les meilleures technologies disponibles (MTD) pour le dessalement en zones rurales, adaptées aux PP. L'objectif du rapport concerne exclusivement les technologies renouvelables de dessalement. **LDK Consultants et l'Union européenne ont chargé Water and Environmental Services Co. (WESCO)** de réaliser une étude pour évaluer les MTD pour le dessalement en zones rurales, adaptées aux PP.

L'objectif principal est de fournir un rapport résumant et rassemblant les MTD, qui pourront ensuite satisfaire aux spécificités des PP pour l'alimentation en eau dans les communautés reculées, qu'elles soient situées sur les côtes ou à l'intérieur des terres. Il faudra donc envisager le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Les contraintes socioéconomiques, politiques et culturelles déterminantes doivent être prises en compte.

L'objectif de ce rapport est d'offrir aux PP et aux décideurs une vision d'ensemble et une évaluation des MTD de dessalement dans les zones reculées.

Le rapport commence avec le Chapitre 2, qui présente un condensé des meilleures technologies disponibles (MTD) pour le dessalement, des principales technologies d'énergie renouvelable pour le dessalement, et une vision d'ensemble sur la combinaison des meilleures technologies disponibles avec l'énergie renouvelable disponible. Le point 2.1 donne une description des principales technologies de dessalement disponibles à ce jour ainsi qu'une présentation de leurs avantages. Le point 2.2 offre un bref résumé des principales technologies d'énergie renouvelable utiles au couplage avec le meilleur procédé de dessalement pour la mise en œuvre dans les zones rurales reculées. Enfin, le point 2.3 propose un résumé des principales combinaisons de technologies d'énergie/dessalement renouvelables adaptées aux PP.

Le Chapitre 3 donne des décisions, données et informations avant d'envisager les technologies de mise en œuvre d'un projet de dessalement. En quelques points concis, il fournit les approches conceptuelles de la GIRE, les définitions de capacité de dessalement, les calculs de capacité de fonctionnement, la qualité de l'eau dessalée, les considérations démographiques et socioculturelles, les EIE, les systèmes de programmes de dessalement, les critères pour la sélection des sites, les coûts budgétaires et de mise en œuvre, etc.

Le Chapitre 4 propose des indications et méthodes pour filtrer et choisir les technologies les plus adaptées à un cas donné. Le chapitre adopte une approche flexible soulignant que la sélection des technologies optimales est une question à traiter au cas par cas, ce qui rend difficile d'avoir une solution générale ou des solutions universellement applicables. Le chapitre préconise plutôt une méthodologie pour la sélection, en commençant par définir l'échelle du problème à traiter par la technologie et une identification des sources d'énergie renouvelable disponibles. Ces éléments mettent en place les éléments pour la suite du procédé de sélection exposé au Chapitre 4.

L'identification des besoins des communautés locales et les modalités de leur évaluation sont le sujet du Chapitre 5. Cela comprend des groupes de facteurs et besoins déterminés par les données géographiques, démographiques et socioculturelles, la disponibilité des ressources en eau, des schémas financiers et tarifaires appropriés ainsi que des facteurs institutionnels et de contrôle.

Le chapitre final évoque des aspects et recommandations pour l'intégration des MTD dans les projets de dessalement des zones rurales et reculées dans le contexte des plans nationaux de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE).

2. Aperçu des MTD pour le dessalement en zones rurales et description des technologies d'énergie renouvelable pour le dessalement

Le point 2.1 donne une description des technologies de dessalement disponibles et le point 2.2 une description des technologies d'énergie renouvelable pour le dessalement.

2.1 Description des technologies de dessalement disponibles, avantages et faiblesses d'une utilisation en zone rurale :

De nos jours il existe de nombreux types de technologies pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Plusieurs de ces technologies sont déjà bien établies et maîtrisées ; d'autres se trouvent à des stades avancés de développement, tandis que de nouvelles technologies fondées sur des idées novatrices et de nouveaux développements scientifiques continuent de voir le jour. Ce point décrit les procédés et caractéristiques importantes de différentes technologies de dessalement réussi, ainsi que leurs avantages et faiblesses dans leur adaptation en zones rurales.

2.1.1 Distillation multistage (MSF)

Dans le procédé MSF, l'eau de mer est évaporée par flash dans plusieurs modules à pression décroissante. L'eau de mer est d'abord pressurisée et portée à sa température maximale, la *température maximale de saumure* (TBT), puis elle passe dans le premier module, maintenu à une pression plus faible que la pression de saturation correspondant à la TBT. Cela provoque l'ébullition violente de l'eau de mer appelée ébullition *flash*. La vapeur ainsi libérée, vapeur d'eau pure, monte au sommet du module, où elle rencontre un faisceau de tubes condensateurs où de l'eau d'alimentation plus froide s'écoule vers le réchauffeur de saumure. À mesure que la vapeur d'eau distillée atteint le condensateur, elle commence à se condenser et à former des gouttelettes d'eau qui tombent dans des bacs spéciaux collectant et transportant l'eau distillée. La saumure du premier module entre alors dans le module suivant où la pression est encore plus faible et le même procédé se répète tout au long des modules. Le résultat obtenu dans les derniers modules dépend du type de débit dont dispose l'installation. Il existe deux principaux types de débit dans les installations MSF : passage unique et pompes de remise en circulation. Dans le système le plus simple, le passage unique, tous les modules sont identiques ; tandis que dans les installations de remise en circulation, les derniers modules disposent de ce qu'on appelle une section d'évacuation de la chaleur et le flux de l'eau de mer dans les condenseurs sera plus important que dans les condenseurs des modules restants, ce qui permet un meilleur contrôle de la température dans le module final et permet ainsi de réaliser une plus grande série de flashes dans l'installation. Les performances des installations MSF et des usines thermiques en

général, sont mesurées soit par le rapport de la masse de distillat générée par unité de masse de vapeur injectée, ce qu'on appelle *ratio de gain opérationnel* (RGO ou GOR gain output ratio), soit par le rapport de la masse de l'eau distillée produite à l'énergie thermique de la vapeur nécessaire à sa production, rapport appelé *performance ratio* (PR). Dans quelques ouvrages de références, le PR est défini comme le rapport entre l'énergie thermique du distillat produit et la quantité d'énergie thermique de la vapeur injectée. Cette dernière définition du PR a l'avantage d'être un ratio sans dimension, mais il semble moins communément utilisé. Plus le RGO et le PR sont élevés, plus ils produisent de distillat en utilisant une quantité donnée de vapeur injectée ; et plus l'unité est efficace. Cependant, plus de modules sont nécessaires pour atteindre des RGO et PR plus élevés, ce qui entraîne un coût d'investissement plus important. La figure 1 illustre des installations simples de MSF.

Une MSF de petite capacité avec un ratio de performance 6 nécessite environ 70-80 kWh d'énergie thermique équivalente par kilo d'eau distillée produite, en plus d'une consommation électrique de 4-6 kWh/m³ pour le pompage et les systèmes auxiliaires[1]. Une unité MSF de grande taille avec un PR de 9.5 consomme près de 38 kWh/m³ d'énergie équivalente contre ≈4.5 kWh/m³ pour des unités SWRO de capacité similaire. Il est à noter qu'en convertissant l'énergie thermique en consommation électrique équivalente, le rendement de la conversion doit être pris en compte. Doosan Heavy Industries & Construction a créé la plus grande unité d'évaporation multi-flash (MSF) d'une capacité de 91 000 m³/jour pour l'usine de dessalement de Ras Al Khair en Arabie Saoudite.

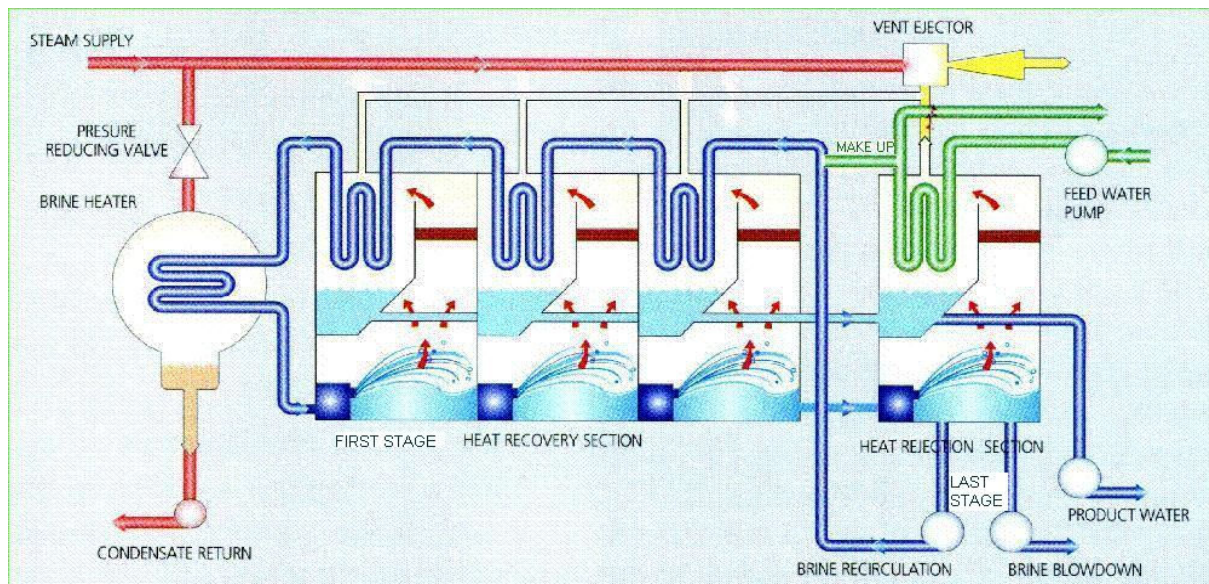


Figure 1 : Schéma de procédé d'une unité MSF simple

Avantages :

- Technologie maîtrisée avec des centaines d'installations en fonctionnement dans le monde entier depuis plusieurs années et couronnées de succès.
- Le procédé MSF dispose de la plus grande capacité installée parmi tous les processus de dessalement grâce à l'évolutivité, à la fiabilité et à la robustesse du procédé.
- Nécessite un pré-traitement minimal par rapport aux procédés OI.
- Produit une eau très faible en TSD.
- De nombreux fabricants réputés tels que Doosan, Fisia, Aqua Tech, Hitachi Zosen, etc. peuvent fournir l'installation.

Points faibles de l'utilisation des MSF en zones rurales :

- Une consommation d'énergie spécifique très élevée sera nécessaire pour des unités à petite capacité généralement conçues avec un faible RGO et PR. Elles ne sont rentables que si de la vapeur/énergie thermique à faible coût (gratuit) est disponible.
- Récupération très faible (rapport de distillat produit sur l'eau d'approvisionnement fournie) de 10 à 20%. Les besoins élevés en eau de refroidissement font que ces installations sont adaptées aux zones côtières uniquement.
- L'énergie thermique nécessaire est moins dépendante de la salinité de l'eau d'approvisionnement et donc peu économique pour le dessalement de l'eau saumâtre.
- Les besoins en produits chimiques pour la reminéralisation sont élevés comparé au procédé OI.
- Les unités de petite capacité sont chères par rapport aux installations OI et DME.
- Des pressions relativement précises doivent être obtenues dans les modules pour obtenir un fonctionnement stable, ce qui rend difficile le fonctionnement avec une source de chaleur variable comme l'énergie solaire sans stockage thermique additionnel. [2]

2.1.2 Distillation multi-effets (DME)

Le procédé DME est similaire au procédé MSF du fait que l'eau de mer est introduite consécutivement dans des chambres à pression décroissante, ce qui permet à chaque étape d'abaisser la température nécessaire pour porter l'eau à ébullition ; mais les procédés DME diffèrent en ce que l'ébullition est obtenue par les surfaces de transmission de chaleur (faisceaux de tube) plutôt que par évaporation flash. Une petite quantité de flash a lieu mais ce n'est qu'une petite contribution par rapport au total. Chaque chambre est appelée *effet*. Une source première de chaleur est nécessaire pour produire la vapeur pour le premier effet, qui a la température la plus élevée. Dans une installation classique, l'eau de mer entrant par le premier effet est pulvérisée sur un faisceau de tubes *évaporateurs*, tandis que la vapeur produisant le processus d'ébullition est envoyée dans les tubes évaporateurs. Un tel dispositif est appelé *évaporateur à couches minces*.

La vapeur d'eau distillée obtenue par ce processus d'évaporation est à une température plus élevée que la température de saturation dans le deuxième effet ; elle est envoyée dans les tubes de l'évaporateur du second effet, où elle est condensée, cédant sa chaleur au reste de l'eau de mer, provenant du premier effet. Ce processus se reproduit dans chaque effet. Un condenseur séparé est nécessaire pour condenser la vapeur distillée générée dans le dernier effet, servant également à légèrement préchauffer l'eau de mer et abaisser la température d'entrée désirée. Le distillat de chaque étape est recueilli dans un récupérateur commun et transporté pour post-traitement. La figure 2 illustre des installations simples de DME-TVC.

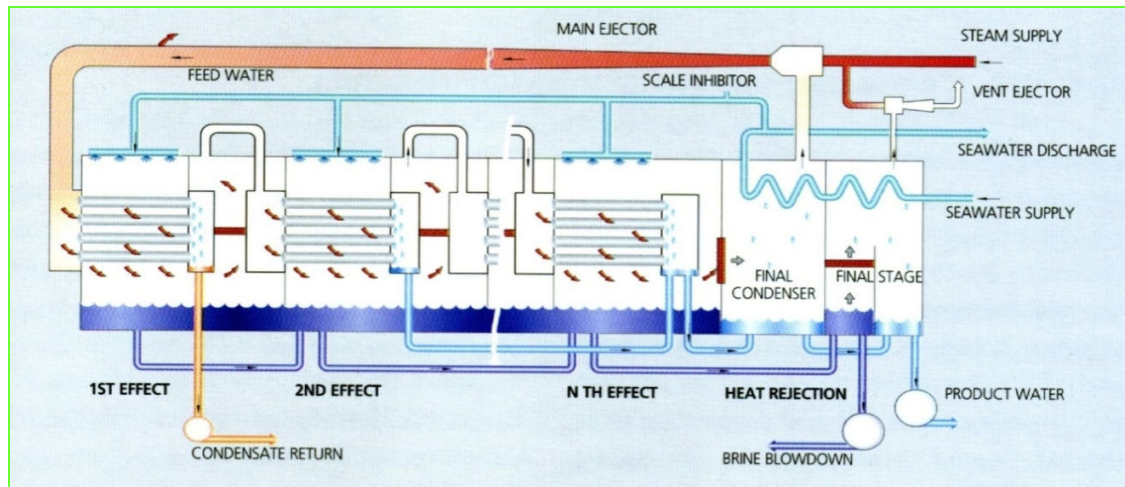


Figure 2 : Schéma d'une unité DME-TVC simple

Le RGO d'une installation DME est lié au nombre d'effets maximum théoriques. Le nombre d'effets détermine le nombre de fois où l'énergie transmise par la vapeur au distillat peut être réutilisée pour évaporer une quantité similaire supplémentaire de distillat. Il est important de noter cependant que cette restriction s'applique uniquement au procédé DME de base ; l'incorporation du TVC (décrit ci-dessous) lève cette limitation, donnant la possibilité d'obtenir un RGO plus élevé que le nombre d'effets. Doosan Heavy Industries & Construction construit la plus grande unité DME du monde, d'une capacité de 68 000 m³/jour pour l'usine de dessalement de Yanbu en Arabie Saoudite.

Les installations MSF et DME avec des RGO identiques vont, par définition, avoir des consommations spécifiques d'énergie thermique identiques, mais la consommation électrique d'une installation DME est plus faible, environ 1,0-3 kWh/m³ [1]. Cependant, il faut noter que les installations DME réalisent le même RGO que dans les installations MSF avec un plus petit nombre d'effets.

Avantages:

- Technologie maîtrisée avec des centaines d'installations en fonctionnement dans le monde entier depuis plusieurs années et couronnées de succès.
- Récemment, des chutes de températures par effet très faibles ont été atteintes, environ 1.5-2.5°C, ce qui rend possible de combiner un nombre d'effets relativement grand. Cela donne des RGO plus élevés, même avec un TBT faible à environ 70°C.
- Possibilité de fonctionner en utilisant de l'énergie thermique d'admission à basse température (~70 °C) avec des rendements thermodynamiques plus élevés que le MSF. Cela en fait un choix naturel pour le couplage avec les SER thermiques tels que l'énergie solaire et l'énergie géothermique.
- Le procédé MSF dispose de la plus grande capacité installée parmi tous les processus de dessalement grâce à l'évolutivité, à la fiabilité et à la robustesse du procédé.
- Nécessite un pré-traitement minimal par rapport au procédé OI.
- Produit une eau très faible en TSD.
- Consomme moins d'électricité que le procédé MSF.
- De nombreux fabricants réputés tels que Doosan, Sidem, Aqua Tech, Sasakura, Entropie, etc. peuvent fournir l'installation.

Points faibles de l'utilisation de la DME en zones rurales :

- Consommation généralement élevée d'énergie spécifique par rapport à l'OI. N'est rentable que si de l'énergie thermique à faible coût ou gratuite est disponible.
- Récupération très faible de l'ordre de 15 à 25%. Les besoins élevés en eau de refroidissement font que ces installations sont adaptées aux zones côtières uniquement.
- L'énergie thermique nécessaire n'a quasiment aucune corrélation avec la salinité de l'eau d'approvisionnement et de ce fait, est peu rentable pour le dessalement des eaux saumâtres par rapport à l'OI et à l'ED.
- Les unités de petite capacité sont chères par rapport aux installations OI.
- Les besoins en produits chimiques pour la reminéralisation sont élevés comparé au procédé OI.

2.1.3 Distillation par compression de vapeur

Dans le procédé par compression de vapeur, qui peut avoir un effet unique ou de multiples effets, la vapeur produite par l'évaporateur est aspirée par un compresseur. En augmentant la pression de la vapeur dans le compresseur, la température de saturation augmente. La vapeur distillée comprimée est alors utilisée pour le processus d'évaporation dans le même module qui l'a produite, tandis qu'elle se condense à la plus haute température de saturation correspondant à la pression de décharge du compresseur. Il existe deux types principaux de procédés par compression de vapeur basés sur la méthode de compression : compression de vapeur mécanique (MVC) et compression de vapeur thermique (TVC). Dans le premier, un compresseur mécanique est utilisé pour atteindre la compression désirée ; dans le second, il s'agit d'un thermocompresseur de vapeur. Le thermocompresseur de vapeur est une tuyère convergente-divergente utilisant de la vapeur motrice à moyenne pression (2-10 bars) pour entraîner la vapeur distillée d'un effet et augmenter sa pression lorsqu'elle est rejetée. Le flux d'entrée principal pour chacun de ces processus est différent ; dans le cas d'une MVC, il s'agit de la puissance mécanique exercée par le compresseur, tandis que dans le cas de la TVC, il s'agit de la puissance thermique de la vapeur motrice. Parfois les installations MVC ont besoin d'un chauffe-eau auxiliaire pour la mise en route et l'augmentation de l'admission d'énergie.

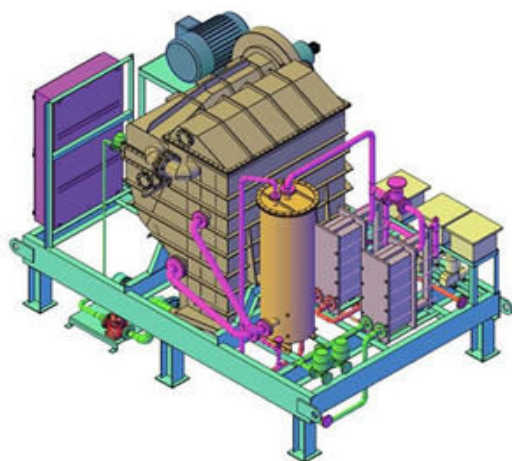


Figure 3 : Installation MVC de MECO

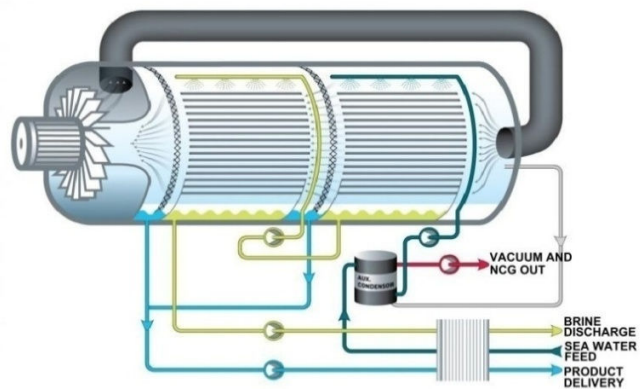


Figure 4 : Installation MVC de IDE

Avantages de la MVC :

- Technologies établies avec de nombreuses installations fonctionnant avec succès.

- Plus petits que les procédés DME et MSF, toujours produits en unités à faible capacité.
- Récupération élevée (jusqu'à 40%) par rapport aux procédés MSF et DME.
- Nécessite un pré-traitement minimal par rapport au procédé OI.
- Produit une eau très faible en TSD.
- Consomme beaucoup moins de vapeur en fonctionnement normal.
- De nombreux fabricants réputés tels que MECO, IDE, HamworthySerck Como GmbH, etc. peuvent fournir l'installation.

Points faibles de l'utilisation de la MVC en zones rurales :

- Consommation d'énergie relativement élevée (par rapport à l'OI), recommandé pour les installations de petite capacité en zones rurales.
- Nécessite quasiment la même énergie pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre, ce qui en fait un choix peu économique pour le dessalement de l'eau saumâtre.
- Consommateur d'énergie par rapport aux procédés MSF, DME et OI. De 10,4 à 15 kWh/m³ d'énergie électrique sont nécessaires pour faire fonctionner le compresseur de vapeur. Par conséquent, non recommandé là où les tarifs de l'électricité sont élevés.
- Les besoins en produits chimiques pour la reminéralisation sont élevés comparé au procédé OI.
- Les unités de petite capacité sont chères par rapport aux installations OI.
- La forte probabilité d'entartrage due à la récupération élevée et la faible injection d'acide conduit à un encrassement important.
- Le compresseur nécessite une maintenance intensive et des techniciens qualifiés.

2.1.4 Osmose inverse

Le processus de dessalement par osmose inverse est basé sur l'utilisation de membranes semi-perméables. Ces membranes permettent le passage de l'eau mais sont imperméables aux sels. Dans des circonstances normales, lorsqu'une telle membrane est utilisée pour séparer deux solutions à différentes concentrations de sel, l'eau passe de la moins concentrée à la plus concentrée en sel. Ce processus, appelé osmose, est un phénomène naturel. Cependant, si l'on exerce une pression suffisante sur la cuve à concentration de sel élevée, il est possible d'inverser la direction de l'eau pure, qui passera du côté le plus salé au côté le moins salé. C'est le principe de l'osmose inverse. La pression à exercer nécessaire pour provoquer cette inversion du flux de l'eau est déterminée par une propriété de la solution appelée pression osmotique, et celle-ci augmente à mesure que la salinité de la solution augmente. Pour cette raison, la pression et par conséquent la puissance de pompage nécessaire au dessalement de l'eau de mer est bien plus élevée que celle nécessaire à dessaler l'eau saumâtre. Il est important de noter que les améliorations constantes des propriétés des membranes OI et les différents systèmes de récupération d'énergie des saumures à haute pression dans les installations OI d'eau de mer, ont fait de l'OI la méthode la plus efficace sur le plan énergétique pour le dessalement de l'eau de mer disponible à ce jour.

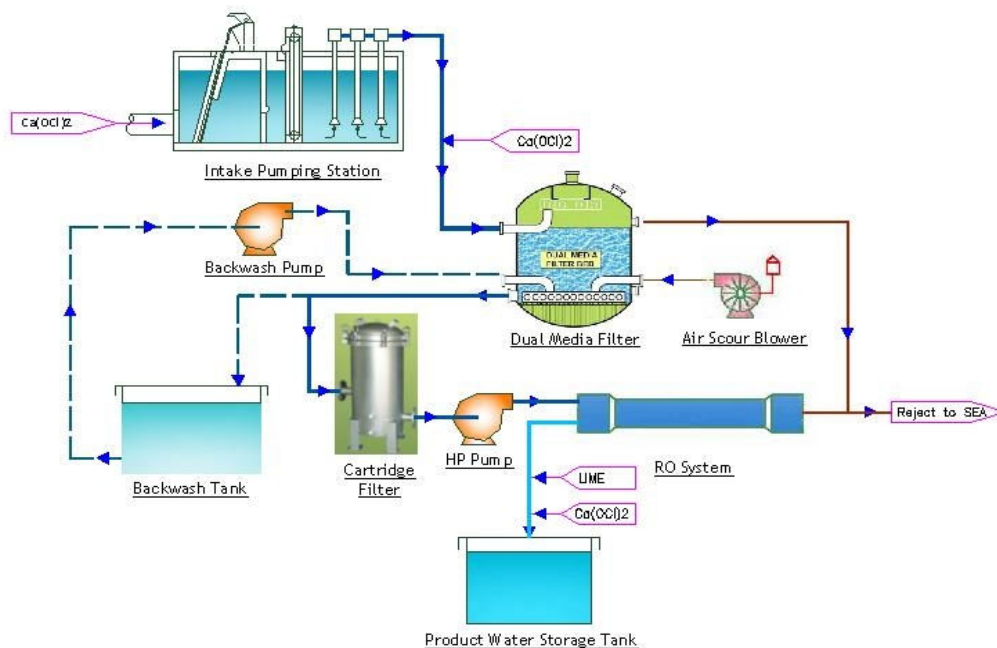


Figure 5 : Schéma du procédé SWRO

Deux types de membranes OI existent sur le marché : les membranes à spirales et les membranes à fibres creuses. Les membranes en spirales sont réalisées par Hydranautics, Filmtec, GE, Toray, Koch, etc. et les membranes en fibres creuses par Toyobo. Les membranes en fibres creuses ne sont disponibles que pour les applications d'eau de mer, alors que les membranes en spirales servent aux applications pour l'eau de mer et l'eau saumâtre.

Avantages:

- Technologie éprouvée qui a fait ses preuves avec succès.
- Peut être utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, des eaux saumâtres même à forte salinité.
- Consomme moins d'énergie que les procédés thermiques.
- Coût d'investissement plus faible que les procédés thermiques.
- Nécessite moins d'eau d'alimentation que les procédés thermiques.
- Plus petit comparé aux procédés thermiques.
- Les membranes produites par différents fabricants sont interchangeables, ce qui permet de ne pas dépendre d'un seul fabricant.
- Démarrage et arrêt rapides.
- Le développement de nouvelles membranes à haute productivité, qui s'encrassent moins et consomment moins d'énergie, conduisent à des améliorations futures du procédé qui le rendent plus attractif.

Points faibles de l'utilisation de l'OR en zones rurales:

- Un système élaboré de prétraitement est nécessaire contrairement aux procédés thermiques.
- Utilisation un peu plus complexe par rapport aux procédés MSF et DME, exigeant un haut niveau de connaissances de la part des exploitants.
- Encrassement rapide des membranes.
- Le changement fréquent des conditions de fonctionnement et/ou les cycles fréquents de mise en route et d'arrêt peuvent réduire l'espérance de vie de la membrane.

Pour 2011, on estime que l'OI représente 65 % [33] de la capacité de production totale de dessalement et les prévisions pour 2016 prévoient d'atteindre 71.4%. Deux des membranes récemment développées pour les procédés OI sont expliquées ci-dessous

Membranes nanocomposites à couche mince - NanoH2O

L'utilisation de membranes nanocomposites à couche mince (TFN) pour la purification de l'eau a été décrite pour la première fois pour des membranes de OI destinées à l'eau saumâtre en 2007[3]. Le principe de base consiste en la dispersion de nanoparticules de zéolithe dans les solutions organiques d'une polymérisation interfaciale. À mesure que la polymérisation avance dans la solution organique, les nanoparticules à proximité de l'interface sont introduites dans la couche de polyamide. Cela aboutit à l'augmentation de la perméabilité de la membrane et modifie les propriétés de la surface éventuellement corrélées à l'encrassement et maintient le rejet de sel. Par la suite, la membrane a été améliorée afin de traiter l'eau de mer. Étant donné que la membrane est essentiellement de type feuille plane, la nouvelle membrane TFN est fabriquée de la même façon que les modules OI à membrane spiralée. Par conséquent, la production n'est pas un problème. Une nouvelle société, NanoH2O Inc., a travaillé pour la commercialisation de la membrane[4] pour diverses applications avec une attention particulière portée sur les applications d'eau de mer. Les sources indiquent que la société a livré sa première membrane commerciale pour l'eau de mer afin qu'elle soit testée par différents consommateurs.

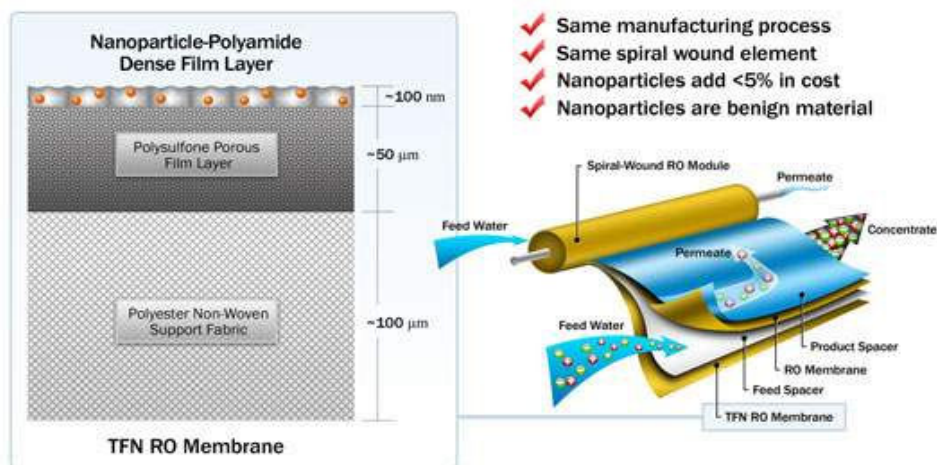


Figure 6 : Nanomembranes de Nano H₂O

Membranes OI en nanotubes de carbone

Plusieurs chercheurs tentent d'améliorer la performance des membranes OI en introduisant des nanomatériaux. Au moins deux études sont en cours, l'une au Laboratoire national de Lawrence Livermore (LLNL), USA, l'autre à l'Université de Californie, Los Angeles, USA.

L'équipe du LLNL a découvert que les nanotubes de carbone peuvent être utilisés pour former les membranes[5]. Les premiers résultats de laboratoire indiquent que ces nanopores peuvent recevoir d'importants flux d'eau tout en rejetant les éléments dissous. On suppose que les molécules d'eau se comportent différemment lorsqu'elles sont dans les nanotubes de carbone - qu'elles forment des structures tubulaires passant dans les nanotubes. Le mécanisme principal des éléments dissous n'est pas encore identifié, mais l'exclusion de taille et les effets de charge de surface pourraient jouer un certain rôle. Les premières estimations indiquent que la consommation d'énergie pourrait être 80% moins importante que pour les membranes OI.

Actuellement, NanOasis commercialise cette technologie. Des essais de laboratoire sont en cours et il faudra attendre encore un an avant qu'un projet pilote ou de démonstration puisse être examiné. Une autre société, Porifera, tente également de travailler sur des membranes similaires en utilisant des nanotubes de carbone.

2.1.5 Électrodialyse

L'idée du procédé d'électrodialyse est d'utiliser des membranes échangeuses d'ions. Chacune de ces membranes permet exclusivement aux cations (membrane perméable aux cations) ou aux anions (membrane perméable aux anions) de passer. Si une solution est placée entre deux membranes échangeuses d'ions et qu'une tension en courant continu est appliquée par des électrodes placées sur les bords extérieurs des membranes, les ions du sel se déplacent vers les électrodes des charges opposées. La partie centrale sera appauvrie en ions et sa salinité diminuera. C'est ce qu'on appelle une cellule à électrodialyse. En pratique, on utilise habituellement, pour augmenter la productivité, une *pile* d'électrodialyse, obtenue en empilant alternativement des membranes échangeuses d'anions et des membranes échangeuses de cations. Les compartiments appauvris en ions récupèrent le produit faible en sel, tandis que les compartiments adjacents contiennent les ions concentrés qui ont migré des compartiments voisins.

Dans une variante du procédé ED, appelé électrodialyse inversée (EDR) la polarité des électrodes est régulièrement inversée afin d'inverser la direction de la migration, empêchant ainsi les dépôts de crasse et de tartre et offrant un mécanisme auto-nettoyant [6].

Le procédé ED est généralement adapté aux eaux saumâtres à salinité faible ou moyenne, et non pour le dessalement de l'eau de mer. Le besoin d'avoir une bonne conductance électrique rend l'ED inadaptée pour traiter l'eau d'alimentation avec une salinité en dessous de 400 mg/l [2]. L'énergie nécessaire au procédé dépend de la salinité. Les procédés ED/EDR sont maîtrisés et bien établis commercialement.

Une caractéristique intéressante de l'ED/EDR réside dans le fait qu'il utilise un voltage à courant continu, et qu'il est donc adapté au couplage avec l'énergie PV solaire sans besoin de le transformer en courant alternatif. L'électrodialyse par métathèse (EDM) est en développement. Il s'agit d'une modification de l'électrodialyse, étudiée pour augmenter la récupération d'eau comme expliqué ci-dessous.

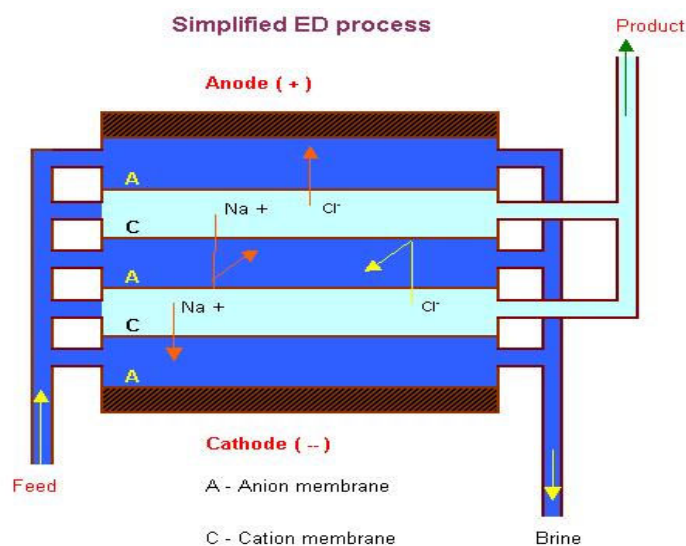


Figure 7 : Processus ED simplifié

Avantages du processus EDR :

- Technologie éprouvée avec de bons résultats

- La récupération est aussi bonne voire meilleure que dans les procédés OI.
- Consomme moins d'énergie que les procédés thermiques.
- Tolérance à la turbidité, à la silice, au TOC, au Cl₂, Fe et Mn supérieure à l'OI.
- Coût d'investissement plus faible que les procédés thermiques.
- Nécessite moins d'eau d'alimentation que les procédés thermiques.
- Nécessite une pression de fonctionnement plus faible par rapport au procédé OI, et pour une alimentation avec TSD <2000 ppm, la consommation d'énergie est plus faible que dans le procédé RO.
- Une membrane EDR/ED est plus résistante et a une durée de vie supérieure à celle d'une membrane OI.
- Plus petit comparé aux procédés thermiques.
- Démarrage et arrêt rapides.
- Le développement EDR augmente la récupération, la productivité, réduit l'encrassement et dépense moins d'énergie, en faisant ainsi un procédé plus adapté au dessalement de l'eau saumâtre.

Points faibles de l'utilisation de l'ED/EDR en zones rurales :

- Plus adapté à une eau d'alimentation avec TSD entre 400 et 3000 mg/l. Peut être utilisé efficacement pour l'eau saumâtre ; mais pas pour l'eau saumâtre à forte salinité ni pour l'eau de mer.
- Le rejet de sel (50 – 90%) n'est pas aussi bon qu'avec le procédé OI (90-99%)
- Les particules non chargées ne peuvent être enlevées, par conséquent le processus ne peut enlever la silice contrairement au procédé OI qui le supprime à 90%.
- Nécessite plus d'énergie que l'OI pour un TSD d'alimentation dépassant les 3000 ppm.

2.1.6 L'électrodialyse par métathèse (EDM)

Le procédé d'électrodialyse (ED) a été utilisé pendant des décennies dans les applications industrielles et municipales pour éliminer les ions de l'eau. Dans l'ED, les ions sont transportés par la force d'un gradient de potentiel électrochimique et séparés de l'eau d'alimentation par des membranes sélectives d'ions. L'électrodialyse par métathèse (EDM) est une modification de l'électrodialyse conçue pour augmenter la récupération de l'eau produite et faciliter le développement de produits salés à partir du concentré. La différence principale entre l'EDM et l'ED est le nombre de compartiments dans l'unité comprenant la pile d'électrodialyse. L'unité de base de l'ED est une paire d'éléments formés par deux compartiments remplis de solution séparés par deux membranes échangeuses d'ions. L'unité EDM comprend quatre éléments et quatre membranes : un compartiment de dilution, deux compartiments de concentration, un compartiment de solution NaCl, une membrane échangeuse d'anions, une membrane échangeuse de cations, une membrane échangeuse sélective monovalente d'anions, une membrane échangeuse sélective monovalente de cations (Figure 8). Cette configuration unique d'éléments est étudiée pour séparer les concentrés en deux cuves de sels très solubles : l'une contenant du sodium avec les anions et l'autre du chlorure avec les cations. Cette caractéristique d'EDM offre un avantage important en maximisant la récupération car les capacités de détartrage de la membrane avec des détartrants types tels que le CaSO₄ et le CaCO₃ n'augmentent pas avec la récupération contrairement à l'OI, NF, et d'autres formes de ED. La production de deux flux concentrés individuellement très concentrés et très solubles facilite la conversion du concentré en produits salés. Les deux flux peuvent être associés en une série séquentielle de traitements pour générer des produits salés tels que sulfate de calcium, carbonate de calcium, dolomite, hydroxyde de magnésium, chlorure de sodium, chlorure de calcium et chlorure de magnésium. L'EDM a été conçu en 1998 [7] et a depuis été largement essayé à l'échelle pilote [8]. L'EDM est actuellement développé par Veolia pour une application à pleine échelle. Bien que l'EDM soit une technologie nouvelle, ce n'est qu'une simple électrodialyse avec une organisation novatrice de membranes. L'électrodialyse est une technologie maîtrisée avec des installations à large échelle ayant vu le jour au début des années 1960. Deux flux concentrés sont produits durant le dessalement par EDM. Cependant, la quantité de concentré générée peut n'être que de 20 pour cent par rapport au concentré généré par OI à cause d'une récupération EDM plus élevée. Comme indiqué précédemment, il est possible de développer des

produits salés provenant de concentré EDM pour l'élimination des déchets. Cette technologie émergente est chère et peut être utilisée lorsqu'aucun déchet n'est toléré.

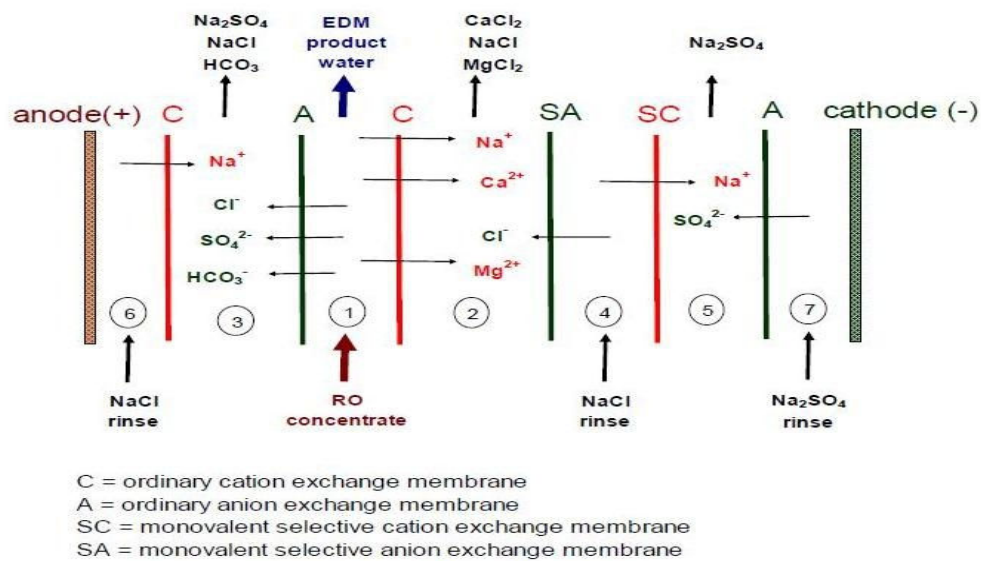


Figure 8 : Schéma de l'électrodialyse par métathèse

Avantages du procédé EDM :

- Version améliorée du processus ED avec récupération plus importante par rapport au procédé OI.
- Utilisable lorsque aucun déchet n'est souhaité. Des produits salés peuvent être développés grâce à ce procédé.

Points faibles de l'utilisation de l'ED/EDR en zones rurales :

- Technologie émergente et procédé cher.
- Requier un personnel qualifié.

2.1.7 Distillation membranaire (DM)

La distillation membranaire est un procédé thermique utilisant une membrane *hydrophobe*, imperméable à l'eau liquide, pour distiller l'eau salée. Une source de chaleur est nécessaire pour chauffer l'eau à une température de 70-90°C. Lors du chauffage de l'eau salée à la surface de la membrane, la nature hydrophobe de la membrane laisse la vapeur d'eau traverser grâce à la température élevée, mais le liquide salé ne peut pas pénétrer. La vapeur d'eau qui s'accumule de l'autre côté de la membrane est ensuite condensée par différents procédés possibles pour fournir l'eau distillée nécessaire.

Il y a quatre variantes majeures du procédé DM :

1. Distillation membranaire directe (DMD) ;
2. Distillation membranaire air gap (DMAC) ;
3. Distillation membranaire sous vide (DMV) ;
4. Distillation membranaire à entraînement gazeux (SGMD).

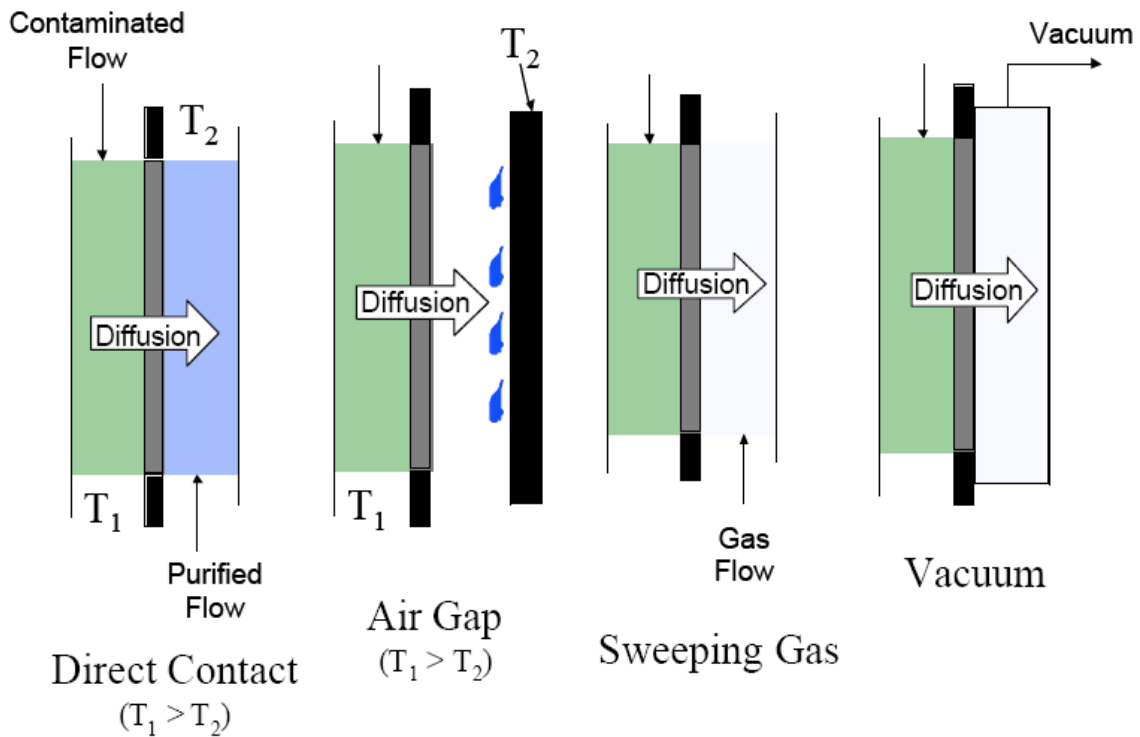


Figure 9 : Procédés de distillation membranaire

Dans la DMD, le condensat distillé refroidi est réinjecté du côté distillat de la membrane, de sorte que la vapeur passant à travers la membrane depuis le côté alimentation entre directement en contact avec le flux du liquide condensé où la vapeur se condense. Dans la DMAC au contraire, les cuves d'eau d'alimentation et de refroidissement sont séparées par un entrefer où la vapeur s'accumule et se condense sur le mur extérieur du canal de l'eau de refroidissement. Dans la DMV, un vide d'air est créé du côté distillat de la membrane afin d'augmenter le flux de la vapeur distillée. Dans ce cas, le distillat s'accumule dans la phase vapeur puis dirigé sur un condenseur externe où a lieu la condensation pour produire l'eau distillée. Le SGMD a le même objectif d'augmenter le flux de vapeur distillée, mais dans ce cas, c'est un gaz qui entraîne la vapeur distillée.

Même si le procédé DM a été inventé dans les années 1960, il n'a pas, à ce jour, connu de commercialisation à grande échelle. Cela est dû à sa relativement forte consommation d'énergie et sa faible productivité par rapport à l'OI[9]. Récemment la DM a gagné en intérêt grâce aux améliorations apportées aux membranes et à la capacité de couplage avec des sources de chaleur basse température.

Un développement intéressant à surveiller de près : le système DM développé par la société allemande Memsys [10]. La société a développé une variante du procédé DM alliant les caractéristiques de la DME dans un procédé appelé distillation membranaire multi-effets sous vide (V-MEMD). Chaque effet DM utilise un module à plaques et cadres qui peuvent être facilement empilé pour réaliser une configuration à effets multiples. Les effets DM ressemblent à la configuration DMAC mais la condensation de la vapeur dans l'entrefer est utilisée pour réchauffer l'eau dans l'effet voisin, en augmentant progressivement le vide comme dans la DME. La réutilisation de la chaleur latente de condensation dans plusieurs effets est la clé pour atteindre un RGO supérieur à la DM.

Une unité pilote de 1 m³/jour a été installée l'année dernière à Singapour. L'unité aura un RGO de 4,2, ce qui est remarquable pour un procédé DM. Memsys affirme que des unités plus grandes sont possibles avec un RGO de 10. Un autre projet pilote pour la région isolée de Tjuntjunjarra dans l'ouest de l'Australie a récemment été annoncé [11]. L'unité 1 m³/jour fonctionnera en partie à l'énergie résiduelle de petits générateurs et en partie grâce à l'énergie solaire.

Les premières estimations évaluent le coût des membranes à 1000 €/m³/jour [11], mais la technologie en est à ses débuts de commercialisation et la société a l'intention d'augmenter le procédé à 1000-2000 m³/jour, ce qui fera baisser les prix.

Avantages:

- Possibilité d'utiliser la chaleur basse température (capteur solaire, géothermie, énergie résiduelle, etc.)
- L'utilisation de modules multiples peut réduire les besoins en énergie.
- Moins de tendance à l'encrassement organique par rapport à l'OI.
- Moins de prétraitement par rapport aux procédés de dessalement conventionnels.
- Seul procédé membranaire pouvant maintenir le rendement (flux de l'eau et rejet des solutions) presque indépendamment de la concentration en TSD de la solution d'alimentation.
- Les membranes DM sont chimiquement plus inertes et résistantes à l'oxydation que les membranes OI et NF traditionnelles, permettant ainsi un nettoyage chimique agressif plus efficace.
- Produit de l'eau de meilleure qualité que les NF/OI, EDR et CD.

Points faibles de l'utilisation de la DM en zones rurales :

- Toujours en cours de développement. Peu d'informations disponibles concernant : l'efficacité des traitements dans des installations à plus grande échelle, les aspects financiers, la performance à court et long terme, l'encrassement/entartrage des DM.
- Nécessite des membranes hydrophobes spéciales. Les membranes hydrophobes disponibles sur le marché n'ont pas encore été optimisées pour le procédé DM. Domaine de R&D actif.
- Les modules à membranes pour la DM n'ont pas subi d'optimisation approfondie et peuvent nécessiter une plus grande empreinte qu'un système de capacité équivalente fonctionnant sous pression.
- Il y a contamination du distillat lorsque la membrane s'encrasse et mouille les pores des membranes
- L'utilisation de multi-étages peut réduire les besoins en énergie mais augmente le coût d'investissement associé à la membrane.
- Actuellement plus cher que les procédés OI et EDR.

2.1.8 Dessalement Thermo-Ionique™ (Saltworks Technologies Inc.)

Saltworks a développé un procédé de dessalement breveté utilisant les effets thermo-ioniques pour traiter à forte salinité. La figure 10 ci-dessous présente un schéma simplifié du procédé.

La source primaire produisant le dessalement est l'énergie du gradient de concentration (énergie chimique potentielle latente) entre les deux solutions. Par conséquent, pour traiter une source d'eau saline, une autre source à salinité plus élevée est nécessaire (appelée « concentré »). On commence par concentrer l'eau salée d'alimentation à un taux de sel de 18%. On peut utiliser divers procédés d'évaporation telle que le refroidissement par aspersion ou la tour de refroidissement, pour concentrer l'eau d'alimentation. Ajouter de la chaleur pour augmenter la température de 5 à 15 degrés supplémentaires par rapport à la température ambiante favorise également le taux et la performance de l'évaporation. La source de chaleur peut être solaire ou résiduelle provenant d'un processus industriel voisin. Le concentré et l'eau salée sont fournis au dispositif modulaire de dessalement breveté de Saltworkds en deux cuves : une d'eau salée à traiter et une d'eau « diluée ». L'eau diluée

et le concentré (indiqué comme hyperconcentré) sont séparés par des membranes échangeuses d'ions. À cause de la différence de potentiel électrochimique, les ions passent de la solution hypersalée du côté de la solution diluée. Ainsi, la solution hypersalée perd du sel qui se déplace vers la solution diluée. Cependant, étant donné que seuls les cations (sur la partie gauche) et les anions (partie droite) se déplacent dans les flux dilués, ces flux doivent aspirer les contre-ions pour maintenir l'équilibre des charges. Ces contre-ions sont aspirés de l'eau d'alimentation provoquant ainsi son dessalement. Comme dans le procédé EDR, la direction du courant ionique est régulièrement inversée pendant l'opération afin de détartrer le système.

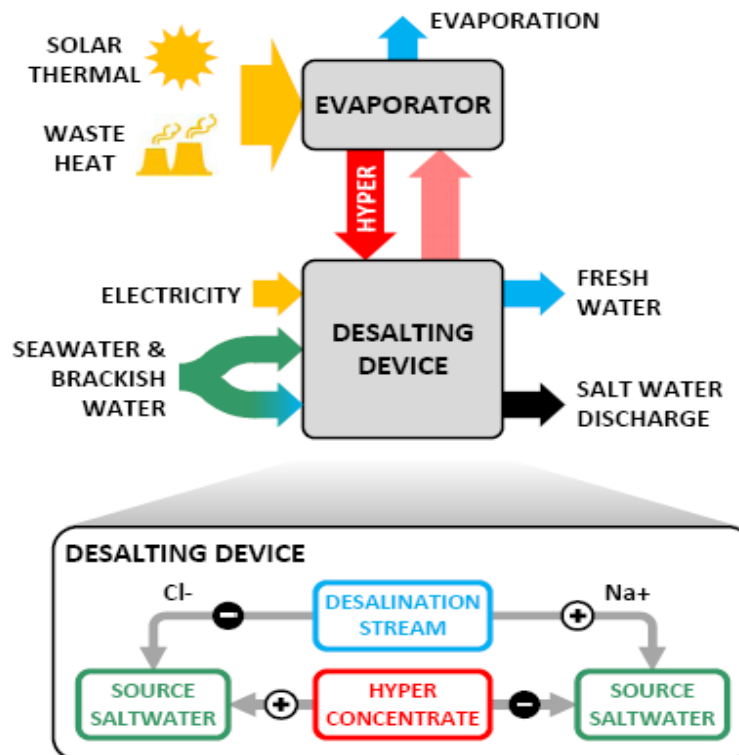


Figure 10 : Schéma de Saltworks technology [34]

Avantages:

- Possibilité d'utiliser la chaleur basse température (capteur solaire, géothermie, énergie résiduelle, etc.)
- Moins de tendance à l'encrassement organique par rapport à l'OI.
- Moins de prétraitement par rapport aux procédés de dessalement conventionnels.

Points faibles de l'utilisation du dessalement thermo-ionique en zones rurales :

- Toujours en cours de développement. Peu d'informations disponibles concernant: l'efficacité des traitements dans des installations à plus grande échelle, les aspects financiers, la performance à court et long terme, l'encrassement/entartrage.
- Étant donné que la technologie est développée par Saltworks, la plupart des informations concernant le dispositif de dessalement sont confidentielles.
- Le dispositif de dessalement n'a pas subi d'optimisation approfondie et peut nécessiter de plus grandes empreintes qu'un système de capacité équivalente fonctionnant sous pression.
- Actuellement plus cher que les procédés OI et EDR.

2.1.9 Osmose directe (OD - FO Forward Osmosis)

Le processus d'osmose directe utilise l'osmose naturelle pour réaliser le dessalement. Les solutions isobares avec différentes concentrations en soluté (salinité) ont des potentiels chimiques différents. Les gradients de potentiel chimique résultent des différences entre la concentration du soluté et la pression hydraulique. Lorsqu'ils sont séparés par une membrane semi-perméable, seul le passage de l'eau est permis, et ils exercent une force pour le transport des ions par diffusion. L'eau est transportée du côté de la solution diluée vers le côté le plus concentré, processus appelé osmose.

Dans le procédé d'osmose directe, la pression osmotique de l'eau d'alimentation est augmentée par l'ajout de différents solutés (figure 11). Dans la terminologie OD, la solution concentrée sur le côté perméable de la membrane est appelée solution aspirée. Lorsque la pression osmotique de l'eau propre (après ajout de solutés) est plus importante que celle de l'eau salée, l'eau pure passe du côté eau salée au côté eau douce. Par conséquent, l'énergie effective est la pression osmotique elle-même et non la pression hydraulique comme dans le procédé conventionnel d'osmose inverse. La viabilité du procédé dépend de la sélection du soluté ajouté à la partie eau douce et de la capacité de le retirer de l'eau douce et de le réutiliser, une fois l'eau salée dessalée. Une bonne solution aspirée a une pression osmotique élevée et un soluté facilement séparable. Les solutés en question comprennent les sels qui peuvent être précipités, des gaz tels que l'ammoniac, le dioxyde de carbone et les nanoparticules [12]. Pour l'instant, la meilleure méthode semble être la solution aspirée ammoniac-dioxyde de carbone, car elle transmet une pression osmotique élevée et peut ensuite être décomposée en ammoniac et dioxyde de carbone à faible température (environ 60 °C).

Dans le système OD ammoniac-dioxyde de carbone, les variétés de sel formées comprennent le bicarbonate d'ammonium, le carbonate d'ammonium et le carbamate d'ammonium [13]. Le carbonate d'ammonium est de loin le plus soluble. L'expulsion et le recyclage des solutions aspirées s'opèrent par une colonne de distillation. Selon l'énergie thermique disponible pour chauffer la solution, une ou plusieurs colonnes de distillation sont nécessaires.

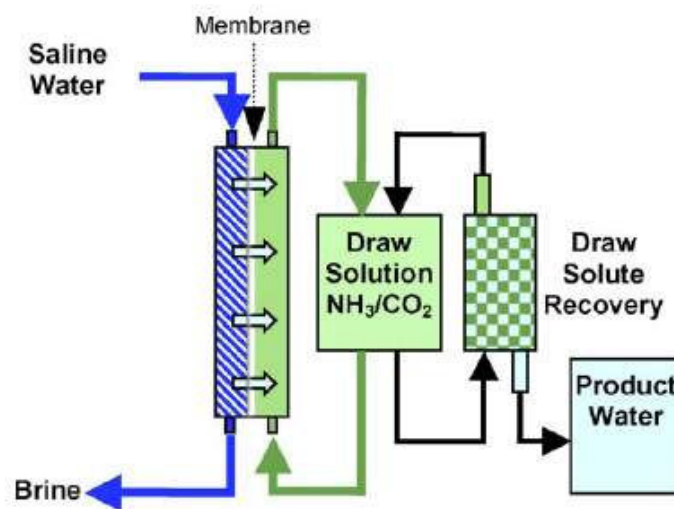


Figure 11 : Schéma simplifié d'un procédé OD.

Oasys (Osmotic Application Systems) est l'une des premières sociétés à développer actuellement cette technologie. La technologie étant en cours de développement et de commercialisation, peu d'informations sont disponibles.

Quantum Sphere Inc. a fait une demande de dépôt de brevet américain en janvier 2009 pour son procédé de purification de l'eau. La société affirme que ce procédé est une alternative plus économe en énergie que les méthodes de dessalement actuellement utilisées. Le procédé d'osmose directe Quantum Sphere utilise certaines solutions organiques pour séparer l'eau de l'eau salée ou polluée par un procédé de purification osmotique. La

société indique que la solution organique peut augmenter la pression osmotique d'une solution aspirée de 5 à 10 fois plus élevée que l'eau de mer. Le procédé utilise une membrane semi-perméable pour séparer l'eau de l'eau salée dans une solution organique spéciale traversant la membrane.

Dessalement par osmose modifiée (Modern Water)

Le dessalement par osmose modifiée (MOD), commercialisé par Modern Water est basé sur le principe de l'osmose directe. De fait, c'est le premier procédé d'osmose directe à avoir été commercialisé. Comme on l'a vu plus haut, le procédé d'osmose directe nécessite l'ajout d'un soluté à l'eau pure pour obtenir une pression osmotique plus importante que dans la source d'eau salée à traiter. Cette solution est appelée solution aspirée. À mesure que l'eau est dessalée, la solution aspirée est diluée. Le soluté ajouté à la solution aspirée est alors retiré pour obtenir l'eau purifiée. Le soluté peut être réutilisé.

Modern Water appelle ce soluté « agent osmotique ». Le système d'osmose directe est lié à un système de production traitant la solution aspirée diluée afin d'obtenir de l'eau produite et une solution aspirée concentrée qui peut être réutilisée dans le procédé d'osmose directe. Lors de la première étape, l'eau est poussée à basse pression vers les membranes d'osmose modifiée (directe).

(Figure 12).

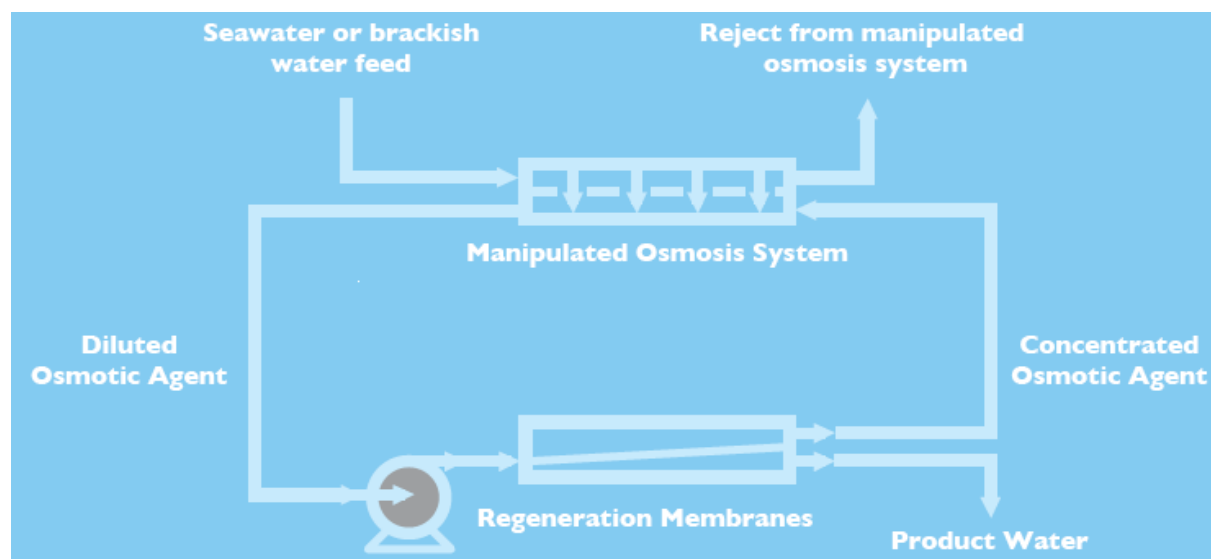


Figure 12 : Procédé de dessalement par osmose modifiée de Modern Water

Ces membranes sont résistantes à l'encrassement et aux agents oxydants. L'agent osmotique, de l'autre côté de la membrane, aspire l'eau douce de l'eau de mer grâce à la différence de pression osmotique. L'eau pure dilue l'agent osmotique. Lors de la deuxième étape, le perméat est extrait du système. L'eau pure est extraite de l'agent osmotique dilué qui est régénéré (ou concentré) pour nouvelle utilisation à la première étape. Cela peut être réalisé de plusieurs façons selon l'agent osmotique sélectionné. Par exemple, le procédé OI est utilisé dans la seconde étape pour extraire l'eau douce et concentrer l'agent osmotique.

Avantages du procédé OD :

- Fonctionne à basse pression et consomme donc beaucoup moins d'énergie par rapport aux membranes classiques et aux techniques de dessalement par évaporation mécaniques/thermiques.
- Le compactage de la membrane n'est pas un problème
- Moins de tendance à l'encrassement organique par rapport à l'OI.

Points faibles de l'utilisation de l'OD en zones rurales:

- Toujours en cours de développement. Peu d'informations disponibles concernant: l'efficacité des traitements dans des installations à plus grande échelle, les aspects financiers, la performance à court et long terme, l'encrassement/entartrage.
- Nécessite des membranes spéciales. Les membranes OI disponibles sur le marché ne sont pas adaptées à l'OD, car ces membranes ont un flux d'eau douce relativement faible, peut-être dû à une importante polarisation de concentration interne dans les supports poreux et à la couche inférieure des membranes OI.
- L'utilisation du carbonate d'ammonium comme solution aspirée peut offrir la pression osmotique désirée. Cependant, l'ammoniac diffusé dans la cuve de perméat devrait être extrait grâce à une technologie à bas coût (énergie résiduelle pour vider l'ammoniac).

2.1.10 Distillateurs solaires

Le distillateur solaire est probablement le système le plus simple de distillation de l'eau de mer. Il s'agit d'un bassin avec couverture en verre transparent contenant de l'eau salée souvent en forme de V à l'envers. Le bassin est tapissé d'un matériau foncé pour maximiser l'absorption des rayons solaires. Cette installation crée un effet de serre dans lequel le verre permet aux rayons solaires de passer mais où les radiations infrarouges émises par le distillateur sont presque entièrement bloquées par le verre piégeant ainsi la chaleur dans le distillateur. La température obtenue provoque l'évaporation de l'eau salée, la vapeur monte et se condense au sommet de la couverture de verre et glisse sur les rebords inférieurs de la couverture dans le conduit de récupération. Le débit moyen d'un bon distillateur solaire est de 3-4 l/m²/j[2], [14]. Le coût de construction d'un distillateur solaire est d'environ US\$ 50-150/m²[14]. Le cône à eau, un petit distillateur solaire portable (voir figure 13), créé par Mage Water Management, produit 1-1.5 l/jour d'eau distillée, correspondant à un taux maximum de 8.8 l/m²/jour. Les distillateurs solaires sont satisfaisants pour produire de petites quantités d'eau pour des besoins de base, mais peu économiques pour une production plus importante pour couvrir tous les besoins journaliers. SolAqua fournit le kit à monter soi-même RainmakerTM550 (figure 14).



Figure 13 : Cône à eau



Figure 14 : Distillateur solaire : RainmakerTM 550

2.1.11 Humidification/Déshumidification (HD)

Le dessalement par humidification-déshumidification (HD) imite le cycle naturel de l'eau pour dessaler l'eau. De l'air atmosphérique normal est utilisé pour convertir l'eau de mer en eau douce. Le dessalement HD implique deux procédés. L'eau saline est d'abord convertie en vapeur d'eau par évaporation en air sec dans un évaporateur (humidification). La vapeur d'eau est ensuite condensée par l'air dans un condenseur pour produire de l'eau douce (déshumidification). La chaleur pour l'évaporation peut provenir de plusieurs sources : solaire, thermique, géothermique, ou une combinaison de ces sources. Un schéma simplifié du procédé HD est présenté en figure 15.

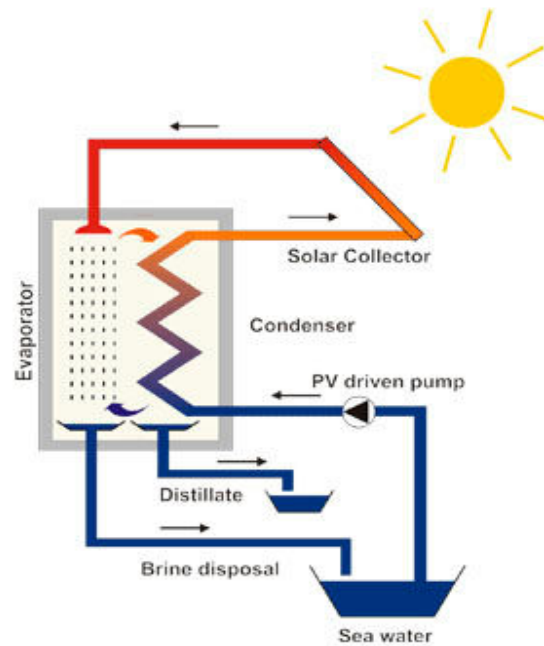


Figure 15 : Schéma simplifié du procédé HD.

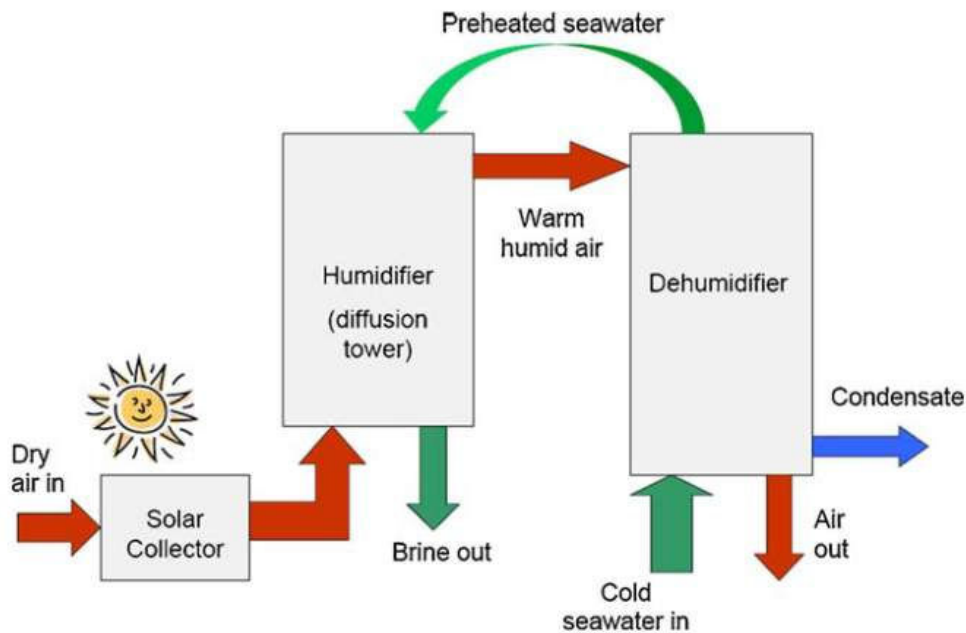


Figure 16 : Schéma simplifié du procédé HD avec chaleur solaire transférée par l'air.

Le procédé HD illustré ci-dessous en figure 16 est un système simple de distillation pouvant être réalisé par l'énergie thermique solaire et adapté aux applications à petite échelle. L'énergie thermique solaire est utilisée pour chauffer l'eau saline dans le déshumidificateur, laquelle est ensuite poussée vers une colonne à garnissage contre un tirage d'air sec ascendant. Après avoir été humidifié par la vapeur d'eau, l'air est ensuite transporté vers un condensateur où l'humidité de l'air se condense à la surface extérieure des tubes et s'accumule dans le fond. La chaleur latente associée à la condensation de la vapeur est utilisée pour préchauffer l'eau saline circulant dans le condensateur à tube. Cette caractéristique représente un atout pour le procédé HD par rapport au distillateur solaire simple, où la chaleur latente de condensation n'est généralement pas récupérée.

Les systèmes HD peuvent être classés en trois grandes catégories. La première est basée sur la forme d'énergie utilisée: solaire, thermique, géothermique ou systèmes hybrides. Ce classement souligne les aspects les plus prometteurs du concept HD: la perspective de production d'eau via une source d'énergie de faible intensité, particulièrement par des sources renouvelables. Le second classement du procédé HD est basé sur la configuration du cycle (comme un circuit fermé à l'air libre [CWOA]). La troisième classification des systèmes HD est basée sur le type de chaleur utilisée : systèmes de chaleur à eau ou à air. Les besoins en énergie du HD comprennent la chaleur latente de vaporisation, l'air transportant l'énergie et une énergie frigorifique pour condenser la vapeur. C'est un procédé énergivore. 650 kWh/m³ environ sont nécessaires pour la vaporisation, ainsi qu'une énergie supplémentaire pour l'équipement mécanique (Huehmer and Wang, 2009).

Le débit attendu d'un système HD est d'environ 20-30 l/m²/jour par zone de collecteur solaire [14]. Les systèmes commerciaux HD sont vendus par une société allemande, Mage Water Management[15].

Afin d'augmenter la récupération de chaleur, Muller et Holst ont proposé le concept de HD à effets multiples. L'air de l'humidificateur est extrait en différents points et fourni au déshumidificateur aux points correspondants. Cela permet une stratification continue des températures, qui génère une faible différence de température pour permettre au procédé de continuer à fonctionner. Ce qui induit à son tour une plus grande récupération de chaleur

du déshumidificateur. En fait, la plupart de l'énergie nécessaire au procédé d'humidification est reprise dans le déshumidificateur, diminuant la demande en énergie à une valeur de 120 kWh/m³. Ce système est fabriqué et commercialisé par une société de gestion de l'eau : Tinox GmbH.

Avantages:

- Ce procédé nécessite une énergie thermique de faible intensité, ce qui en fait un procédé idéal pour les zones rurales des PP où l'électricité n'est pas disponible.
- La conception simple et les matériaux de construction relativement bon marché conviennent aux unités autonomes de petite capacité en zones rurales, avec un débit par unité supérieur aux distillateurs solaires simples.

Points faibles :

- Difficulté ou impossibilité de moduler la capacité.
- Les besoins importants en énergie rendent le procédé peu économique pour des unités plus grandes fonctionnant avec une énergie renouvelable ou une énergie résiduelle. Un HD à effets multiples nécessitant moins d'énergie est toujours en cours de développement.

Tableau 1 : Comparaison des technologies de dessalement en zones rurales

Procédé	Coût d'investissement	Conso mmation d'énergie	Autres frais F&E	Avantages principaux	Principaux points faibles	Comp étences nécessaires en	Type d'énergie nécessaire
Distillation multiflash (MSF)	Élevé	Élevé	Faible	<ol style="list-style-type: none"> 1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Solide et fiable 3. Moins de prétraitement nécessaire. 4. Convient pour une eau d'alimentation à 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nécessite beaucoup d'eau. 2. Plus de saumure à évacuer. 3. Grande consommation d'énergie spécifique 	2	Chaleur + courant
Distillation multi-effets (DME)	Moyen	Élevé	Faible	<ol style="list-style-type: none"> 1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Solide et fiable 3. peut utiliser une chaleur de faible intensité 3. Moins de prétraitement nécessaire. 4. Convient pour une eau d'alimentation à 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Grande consommation de chaleur spécifique 2. Faible taux de récupération, lorsque l'eau de refroidissement est utilisée. 	2	Chaleur + courant
Compression de vapeur thermique (TVC)							
Compression de vapeur mécanique (MVC)	Faible à élevé	Élevé	Faible	<ol style="list-style-type: none"> 1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Solide 3. Petite taille 4. Convient pour une eau d'alimentation à 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fort entartrage lors de conditions changeantes. 2. Le compresseur mécanique nécessite des compétences en F&E 	4	Courant électrique
Osmose inverse	Moyen	Faible	Moyen	<ol style="list-style-type: none"> 1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Fiable 3. Petite taille 4. Taux de récupération élevé 5. Temps de mise en route et d'arrêt réduit 6. Convient pour une eau d'alimentation à TSD élevé 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Le prétraitement nécessite une conception attentive. 2. Sensible à l'encrassement des différents types de membrane 3. Le changement fréquent des conditions de fonctionnement et/ou les cycles fréquents de mise 	3	Courant électrique
Électrodialyse (ED et EDR)	Faible	Faible	Faible	<ol style="list-style-type: none"> 1. Technologie maîtrisée et éprouvée 2. Fiable 3. Petite taille 4. Taux de récupération élevé 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Convient à des TSD jusqu'à 3000 mg/l. 	3	Courant électrique

Distillation membranaire (DM)	Élevé	Élevé	Faible	<p>5. Temps de mise en route et d'arrêt réduit</p> <p>6. Moins de prétraitement nécessaire.</p> <p>1. Possibilité d'utiliser de la chaleur basse température</p> <p>2. Fonctionne à basse pression</p> <p>3. Petite taille</p> <p>4. Récupération élevée ; a besoin de moins d'eau pour un débit donné.</p> <p>5. Moins de prétraitement nécessaire.</p> <p>6. Convient pour une eau d'alimentation à TSD très élevé</p>	2	Chaleur + courant faible
	Moyen			<p>1. Technologie toujours en cours de développement</p> <p>2. Grande consommation de chaleur spécifique</p>		
Électrodialyse par métathèse (EDM)	Élevé	Élevé	ND	<p>1. Version améliorée de ED</p> <p>2. Récupération plus importante qu'une OI et zéro déchet possibles.</p> <p>3. Petite taille</p> <p>4. Moins de prétraitement nécessaire.</p>	4	Courant électrique
Thermo-Ionic™ Desalination	Élevé	Élevé	ND	<p>1. Possibilité d'utiliser de la chaleur basse température</p> <p>2. Petite taille</p> <p>3. Récupération élevée ; a besoin de moins d'eau pour un débit donné.</p> <p>4. Moins de prétraitement nécessaire.</p>	4	Courant + chaleur
Osmose directe	ND	Faible (potentiel)	ND	<p>1. Fonctionne à basse pression et consomme donc moins d'énergie.</p> <p>2. Moins de prétraitement nécessaire.</p>	4	Courant (+ chaleur dans certains cas)
Distillateurs solaires	Très faible	Élevé	Très faible	<p>1. Utilise l'énergie solaire</p> <p>2. Simple et facile d'utilisation</p>	1	Solaire (chaleur)
Humidification/ Déshumidification (HD)	Moyen	Élevé	Faible	<p>1. Peut utiliser une énergie thermique de faible intensité.</p> <p>2. Conception simple utilisant des matériaux bon marché</p>	3	Chaleur + courant

ND : non disponible / non établi

2.2 Description des technologies à énergie renouvelable pour les MTD de dessalement

2.2.1 Énergie solaire

Il existe deux catégories de technologies d'énergie solaire : l'énergie solaire thermique et le solaire photovoltaïque (PV) Comme son nom l'indique, les technologies d'énergies solaires capturent la chaleur des rayons solaires soit pour une utilisation directe dans un procédé à chaleur particulier, soit pour la production d'électricité grâce à un cycle de vapeur dans un processus mécanique ou électrique. La technologie solaire photovoltaïque (PV) est basée sur la transformation directe de l'énergie des rayons solaires en courant électrique continu utilisant les panneaux semi-conducteurs.

À cause des températures relativement basses nécessaires au dessalement thermique, les capteurs solaires sans concentration représentent la catégorie la plus appropriée pour le couplage avec des procédés thermiques de dessalement. Les capteurs solaires à concentration sont plus appropriés à une production d'électricité, technologie connue sous le nom d'Énergie solaire à concentration (ESC) où les hautes températures dans le fluide actif sont importantes pour l'efficacité du cycle thermodynamique. L'ESC est un secteur technologique très prometteur pour le dessalement renouvelable, mais probablement plus pour les installations de dessalement de capacité moyenne à grande. Les installations ESC sont relativement sophistiquées et conviennent moins aux unités autonomes de dessalement en zones rurales et reculées.

Les *bassins solaires* sont un autre type de technologie solaire thermique. Un bassin solaire utilise un gradient de salinité supérieur à celui d'un bassin ou d'un lac pour piéger l'énergie solaire entrant.

Les bassins solaires ont l'avantage d'allier à la fois les fonctions d'un capteur solaire et d'un système de stockage thermique [6].

Un des avantages principaux de l'énergie solaire thermique est qu'elle est plus facile à stocker que le PV solaire. Il est plus facile et plus économique de stocker de l'énergie thermique que de stocker de l'électricité.

La technologie solaire photovoltaïque (PV) est basée sur la transformation directe de l'énergie des rayons solaires en courant électrique continu utilisant les panneaux semi-conducteurs. Cette transformation est basée sur l'effet photovoltaïque : une propriété qu'ont certains semi-conducteurs dans laquelle les photons de la lumière excitent les électrons du semi-conducteur créant une tension ou un courant électrique continu. De nombreuses cellules PV sont connectées entre elles et forment les panneaux solaires. Pour augmenter la tension générée, on branche des panneaux solaires en série, tandis que la connexion en parallèle est utilisée pour augmenter le courant. QuadraSolar déclare avoir atteint un rendement de 30% pour le PV et 35% pour le thermique.

2.2.2 Énergie éolienne

Les éoliennes convertissent une partie de l'énergie cinétique du vent en puissance mécanique, qui peut être utilisée soit pour entraîner un générateur électrique soit directement accouplé à un processus mécanique. Le rendement théorique maximal de cette transformation est de 59.3%, tandis que le rendement effectif atteint par les turbines est d'environ 35-48% [2]. Ce chiffre ne traduit que le rendement de l'extraction de l'énergie cinétique du vent et la conversion en puissance mécanique ; il ne prend pas en compte d'autres pertes en aval telles que les pertes mécaniques ou les pertes du générateur électrique.

Les éoliennes peuvent être classées en éoliennes à axe horizontal (HAWT) et éoliennes à axe vertical (VAWT). Le type horizontal (figure 18) est le plus fréquent. Dans cette disposition (HAWT), l'arbre du rotor et le générateur électrique sont situés au sommet de la tour de l'éolienne. La HAWT doit être dirigée vers le vent pour être efficace. Le MagLev VAWT est une éolienne à lévitation magnétique à couple puissant, bas régime, pratiquement

silencieuse et sans vibration. Elle ne nécessite presque pas de maintenance puisqu'il n'y a pas de frottement et elle peut être installée sur le toit de la structure. Il n'y a pas besoin de transmission à engrenage pour la conversion de l'énergie cinétique en électricité. Grâce à leur lévitation magnétique à couple puissant, bas régime, à leur utilisation ne nécessitant quasi pas de maintenance, les éoliennes MagLev Wind™ (figure 17) sont parfaitement adaptées pour répondre à la demande de source d'énergie renouvelable rentable pouvant être installée sur la plupart des toits. Les éoliennes MagLev Wind™ sont disponibles sur le marché avec des rendements de 2.5kW à 50kW. Une éolienne MagLev Wind™ d'1 MW est en cours de conception pour des bâtiments commerciaux et industriels plus grands.



Figure 17 : Éolienne à axe vertical MagLev Figure 18 : Parc d'éoliennes à axe horizontal

2.2.3 Géothermie

L'énergie géothermique est de l'énergie thermique provenant de l'intérieur de la Terre. La source de cette énergie provient essentiellement de la désintégration de la matière radioactive du noyau de la Terre.

Les sources d'énergie géothermiques sont accessibles à des profondeurs différentes selon leur température, qui peut osciller de 20 à 300 °C, et selon la forme sous laquelle l'eau est disponible, à savoir liquide ou vapeur. Les sources géothermiques à haute température, au-dessus de 150°C sont utilisées pour la production d'électricité en utilisant un cycle de Rankine qui peut en principe être utilisé dans les procédés de dessalement avec énergie électrique. Les sources à température plus basse sont mieux adaptées pour un couplage direct aux procédés de dessalement thermiques. Lorsque de la vapeur à haute pression est disponible, elle peut être utilisée directement pour alimenter une turbine électrique ou en couplage direct avec un procédé de dessalement mécanique [6], [16].

Certains spécialistes estiment que l'énergie géothermique est l'une des options les plus prometteuses pour le dessalement par énergie renouvelable [16]. Les réservoirs géothermiques fournissent une énergie thermique continue dans des conditions régulières tous les jours, toute l'année. Ce qui est très souhaitable du point de vue du procédé de dessalement pour lequel la variabilité crée des difficultés et des complications qui doivent être traitées dans la conception du système. Le stockage de l'énergie par exemple n'est pas nécessaire comme il peut l'être pour d'autres ressources. Cependant les gaz et minéraux dangereux constituent un inconvénient pour l'énergie géothermique. Ils peuvent jaillir du sous-sol en même temps que la vapeur. Le sulfure d'hydrogène est l'une des substances les plus communément rejetées, très difficile à éliminer en toute sécurité. L'arsenic, le mercure et l'ammoniac sont d'autres minéraux problématiques. De nombreuses barrières pour l'adoption de l'énergie thermique pour le dessalement ont été identifiées dans la documentation [16]. Elles comprennent :

- La technologie n'a pas encore été développée commercialement, principalement parce que le coût associé de l'eau dessalée par ces moyens n'est pas compétitif par rapport à d'autres approches plus traditionnelles.
- La nature très spécifique du site des ressources d'énergie géothermique rend difficile d'imposer des conceptions standards ou modulées. Ce facteur augmente le coût de développement de tels projets par rapport à d'autres avec options modulaires.

2.2.4 Disponibilité de chaleur résiduelle

Même si ce n'est pas véritablement une énergie renouvelable, la possibilité d'utiliser la chaleur résiduelle dans certaines situations ne doit pas être négligée. Elle peut provenir d'une unité de production électrique hors réseau telle qu'une turbine à gaz ou un moteur diesel. Dans ce cas, plusieurs procédés de dessalement à énergie thermique peuvent être assemblés pour tirer profit de cette source résiduelle sans augmenter sensiblement la demande en courant généré localement. Un exemple de ce genre est constitué par l'installation DM de 5000 l/jour de l'île de Pantelleria, en Italie, dont 80% de l'énergie nécessaire proviennent de la chaleur résiduelle d'une centrale électrique diesel et les 20% restants de capteurs solaires [17].

2.3 Procédés/Combinaisons de ressources ER

Compte tenu des différentes technologies de dessalement et des diverses technologies d'énergie renouvelable présentées ci-dessus, une grande variété de combinaisons est possible. Il est peu probable qu'une simple paire puisse être identifiée comme adaptée à toutes les situations et le choix rationnel des technologies dépend de nombreux facteurs. Dans cette section sont présentées les principales combinaisons communément adoptées ou qui ont été examinées. Une des difficultés et barrières pour le dessalement par énergie renouvelable réside dans le fait que les deux éléments : Technologie SER et technologie de dessalement ont généralement été développées séparément, ce qui a un impact sur la fiabilité et la modularité du système entier et sur la facilité de déploiement[14].

2.3.1 Capteur solaire-DME

Le procédé DME est un procédé thermique maîtrisé avec de nombreuses qualités, ce qui favorise sa sélection associée à l'énergie thermique solaire. Par rapport au MSF, le fait que le même RGO puisse être atteint avec moins d'effets aboutit à sa relative simplicité et à son extensibilité plus facile. Cela rend le procédé DME plus adapté aux systèmes autonomes à petite échelle que le procédé MSF. De plus, comme il a été mentionné plus haut, la consommation électrique de la DME pour le pompage et les systèmes auxiliaires est plus faible que celle du MSF, ce qui est important spécialement lorsque la source est l'énergie solaire thermique, car il est nécessaire d'avoir un second moyen de production d'électricité.

Une variante importante de la configuration DME est la distillation à empilement vertical (MES). La figure (15) montre un schéma d'un MES à quatre effets. De l'eau salée est introduite au sommet de la pile et vaporisée sur le faisceau évaporateur en formant un film mince. La chaleur introduite dans le processus se présente sous la forme de vapeur circulant dans les tubes du premier effet et abandonnant sa chaleur latente au film évaporateur d'eau salée à l'extérieur des tubes au fur et à mesure de la condensation. Le processus continue à des pressions de moins en moins élevées, comme cela a été décrit précédemment pour le procédé DME.

La configuration MES est remarquablement stable et a la capacité de s'ajuster automatiquement même lors de changements soudains dans les conditions d'admission de la vapeur[2]. Cela la rend particulièrement intéressante pour le couplage avec une source d'énergie variable telle que l'énergie solaire thermique. De plus, en tant que procédé à passage unique où la température de l'eau salée la plus élevée correspond à la salinité la plus basse, il réduit le risque de formation de calcaire sans exiger des quantités importantes d'anticalcaires. La qualité de l'eau

est en principe inférieure à 5 ppm TSD pendant toute la durée de vie de l'installation. Ainsi, la variante MES du procédé DME paraît la plus adaptée pour une utilisation à l'énergie solaire[2].

Une DME à empilement vertical de 14 effets avec une capacité de 72m³/jour a été installée à Plataforma Solar de Almería en Espagne durant les années 1990. L'installation tire sa puissance de collecteurs paraboliques (PTC) à poursuite solaire mono-axial installés sur une superficie de 2762 m², et comprenant une cuve de stockage d'énergie pétrolière thermique thermocline de 155 m³. Le transfert thermique était assuré par de l'huile synthétique servant à la fois à transférer la chaleur des collecteurs et à stocker l'énergie. La chaleur était utilisée pour générer de la vapeur à basse pression à une température de 70°C. On y a atteint un ratio de performance (défini en l'occurrence comme kg distillés pour 2330 kJ d'énergie thermique introduite) variant légèrement autour de 10 [2], [14].

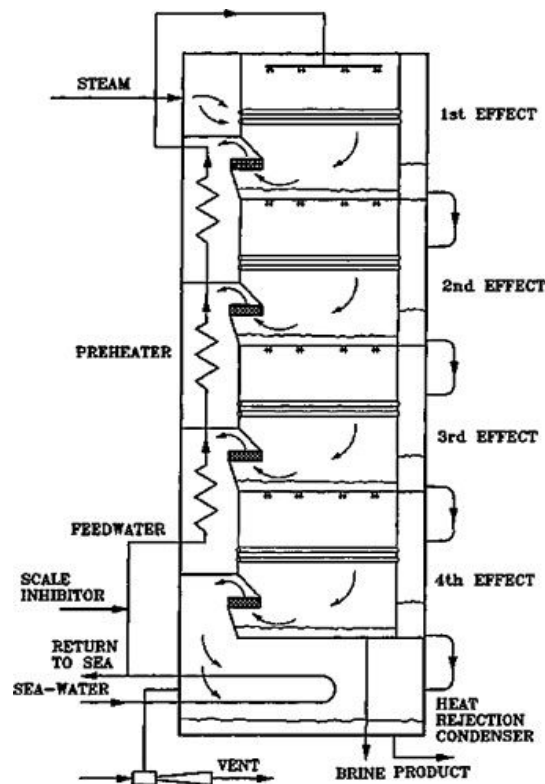


Figure 19 : Diagramme schématisé d'une configuration de distillation à empilement vertical (MES)

2.3.2 Capteur solaire-HD

Le procédé HD est un bon choix pour l'application avec l'énergie solaire thermique lorsqu'on recherche une option simple et relativement bon marché. Le coût de l'eau produite est estimé à environ 2-5 €/m³. Le procédé HD est plus efficace qu'un distillateur solaire et produit plus d'eau par unité de surface de collecteur, soit environ 20-30 l/m²/jour. Ainsi, il peut plus facilement être adapté à une capacité de 100 m³/jour. Avec l'application du multi-étapes, la consommation d'énergie thermique peut être abaissée à 100 kWh/m³[14]. Il offre également l'avantage que le procédé d'humidification ouvre la possibilité d'une application à effet de serre qui peut être intéressante pour des communautés rurales [16], [18-20]. Voir la figure 15 pour le schéma du procédé simplifié du HD. La figure 20 montre une unité HD à effets multiples de 1 m³/jour à Oman.



Figure 20 : Une unité HD à effets multiples de 1 m³/jour à Oman

2.3.3 Capteur solaire-DM

La combinaison Solaire-DM offre des avantages pour les unités autonomes de petite échelle d'environ 10 m³/jour. Entre autres, la possibilité pour la DM de fonctionner en utilisant une énergie thermique à basse température, soit environ 60-70°C (les températures plus élevées augmentent évidemment la productivité). De plus, le procédé s'ajuste sans cesse aux conditions d'entrées variables et ne nécessite pas de point de fonctionnement fixe. La nature hydrophobe des membranes DM les rend moins sujettes à l'encrassement et au calcaire que l'OI. Le procédé n'utilise pas de surfaces de transmission de chaleur métalliques coûteuses et la faible pression de fonctionnement utilisée ne nécessite pas de tuyauterie haute pression coûteuse. De tels facteurs devraient contribuer à faire baisser le prix des systèmes DM lorsque le problème de consommation importante d'énergie peut effectivement être abordé. Il semble que des progrès soient réalisables rapidement dans cette région avec la configuration multi-effets (V-MEMD) développée par Memsys (présentée plus haut), rendant possibles des RGO de 10 comme dans la DME, mais avec des matériaux de construction beaucoup moins chers.

L'institut Fraunhofer pour les Systèmes d'énergie solaire et sa société spin-off SolarSpring GmbH développent, depuis 2001, des unités de distillation membranaire à énergie solaire autonome destinées aux zones reculées. Deux systèmes différents sont disponibles : le Oryx 150, un système simple à couplage direct (pas de stockage d'énergie) avec une capacité de 150 l/jour ; et un système plus grand à deux boucles évalué à 1-1,6 m³/jour. Le stockage de l'énergie dans le système à deux boucles permet un fonctionnement de 24h, permettant ainsi une capacité de production plus grande.



Figure 21 : Unité Solar Spring Oryx 150 installée sur le toit d'un centre de santé dans une zone rurale de Tunisie.



Figure 22 : Vue arrière de l'unité Oryx 150. Le module DM à spirales est la cuve bleue sur la droite.

2.3.4 PV-OI

Grâce à la maîtrise des deux technologies impliquées - osmose inverse et panneaux PV - l'association PV-OI est probablement l'énergie renouvelable la plus courante et la plus fiable pour le dessalement. Le système PV-OI consiste en un parc photovoltaïque qui fournit l'électricité à l'unité de dessalement. Les panneaux PV fonctionnant en courant continu et les pompes OI au courant alternatif, un transformateur est nécessaire.

Le coût de l'eau produite dans les installations PV-OI est de l'ordre de 3,5 –7 €/m³ pour l'eau saumâtre et de 9 –12 €/m³ pour l'eau de mer dans les unités OI [14]. Comme le fait remarquer ProDes Roadmap [14], le coût de l'eau est bien plus élevé pour les systèmes avec des capacités inférieures à 5 m³/jour. Cependant, pour les plus grandes capacités, le coût de la production de l'eau devrait considérablement baisser. Cela devrait être facilement réalisable, les deux technologies étant maîtrisées et l'OI étant l'un des procédés qui consomment le moins d'énergie.

Le fait que OI et PV soient des technologies maîtrisées signifie qu'il y a de nombreux fournisseurs dans plusieurs pays pour chacune de ces technologies et il devrait être facile de se procurer les sous-systèmes nécessaires.



Figure 23 : Une installation PV-OI d'une capacité nominale de $2,1 \text{ m}^3/\text{h}$ d'eau saumâtre en Tunisie, installée par le Canary Island Institute of Technology, Espagne.

Ghermandi et al. [21] ont souligné que malgré un manque de modèle standard, le modèle le plus employé comprend les sous-systèmes suivants :

1. Capsule solaire (panneaux PV)
2. Unité d'extraction d'eau
3. Unité de prétraitement
4. Système haute pression (pompe, moteur et dispositif de récupération d'énergie)
5. Membranes OI
6. Transformateur CA/CC
7. Stockage électrique

2.3.5 PV-ED

Pour l'instant, on manque d'expérience en matière de systèmes ED avec de l'énergie renouvelable (ER)[14]. Seules quelques unités pilotes à des fins de R&D sont en opération. Selon ProDes Roadmap, les principaux obstacles à ce système résident dans la disponibilité limitée d'unités commerciales de petite taille, qui ne peuvent être utilisées par ailleurs que pour le dessalement de l'eau saumâtre.

Il faut noter cependant que l'ED est une technologie maîtrisée convenant au dessalement de l'eau saumâtre et relativement solide par rapport à l'OI (en terme de résistance au calcaire), ce qui suggère qu'il pourrait y avoir des prospections éventuelles pour cette technologie lorsque l'on envisage une installation pour l'eau saumâtre.

2.3.6 Vent-OI

L'OI à énergie éolienne est un procédé courant de dessalement à énergie renouvelable, étant donné que toutes deux sont des technologies maîtrisées. À cause de la nature fluctuante de l'énergie éolienne, plus fluctuante même que les PV, un réservoir-tampon d'énergie sous la forme d'une batterie et un système de contrôle dédié sont nécessaires pour stabiliser la fourniture d'énergie.

Le coût de l'eau produite par cette combinaison de technologies est d'environ 3-7 €/m³ pour les petites installations OI et jusqu'à 100 m³/jour. Pour les installations OI de capacité moyenne aux alentours de 1000-2500 m³/jour, le coût estimé est de 1,50–3 €/m³ environ.

2.3.7 Vent-MVC

Les unités MVC fonctionnant à l'éolien ont été prises en compte [22], mais ont présenté quelques problèmes et nécessitent un développement supplémentaire avant de pouvoir être commercialisées. Une des principales difficultés est que les procédés MVC sont généralement conçus pour fonctionner à un point donné, et nécessite un certain temps pour atteindre la base d'exécution, ce qui les rend difficile à coupler avec une fourniture d'énergie variable. De plus, on a constaté que les démarrages et arrêts fréquents génèrent du calcaire et un encombrement total du système [22].

2.3.8 Géothermie DME

Les avantages relatifs de la DME, un procédé à source thermique comme mentionné à la section 2.1.2, en font un choix naturel pour le couplage avec une source d'énergie géothermique. Plusieurs de ces projets sont signalés dans la documentation.

Une installation pilote de dessalement géothermique de 80m³/jour basé sur le procédé DME a été installée sur l'île de Kimolos en Grèce [23]. L'eau géothermique puisée à 188 m à une température de 61-62°C, est utilisée pour alimenter une installation DME à 2 effets empilés verticalement d'Alfa Laval. Le coût estimé de l'eau est de 1,6€/m³ [23].

Une autre référence [24] signale un projet sur l'île de Milos en Grèce, visant à construire une installation géothermique à double usage générant 470kW d'énergie électrique et 1800-1900 m³/jour d'eau distillée. Le procédé de dessalement prévu était le DME-TVC. Le rapport décrit des vastes études d'exploration géothermique et un plan de conception détaillé, mais il est difficile de comprendre si l'installation a réellement été construite et à quel stade en est le projet.

Un prototype plus récent d'un système de dessalement géothermique entendant profiter d'une énergie géothermique abondante au Mexique est décrit au [25]. Le système décrit utilise un système de distillation novateur ressemblant au procédé DME mais avec quelques modifications.

2.3.9 Géothermie HD et autres procédés thermiques

Bien que le procédé DME, avec ses variantes, soit le procédé le plus utilisé pour le couplage avec l'énergie géothermique à basse température, d'autres combinaisons restent possibles. Une expérience alliant source géothermique et procédé HD est décrite en [18], [26]. Le procédé HD peut être lié à l'utilisation de serres, une combinaison très intéressante pour l'usage agricole dans de petites communautés situées en régions arides. Une étude de cas examinant la possibilité d'utiliser cette solution en Algérie est présentée en [19].

Le dessalement direct par distillation membranaire d'eau souterraine à forte salinité de température faible à moyenne (60-90°) est une autre combinaison intéressante pas assez exploitée.

3. Décisions, données et informations avant d'envisager les technologies de mise en œuvre d'un projet de dessalement.

Le dessalement devrait être considéré comme partie intégrante d'une approche holistique de développement durable des zones rurales et reculées et uniquement après que des alternatives efficaces et moins coûteuses ont été exclues. Les projets de dessalement nécessitent un haut niveau de technologie, un coût d'investissement élevé, une forte demande en énergie et des frais de fonctionnement importants. Les coûts totaux de production (comprenant les frais d'investissements, d'énergie, de fonctionnement et taxes éventuelles) sont généralement élevés par rapport aux ressources d'eau conventionnelles et ces coûts doivent être payés par les consommateurs ou des subventions. Ainsi, avant de décider de la technologie à adopter et quelle type de source d'énergie renouvelable sera utilisé, il convient de mener un certain nombre d'études justifiant la mise en œuvre du projet de dessalement, la taille de l'installation de dessalement proposée, la qualité de l'eau produite, la disponibilité du site, etc. Pour ces études, les questions suivantes s'imposent.

3.1 Plan de gestion intégrée des ressources en eau ou étude diagnostique

L'aridité en zones rurales et reculées peut résulter d'une pénurie d'eau réelle ou de nombreuses autres raisons telles que la sécheresse, la mauvaise gestion de l'eau, des dysfonctionnements structurels, l'augmentation de la demande en eau due aux changements d'habitude des habitants, la démographie, le gaspillage, l'utilisation inefficace de l'eau, les pertes du réseau non prises en compte et dans de nombreux cas, des plans de gestion des ressources en eau non rationnels.

La décision de se lancer dans le dessalement pour l'alimentation en eau dans des zones reculées ou rurales doit être prise dans le cadre d'un plan de gestion intégrée des ressources en eau, dans lequel ont été examinées toutes les options possibles pour l'alimentation en eau dans les zones rurales reculées. Le plan de Gestion intégrée des ressources en eau doit prendre en compte la nature de la demande, le rendement de l'eau consommée, le rendement de l'utilisation de l'eau, si la demande en eau est justifiée ou peut être réduite par le mode de la demande en eau, les capacités des réseaux d'alimentation en eau (contenance et rendement de chaque système tels que réservoirs, capacités d'acheminement des conduites, systèmes de pompages et de distribution d'eau), la disponibilité de l'eau et sa distribution aux différents consommateurs. Toutes les options disponibles pour la fourniture des quantités d'eau justifiées dans les zones rurales ou reculées à partir des systèmes existants devraient être examinées, y compris le dessalement comme option alternative. Si un plan de gestion intégrée des ressources en eau n'est pas disponible ou si une zone reculée n'a accès à aucun système proche d'alimentation en eau, une étude diagnostique doit être menée pour identifier le vrai problème de la région. La question principale à laquelle il faut répondre après les conclusions de l'étude de diagnostic, est de savoir si la demande en eau ne peut être réduite ni fournie par des sources renouvelables ou tout autre ressource en eau et si la seule option est la production d'eau dessalée pour répondre de façon satisfaisante à la demande en eau.

3.2 Capacités des installations de dessalement

3.2.1 Définitions

La capacité d'une installation de dessalement est définie comme la quantité d'eau produite sur une base horaire, journalière, mensuelle et annuelle. Pour chaque capacité, les éléments suivants sont définis.

- **Production horaire** : C'est la capacité maximum de l'installation dépendant entièrement de la structure de l'installation. La production horaire peut varier en fonction de la température de l'eau salée et d'autres paramètres. Ce paramètre est de loin le plus décisif pour déterminer le coût de l'investissement. Bien entendu le coût du dessalement de l'eau n'est pas exclusivement défini par les frais d'investissement mais également par des paramètres des frais de fonctionnement et d'énergie, et pour réduire ces coûts, une optimisation de la production horaire par rapport à la production totale doit être réalisée, en tenant compte des heures de production journalière, des coûts de l'énergie selon le mode d'alimentation, etc.
- **Production journalière** : La production journalière maximale est calculée en multipliant la production horaire par le nombre d'heures de fonctionnement maximal de l'installation. En cas de fonctionnement à l'énergie solaire, la production journalière sera calculée en multipliant la production horaire par le nombre d'heures de fourniture du système solaire. Une installation avec une production horaire de 10 m³/h alimentée en électricité par le réseau aura probablement une production journalière de 240 m³/jour, tandis que la production journalière sera d'environ 80-100 m³ avec alimentation solaire compte tenu que le système solaire fournit le courant durant la journée. La production peut augmenter considérablement si l'installation de dessalement est alimentée en énergie solaire durant la journée et par le réseau électrique la nuit.
- **Production mensuelle** : Somme des productions journalières calculées pour chaque jour. La production journalière peut être différente selon les jours à cause de la température de l'eau de mer, de l'arrêt de l'installation pour maintenance, ou à cause de restriction ou de relaxation de courant.
- **Production annuelle** : La production annuelle est la somme des productions mensuelles et donne la quantité annuelle d'eau dessalée produite. La quantité annuelle est utilisée pour calculer le coût d'investissement de l'eau qui est l'un des composants du tarif de l'eau dessalée.

3.2.2 Capacité de l'installation de dessalement

La capacité de l'installation de dessalement dans les zones rurales reculées est nécessaire pour établir la différence entre les besoins en eau journaliers, mensuels et annuels et la disponibilité en eau journalière, mensuelle et annuelle des systèmes d'alimentation existants. Dans la décision de la capacité de l'installation de dessalement, les planificateurs doivent prendre en compte le coût marginal de chaque m³/jour supplémentaire qu'ils ajoutent à la capacité horaire de l'installation et la quantité d'eau dessalée que cette heure supplémentaire produira par an. Il faut rappeler que la capacité horaire de l'installation déterminera la capacité d'énergie renouvelable, et si elle est très élevée, le coût pourrait être prohibitif. La production horaire de l'installation de dessalement est décidément un paramètre très important pour déterminer le coût du projet et les planificateurs doivent mener des études précises prenant en compte tous les paramètres influant sur la capacité particulièrement les heures de fonctionnement par jour et le coût de l'énergie. Les installations de dessalement combinées aux ressources d'énergie renouvelable constituent un défi pour tout ingénieur de ressources en eau afin de réduire le coût de l'installation de dessalement et de la source d'énergie renouvelable.

3.3. Qualité de l'eau dessalée

Les caractéristiques de la qualité de l'eau sont liées à des paramètres de santé, d'esthétique et de goût qui sont déterminés par la demande des usagers. L'eau produite à vocation d'eau potable doit avoir les caractéristiques d'une eau potable spécifiée dans les directives ou standards nationaux ou internationaux. De la même façon, si l'eau est utilisée pour l'irrigation, la qualité de l'eau doit avoir les caractéristiques qui n'affectent pas les cultures à irriguer telles qu'elles sont définies dans tout manuel d'irrigation. Pour l'eau qui sera d'abord utilisée en tant qu'eau potable et pour les rejets destinés à être traités et recyclés à des fins d'irrigation, les critères de qualité de l'eau dessalée doivent exclure les ions toxiques comme le bore.

3.4 Considérations démographiques et socioculturelles

Les considérations démographiques et socioculturelles suivantes doivent être prises en compte avant et après la décision de l'implantation d'une installation de dessalement en zones rurales ou reculées.

- a. **L'interdépendance socio-technico-institutionnelle** : L'interaction entre les trois éléments : habitants, technologies et organisations, doit être parfaitement comprise et prise en compte. La technologie de dessalement doit être expliquée aux gens afin qu'ils comprennent qu'elle est comparable à un procédé physique naturel, en d'autres termes, que cela fait partie du cycle de l'eau. On devra également expliquer comment cette technologie et le projet seront mis en place, comme la provenance de l'eau brute (eau saline ou eau saumâtre), où la saumure sera rejetée, quelle quantité d'énergie sera utilisée, les coûts d'investissement, de fonctionnement et d'énergie, combien coûtera l'eau, qui construira et exploitera l'installation, leur rôle dans la prise de décision et leur rôle dans la construction et l'exploitation, et ce que l'on attend d'eux. Il faut insister sur le fait que le projet ne sera un succès que s'ils le soutiennent vraiment.
- b. **Implication des bénéficiaires** : Les organisations/personnes qui devraient exploiter une installation de dessalement doivent faire partie de la communauté locale desservie par l'installation. Si possible, ils doivent être impliqués dès la phase de planification de l'installation mais il est également nécessaire qu'ils participent au moins de la construction à l'exploitation de l'installation.
- c. **Implication des personnes lésées** : En général, les objections aux installations de dessalement proviennent de personnes lésées, comme les propriétaires de terrain sur lequel l'installation sera construite, ou de voisins dont les propriétés pourraient être dévaluées avant le projet, voire des pêcheurs qui pensent que le poisson sera affecté par les rejets de saumure et l'extraction d'eau de mer. Toutes ces questions doivent être analysées et discutées avec les intéressés dans le cadre de l'étude sur l'impact environnemental et prises en compte dans l'indemnisation pour l'expropriation des terres.
- d. **Apprentissage** : Des opportunités d'apprentissage, de sensibilisation et de formation doivent être offertes dès le début du projet pour induire le maximum de bénéfices. La durabilité du projet constitue un aspect très important de la formation des opérateurs.
- e. **Indépendance et autonomie** : Les solutions techniques, aussi intelligentes et innovantes soient-elles aux yeux des décideurs, ne doivent pas être imposées à une communauté qui les trouvent discutables.
- f. **Durabilité** : Le revenu moyen par famille, les niveaux de pauvreté, la faisabilité budgétaire, la volonté de payer pour de l'eau dessalée et les subventions du gouvernement jouent un rôle majeur dans la durabilité.
Si le revenu des populations locales ne justifie pas la mise en œuvre du projet, l'État doit par sa contribution sécuriser le projet avec les instances locales en prenant en charge les frais de fonctionnement et de maintenance. Le meilleur système pour les subventions doit être mis en place pour obtenir le meilleur scénario pour la mise en œuvre et la durabilité du projet.
- g. **Flexibilité et orientation du processus** : Les conditions générales pour l'alimentation en eau dans les zones rurales peuvent changer rapidement et sont généralement spécifiques au site. Ces conditions doivent être prises en compte lors du calcul de la demande en eau et on doit inclure toute option de flexibilité dans la conception de l'installation de dessalement.

- h. **Faisabilité** : Les objectifs et attentes des projets doivent être réalistes et faisables afin d'éviter l'échec. Les objectifs du projet doivent être acceptés par les consommateurs et les personnes préparant la planification du projet, ainsi que par les sponsors.

3.5 Questions culturelles, religieuses et égalité des sexes :

- a. Souvent, une nouvelle technologie introduite pour la première fois dans une communauté est perçue comme une intrusion incompatible avec des traditions, des structures sociales et des responsabilités de la communauté de longue date. La technologie doit être expliquée en termes simples afin que la communauté la comprenne et l'accepte comme un simple processus physique.
- b. Malgré le rôle important joué par les femmes, ce sont les hommes qui prennent les décisions et les femmes sont souvent tenues à l'écart. Ceci doit changer et les femmes doivent prendre part aux décisions concernant le développement des politiques de l'eau.

3.6 Qualité et disponibilité des ressources en eau brute

- a. La disponibilité des ressources en eau brute est un problème hautement technique. L'extraction de l'eau de mer doit être faite dans un lieu où la qualité est bonne et constante et en quantité suffisante pour satisfaire les besoins du projet. En cas d'utilisation d'eau de puits comme source d'eau brute pour le dessalement, des études/tests hydrologiques détaillés devront être réalisés afin d'assurer l'aspiration dans le puits et la durabilité pour la capacité prévue tout au long de l'exploitation. À cet effet, une étude hydrogéologique doit être menée pour vérifier que seule l'eau salée ou saumâtre est extraite des puits et que les résurgences d'eau douce ne sont pas affectées. La qualité de l'eau brute doit être constante et à taux raisonnable afin que le processus de prétraitement sélectionné soit capable de traiter l'eau de façon satisfaisante avant le dessalement dans tous les cas et dans toutes les conditions.

Les puits côtiers d'eau salée peuvent être utilisés en tant que source d'eau d'alimentation pour les systèmes d'eau de mer s'il existe une bonne connexion hydrogéologique entre la mer et le littoral. Dans ces cas, les puits sont relativement peu profonds et peuvent être des puits réguliers ou puits Ranney ou une combinaison des deux. Pour de petites installations de dessalement, les puits réguliers sont satisfaisants et meilleur marché.

Une prise d'eau de mer à ciel ouvert doit être située à une profondeur de 10-15 mètres, même à marée basse avec un niveau d'eau de 6 mètres au-dessus du fond pour éviter l'érosion des fonds marins, et au moins 4 mètres sous le niveau de la mer à marée minimale. La vitesse d'extraction doit être très lente, en dessous de 0,30 m/s, pour éviter l'aspiration de poissons nageant autour de la prise d'eau.

- b. Des analyses physiques, chimiques et biologiques de l'eau brute à la prise d'eau sont fondamentales pour la conception et l'exploitation des systèmes de dessalement pour déterminer le procédé de prétraitement et éviter l'encrassement et/ou le calcaire des membranes et évaporateurs. L'eau provenant de puits bien conçus et en bon état a une faible concentration de solides en suspension et le processus de traitement comprendra uniquement des cartouches filtrantes en omettant toute filtration intermédiaire. En cas de prise d'eau de mer à ciel ouvert, un processus de prétraitement complet sera nécessaire.

3.7 Lieu de rejet de la saumure

Le rejet de la saumure (dont la concentration en sel est bien supérieure à celle de l'eau brute) devrait de préférence se faire en mer, mais au cas où cela ne serait pas possible, elle peut être rejetée dans des puits ou des bassins d'évaporation à l'intérieur des terres. En cas de rejet dans la mer, l'emplacement des décharges devra se situer à distance suffisante de la prise d'eau de mer et orienté de façon que la forte salinité de la saumure ne soit pas absorbée par la prise d'eau. Cela nécessitera de prendre en compte également l'« excès de salinité » (la salinité excessive de l'eau de mer est diluée à 12-15 mètres du point de rejet avec une vitesse de rejet de 6,0 m/sec et une concentration de saumure à 5.8% et d'eau de mer à 3.5%) et la direction des courants marins au lieu de rejet.

Le rejet de la saumure à l'intérieur des terres est discuté en détail au point 4.8 de ce rapport.

3.8 Structures de prix et schémas financiers (faisabilité)

- a. Un projet réussi de dessalement en zones rurales ou reculées devrait réussir à amortir ses frais de fonctionnement et d'amortissement. Cela implique que les tarifs de l'eau reflètent les coûts réels de l'alimentation en eau. D'un autre côté, l'accès à l'eau potable devrait être disponible et abordable pour tous.
- b. Les principaux enjeux du dessalement dans les communautés rurales sont ainsi identifiés :
 - i. Les faibles revenus des communautés rurales.
 - ii. Capital et ressources financières limités.
 - iii. Coûts d'investissement élevés pour de tels projets.
- c. En réponse à ces difficultés, plusieurs mécanismes de soutien ne déformant pas la fonction de marché sont possibles, tels que :
 - i. Financement direct de l'infrastructure.
 - ii. Avantages financiers pour les opérateurs.
 - iii. Implication du secteur privé.
 - iv. Adoption d'un « tarif minimal » où un prix progressif est appliqué, basé sur le volume de l'eau utilisée, de manière à assurer une justice sociale parmi les usagers. Israël signale que « les centres urbains subventionnent l'alimentation en eau des communautés rurales et reculées ».

Étant donné la pauvreté dominante dans les zones rurales et reculées et en acceptant le principe que l'accès à l'eau potable devrait être disponible et abordable pour tous, la subvention des coûts d'investissement et de fonctionnement par le gouvernement central est inévitable. Cela étant, il est conseillé aux PP de considérer le financement de leurs projets de dessalement en zones rurales et reculées comme partie intégrante de leurs stratégies nationales de fourniture en eau dans le cadre de leur GIRE nationale. Il faut souligner que la durabilité du dessalement utilisant les SER dans les communautés rurales et reculées devrait faire partie intégrante d'un plan général de développement durable avec une approche holistique, et si une installation de dessalement s'avère nécessaire, cela doit être un élément déclencheur pour de futurs développements socio-économiques et environnementaux durables afin de réduire la pauvreté et le chômage tout en développant des marchés. De nombreux plans de développement peuvent s'inspirer d'héritages locaux, de l'histoire locale, de la nature, de l'écologie, de la culture indigène, de l'art et/ou de l'architecture locaux.

Les exemples de quelques pays de la région méditerranéenne confirment que seuls des gouvernements centraux peuvent prendre en charge la construction de projets de dessalement en zones rurales et reculées, soit en les subventionnant soit en prenant la responsabilité via des garanties imposées aux entrepreneurs (par des modèles de contrat CET/CAET/PPP). Dans d'autres pays (Israël), le développement de la GIRE s'est basé sur une approche holistique, intégrant les villes, les zones rurales et reculées, l'environnement, le développement, le tourisme, etc., qui ont contribué à garder les populations rurales dans leurs régions. D'un autre côté, il est vrai que dans certains pays, comme l'Algérie, cela n'a pas empêché les populations rurales et isolées de migrer vers les centres urbains pour y trouver une meilleure qualité de vie et des opportunités d'emploi, ce qui signifie que l'approche holistique doit concorder avec les attentes de la population.

3.9 Facteurs institutionnels et de contrôle

3.9.1 Facteurs institutionnels

Les facteurs institutionnels nécessaires à la promotion d'un projet de dessalement sont les mêmes que ceux qui promeuvent n'importe quelle structure de ressource en eau dans les PP, et comprennent :

- a. **Niveau décisionnel national** : Il comprend en principe les ministères et autres entités gouvernementales impliqués dans la planification et les politiques de l'eau.
- b. **Niveau d'application** : C'est normalement le rôle des organismes et départements gouvernementaux opérant sous les organes de décision et qui sont responsables de la mise en œuvre des décisions prises par les décideurs politiques. Les personnes de ce niveau seront responsables de la promotion des études, des investigations, des adjudications, de l'évaluation des offres, des contrats, de coordonner l'exécution du projet, de la commission du projet, de l'organisation de son exploitation, d'acheter l'eau aux propriétaires du projet de dessalement et de revendre l'eau dessalée à la communauté locale.
- c. **Niveau des parties prenantes** : Les communautés locales, en tant que bénéficiaires, pourraient prendre en charge le fonctionnement et la maintenance des installations d'alimentation en eau. Les relations étroites entre les parties prenantes et le niveau exécutif responsable de la mise en œuvre du projet ainsi que les organismes de décision nationaux (responsables du financement du projet) sont cruciales.

3.9.2 Facteurs de réglementation

La mise en œuvre de projets de dessalement est une procédure très complexe qui nécessite de nombreuses autorisations, telles que permis d'extraction de l'eau, permis d'évacuation de la saumure, permis de travaux côtiers et off-shore, installations d'énergie renouvelable, après une étude minutieuse de l'évaluation de l'impact sur l'environnement. Une description des EIE ci-dessous.

3.9.2.1 Étude d'évaluation de l'impact sur l'environnement.

La préparation d'une étude d'impact sur l'environnement (EIE) est une condition nécessaire à la promotion d'un projet de dessalement. L'étude comprendra, entre autres, les points suivants :

- a) Répercussion sur l'environnement marin comprenant le brassage du sable lors de la phase de construction prenant en compte les machines et les méthodes de construction. L'EIE doit inclure les mesures de protection pour diminuer ou supprimer les effets nocifs.
- b) Les répercussions sur l'environnement marin lors du processus d'extraction de l'eau, d'entraînement et de tourbillon par aspiration, ou d'épuisement et de destruction des nappes aquifères d'eau saumâtre et douce lors de l'extraction de l'eau saumâtre des nappes aquifères continentales, ainsi que l'écrasement de la vie marine sur les tamis aux prises d'eau. L'EIE doit inclure les mesures de protection pour diminuer ou supprimer les effets nocifs.
- c) Les répercussions sur l'environnement côtier, y compris la teneur en poussière de l'air ambiant durant la phase de construction. L'EIE doit inclure les mesures de protection pour diminuer ou supprimer les effets nocifs.
- d) L'impact sur l'environnement marin induit par l'utilisation des produits chimiques lors des processus de prétraitement, de dessalement et de post-traitement. L'EIE devrait inclure les mesures de protection pour diminuer ou supprimer tout effet nocif, y compris la réduction de leur niveau dans la cuve de rejet (résidus de chlore, fer, métaux en traces, anticalcaire, agents anti-moussant, rejets thermiques, phosphore, solides en suspension et composants organiques), le contrôle et la prévention des fuites de produits chimiques de l'eau de mer, des eaux saumâtres, etc., dans le sol et l'environnement marin. Le système de dispersion de la saumure devrait être évalué et des mesures de protection peuvent être proposées pour réduire les impacts nocifs sur l'environnement marin.
- e) L'impact sur l'environnement en général (émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère) provenant de la consommation d'énergie en cas d'énergie non renouvelable et les économies induites par l'utilisation d'une énergie renouvelable.
- f) Répercussions sur l'environnement provenant de la décharge des matières extraites superflues. Celles-ci pourraient être utilisées pour la construction de routes ou de digues, etc.

- g) Bruit et lumière lors de la phase de construction et lors de la phase d'exploitation, répercussions sur l'environnement et mesures de réduction du bruit et de la pollution lumineuse.
- h) Répercussions générales sur la terre, l'air et les eaux souterraines, provenant des matériaux utilisés durant la construction, le fonctionnement et la maintenance du projet.
- i) Considérations esthétiques par rapport à l'aspect de l'infrastructure et à la végétation.
- j) Tout autre aspect environnemental.
- k) MED-POL Programme de surveillance de la pollution de l'environnement marin provenant de sources et activités situées à terre : Étant donné que le programme MED-POL (évaluation de la pollution marine et organe de contrôle du Plan d'Action pour la Méditerranée) est responsable du suivi des travaux liés à la mise en œuvre du Protocole de la pollution provenant de sources et activités situées à terre (LBS), du Protocole pour la Protection de la Méditerranée contre la pollution LBS et de ses activités, des Protocoles Décharges et Produits dangereux, il faudrait demander au MED POL d'aider à la formulation et la mise en œuvre d'un programme de surveillance de l'environnement marin concerné par le rejet de la saumure et d'autres sources de pollution situées à terre, telles que remous, eaux usées. De tels programmes sont proposés dans les EIE et la mise en œuvre est faite par les autorités nationales de l'environnement en coopération avec le pollueur.

L'EIE sera effectuée conformément aux politiques nationales et guidée par les législations nationales et les critères, principes et procédures internationalement reconnus. Cela sera réalisé pour de nombreux sites et chaque EIE sera examinée plus en détail lors de la préparation de l'étude de faisabilité, pour décider de l'emplacement recommandé du point de vue des impacts technico-économiques et environnementaux.

3.10 Projets de dessalement

Un projet de dessalement est généralement constitué des systèmes suivants :

- (a) **Système d'alimentation en eau brute** : La source peut être « de l'eau de puits », ou une nappe aquifère saumâtre ou de l'eau de mer prélevée à une prise d'eau à ciel ouvert. En cas d'alimentation en eau de puits, le système doit prévoir des puits équipés de pompes et des conduites pour le transport de l'eau des puits jusqu'à l'installation de prétraitement. Dans le cas où l'eau provient de la mer via une prise d'eau à ciel ouvert, le système comprendra les têtes de prises d'eau, les conduites d'acheminement des têtes de prises d'eau vers les puits de prises d'eau, la station de pompage dans le puits et les conduites à terre, du puits à l'installation de prétraitement. Les têtes de prises d'eau doivent être correctement situées afin d'éviter l'aspiration de matériaux flottants ou de sédiments, pour garantir une alimentation suffisante en eau salée.
- (b) **Système de prétraitement** : L'objectif du prétraitement est de traiter l'eau brute en la filtrant jusqu'à la qualité requise pour le passage de l'eau à travers le système de dessalement sans aucun problème jusqu'à l'unité de dessalement. Le niveau de traitement est différent pour les différentes technologies (membranes, thermiques ou autres). La concentration des solides en suspension des sources d'eau de surface est généralement plus élevée que les sources d'eau de puits. Le prétraitement pour une source d'eau de surface peut comprendre une installation de filtrage conventionnelle ou un système de filtrage membranaire.
- (c) **Système de dessalement** : C'est le système qui retire les sels de l'eau brute (eau saumâtre ou eau de mer). Ce système peut être un « système membranaire », un « système thermique » ou « un autre système », comme indiqué en détail au chapitre 2. Le choix de la meilleure technologie de dessalement peut dépendre de la géographie, de l'environnement, de la maturité de la technologie, de l'eau brute et de la qualité de l'eau produite, de la disponibilité des technologies, de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation disponible (y compris les énergies renouvelables), de la capacité des opérateurs à faire fonctionner cette technologie, des coûts, etc.
- (d) **Système de post-traitement** : Ce système propose un traitement du perméat par ajout de minéraux nécessaires et chloration pour rendre l'eau propre à l'utilisation qui va en être faite.

- (e) **Système de rejet de la saumure** : La saumure est l'eau usée de l'installation de dessalement et sa concentration en sels est environ deux fois celle de l'eau de mer dans les cas de technologie d'osmose inverse, d'autres concentrations plus élevées que l'eau brute dépendant des taux de récupération.
- (f) **Systèmes auxiliaires** : Ils comprennent les systèmes de dosage chimique, les systèmes de traitement des eaux usées, les systèmes d'alimentation électrique, les systèmes de contrôle et d'instrumentation, etc.
- (g) **Centrale d'alimentation en électricité** : Ce système garantit l'alimentation électrique de l'installation. Cela peut être une sous-station recevant de l'électricité du réseau ou d'une source d'énergie renouvelable.
- (h) **Système d'alimentation en électricité** : Ce système alimente l'installation en électricité. La source peut être un système d'énergie renouvelable (solaire, éolienne ou géothermique) ou une installation indépendante de production électrique. Dans tous les autres cas, en plus de la fourniture réseau, la source d'énergie (renouvelable ou installation indépendante de production électrique ou une combinaison des deux), l'installation doit avoir son propre système d'alimentation électrique.

3.11 Sélection du site de l'installation de dessalement

On admet que les installations de dessalement entrant dans le Mécanisme de Soutien de la Gestion Intégrée Durable de l'Eau doivent concerner des procédés de dessalement combinés avec des Sources d'énergie renouvelable. Un des paramètres les plus importants, outre le choix de la technologie de dessalement, est le choix du site pour l'installation. Le site du projet comprend généralement les sous-zones suivantes : (a) la sous-zone des ouvrages marins, qui comprend la prise d'eau de mer à ciel ouvert et les conduites marines, (b) la zone des ouvrages terrestres, qui regroupe le puits de forage terrestre équipé de puits ou de la fosse d'admission, la station de pompage, l'eau de mer pompée par l'installation côtière et les conduites pour la saumure (c) la zone d'installation principale où sont effectués le prétraitement, les procédés OI, le post-traitement, avec les annexes et (d) la zone d'installation d'énergie renouvelable.

Le choix de l'emplacement de l'installation de dessalement est vital pour sa conception, son financement et son exploitation. Le site, ainsi que les parties à terre et en mer, doivent répondre aux critères suivants.

- (i) Il doit être situé dans un lieu où l'accès et les interconnexions avec les réseaux d'alimentation électrique, de production indépendante, de source d'énergie renouvelable et d'alimentation en eau sont techniquement et économiquement réalisables.
- (ii) L'étendue et la forme de la zone (taille et géométrie) doivent être bien choisies afin que les structures de prises d'eau, les conduites en mer, la fosse terrestre, la station de pompage de l'eau de mer, les conduites à terre, les installations principales, le système de post-traitement, le sous-système de distribution et le système de fourniture électrique (producteur indépendant [IPP] ou sous-station du réseau national) soient correctement installés et idéalement situés afin de minimiser les interconnexions civiles, électriques, de tuyauterie et autres frais,
- (iii) Il doit se situer dans un environnement marin où la quantité d'eau d'alimentation avec une eau de mer de bonne qualité, uniforme et constante, est extraite à coût raisonnable,
- (iv) Dans un lieu où la saumure, les eaux usées et autres déchets ont un minimum d'impacts nocifs sur l'environnement,
- (v) La géologie et la topographie doivent être adaptées à la construction et à l'installation des différentes structures à coûts raisonnables,
- (vi) Les réglementations environnementales, d'urbanisme, d'aménagement rural, obligations et restrictions juridiques doivent être respectées,

- (vii) L'installation de dessalement est socialement acceptée par les communautés environnantes et autres autorités et,
- (viii) Les taxes locales ne sont pas prohibitives et l'infrastructure existante rend la mise en œuvre du projet plus facile et meilleur marché.

Normalement, lors du choix des sites, plusieurs sites sont sélectionnés et après étude des plans, de la conception et des coûts ainsi que de l'environnement, le site le plus approprié au niveau technico-économique est retenu.

3.12 Coûts budgétaires et de mise en œuvre comprenant le coût total de l'eau

La mise en œuvre de projets de dessalement nécessite un budget comprenant les coûts suivants.

- a) **Coûts d'investissement** : Ils comprennent toutes les dépenses liées à la mise en œuvre du projet du début jusqu'à la mise en service. Les coûts d'investissement ont deux composantes,
 - le développement ou frais indirects, liés aux procédures financières et administratives comprenant l'ingénierie, les délivrances d'autorisations, les garanties à l'entrepreneur pour la construction et la mise en service du projet pendant la phase de développement et de construction et les garanties à l'entrepreneur F&E du fonctionnement du projet lors de la phase commerciale. Ces coûts varient de 5 à 30% selon la taille du projet.
 - les frais de construction ou coûts directs ou prix EPC, concernant la conception détaillée, la gestion de l'entrepreneur, l'achat de matériel, les conduites et équipements, l'installation de l'équipement, les matériaux et tuyaux, la réalisation des travaux publics, des travaux marins, le test et la commercialisation du projet. Les coûts directs du projet représentent 70-95% du coût d'investissement total.

Les coûts directs sont calculés en fonction de la conception du projet, des plans d'exécution, des devis, des procédés de construction, des machines, des heures nécessaires pour réaliser les projets et des coûts de matériel, de machines et des frais de personnels techniques et main d'œuvre. Un fonds de prévoyance est inclus dans les coûts directs pour les risques et produits non comptabilisés durant la phase de construction. Ces coûts directs sont donnés en coûts EPC en unités monétaires (Euros ou US\$).

Les calculs des coûts indirects sont basés sur les besoins en rémunération des personnels administratifs, juridiques, financiers, ingénieurs et de gestion, de voyages, de logement, etc. pour la préparation de la mise en œuvre du projet, le financement du projet et la supervision lors de la phase de construction.

- b) **Coûts de fonctionnement et d'entretien** Ces coûts comprennent les frais de fonctionnement et d'entretien à payer à l'exploitant du projet sur une base mensuelle ou bimestrielle et annuelle et comprennent les frais de personnel de gestion et administratif, de main d'œuvre, les frais chimiques, les consommables et pièces de rechange nécessaires à la maintenance du projet. Ils peuvent être divisés en deux catégories :
 - les frais F&E fixes, indépendants des quantités produites : frais de personnel et main d'œuvre, assurances, suivi environnemental, permis, frais administratifs, d'éclairage, de climatisation, coûts pour l'équipement et la maintenance, etc. et
 - Les frais F&E variables, proportionnels à la quantité d'eau dessalée, tels que les produits chimiques, le remplacement des équipements de dessalement, etc. Ces coûts sont exprimés en unités monétaires en US\$/m³ ou US\$ par an.

c) **Coût de l'énergie** : C'est le coût de l'énergie nécessaire pour le fonctionnement de l'installation de dessalement, pour produire la vapeur et alimenter les pompes dans les unités de dessalement et faire fonctionner les pompes dans les installations d'osmose inverse. Dans les deux cas, le coût de l'énergie est proportionnel à la quantité d'eau dessalée produite.

d) **Coût total de l'eau dessalée** : Le coût total de l'eau dessalée est exprimé en unités monétaires US\$/m³ ou Euros/m³ et il est égal au calcul résultant de la somme des investissements annuels, plus les frais F&E, le coût énergétique annuel, le tout exprimé en unités monétaires par an (US\$/an ou Euros/an) divisé par le volume de l'eau dessalée produite en une année. Le coût d'investissement annuel est l'amortissement sur la vie économique du projet, en utilisant le taux d'intérêt du capital emprunté.

e) **Facteurs clés affectant les coûts du projet** : Les facteurs clés affectant les divers frais (investissement, F&E et électricité).

- Économie d'échelle. Plus le projet est grand, plus le coût unitaire de l'eau sera bas.
- Coefficient de disponibilité du projet : Coefficient de disponibilité du projet (défini comme le pourcentage d'heures du total annuel de fonctionnement du projet ou le pourcentage d'eau dessalée produite par an par rapport à la production annuelle maximale moyenne. Bien entendu dans le cas de projets de dessalement associés à une source d'énergie renouvelable (solaire sans stockage d'énergie), la disponibilité du projet sera très faible, aux environs de 40-45%, ce qui augmente le coût de l'investissement. Pour ces raisons et afin de réduire le coût unitaire d'investissement, l'alimentation en énergie pourrait être fournie par les sources d'énergie renouvelable durant la journée (pour le solaire) et par le réseau durant la nuit.
- Qualité de l'eau produite : Plus la qualité de l'eau dessalée est élevée, plus le coût est élevé. Le retrait du bore et d'autres paramètres nécessitent d'autres procédés augmentant les coûts d'investissement, de F&E et d'énergie.
- Qualité de l'eau brute : La qualité de l'eau brute influe sur les coûts de dessalement surtout lorsque l'on utilise la technique de l'osmose inverse (TSD, température, charge organique, nutriments, silice-bore, etc.).
- Prise d'eau brute et méthodes d'élimination de la saumure : La prise d'eau brute et l'évacuation de la saumure dépendent du site et le coût peut être abaissé en choisissant le site le plus adapté.
- Risques du projet : Il y a de nombreux risques qui ne sont pas entièrement dépendants du propriétaire du projet mais dépendants d'autres paramètres, tels que les autorisations, la disponibilité du site, les risques de fourniture en électricité, de construction, de sources d'eau, les risques technologiques (associés à la disponibilité des technologies), de contrôle (changements des besoins en qualité de l'eau, des tarifs de l'électricité, de rejet des eaux usées, etc.), risques opérationnels, de demande en eau dessalée et risques financiers. Tout cela doit être pris en compte lors de la préparation des coûts d'investissement et de fonctionnement et lors de la formulation des tarifs de l'eau dessalée.

Les coûts d'investissement préliminaires (directs et indirects), qui comprendront des fonds de réserve pour les mesures de protection de l'environnement pourraient être pris en compte dans les projets préliminaires de devis pour chaque système, en se basant sur les coûts des prestations des fournisseurs et entrepreneurs. Les coûts F&E peuvent être établis en suivant les exigences du manuel F&E concernant le fonctionnement et l'entretien, où le coût de l'énergie sera calculé en utilisant la consommation d'énergie spécifique* qui sera garantie par le concepteur.

* Consommation d'énergie spécifique : C'est l'énergie totale nécessaire à l'installation pour l'énergie de pompage, l'éclairage, le chauffage et la climatisation afin de produire un mètre cube d'eau dessalée.

f) Calcul de la production horaire, mensuelle et annuelle du projet de dessalement : Pour le calcul du coût unitaire d'eau dessalée, il faut connaître le coût total annuel (méthode de calcul ci-dessus) ainsi que la production annuelle d'eau. La production annuelle d'eau salée doit être calculée en utilisant la production horaire multipliée par la disponibilité de l'installation**.

** La disponibilité de l'installation est le résultat de la division du nombre total d'heures pendant lesquelles l'installation pourrait fonctionner par le nombre total moyen d'heures de fonctionnement par an. La moyenne de la disponibilité de l'installation, pour une installation sans source d'énergie renouvelable est d'environ 90 à 95 pour cent, tandis que pour les installations dépendant entièrement de la source solaire renouvelable, la disponibilité tourne autour de 40-45%.

4. Lignes directrices pour le filtrage et l'évaluation des options MTD de dessalement destinées en priorité aux zones rurales

Ce point vise à présenter les facteurs les plus importants à prendre en considération pour le filtrage et le choix des meilleures technologies de dessalement par énergie renouvelable pour les communautés rurales et reculées.

4.1 Évaluation des ressources en eau disponibles et des caractéristiques de la demande

Une approche rationnelle du processus de filtrage et de sélection des meilleures technologies parmi les technologies candidates disponibles doit commencer par une évaluation globale des ressources en eau disponibles ainsi que par une évaluation des caractéristiques de la demande en eau sur le site proposé. (Voir chapitre précédent) Cette information a une influence directe sur la sélection des meilleures technologies à mettre en œuvre. Compte tenu du coût relativement élevé de l'option de dessalement pour la fourniture en eau, une évaluation minutieuse des ressources en eau disponibles en termes de quantité et de qualité, combinée à la connaissance détaillée de la demande en eau est essentielle pour établir un *coût d'opportunité* des différentes options technologiques examinées. Par exemple, de l'eau saumâtre disponible en quantité suffisante sur un site près de la mer rend le dessalement de l'eau de mer moins intéressant. De la même façon, le manque de ressources conventionnelles en eau ou eau saumâtre peut justifier le coût du dessalement de l'eau de mer. La connaissance ainsi acquise offre le premier facteur majeur d'un processus de sélection rationnelle. De plus, ces deux éléments (ressources disponibles et demande en eau) sont nécessaires pour faire ressortir les options disponibles pour une approche de gestion intégrée de l'eau. Par ailleurs, l'importance évidente de la taille exigée pour l'installation, la connaissance détaillée de la demande en eau et ses variations dans le temps sont également essentiels pour comprendre les disparités probables entre la fourniture et la demande en eau, et entre la source d'énergie et la demande. Cela aura évidemment un impact sur les spécificités de conception et de technologie, ainsi que sur les besoins en stockage. La multitude des îles et des villages en bord de mer autour de la Méditerranée, avec des afflux saisonniers de touristes importants, sont un type ou une classe importante de zone reculée où le dessalement est ordinairement utilisé. C'est un type économiquement important d'utilisateurs du dessalement pour les pays respectifs puisqu'ils représentent une contribution importante à l'économie locale. En général, les variations saisonnières de population sur un site candidat et leur impact sur la demande en eau doivent être bien compris.

4.2 Évaluation des sources d'énergie renouvelable disponibles et raccordement au réseau

L'étape suivante la plus importante dans ce processus est de mener une vaste étude des ressources disponibles en énergie, en se concentrant particulièrement sur les sources d'énergie renouvelables si la fourniture en électricité n'est pas disponible. À ce stade, une compréhension précise des SER disponibles et de leurs caractéristiques qualitatives et quantitatives est nécessaire. L'intensité et le degré de variabilité des sources examinées doivent être pris en compte afin de mesurer les avantages respectifs des options disponibles.

L'examen du type de source d'énergie renouvelable disponible doit être effectué afin d'atteindre l'objectif d'une meilleure durabilité de l'environnement et d'être un moteur pour le choix de la technologie de dessalement. Par exemple, la basse température des sources d'énergie thermique favorise la sélection de procédés de dessalement

thermiques plutôt que d'OI, même si la consommation d'énergie SWRO est plus faible. Cependant, si l'on dispose d'eau saumâtre, la différence de coût entre le dessalement thermique et l'OI doit être prise en considération.

Ainsi on peut arriver à une conclusion en tenant compte du processus de dessalement seul et arriver à une autre en tenant compte du type de source d'énergie renouvelable. Afin de donner un exemple plus concret, s'il est décidé, sur la base de la disponibilité des ressources en eau et de la demande locale, qu'une installation de dessalement est nécessaire, une comparaison des prix des processus en concurrence se focalisant uniquement sur les processus, peut mener à la conclusion que l'OI est la meilleure option. Si, cependant, un réservoir géothermique à basse température est disponible et que le site n'est pas connecté au réseau électrique, il peut s'avérer préférable d'opter plutôt pour un procédé thermique.

Plusieurs SER différentes peuvent être disponibles sur un site donné. Les côtes méditerranéennes bénéficient généralement de nombreuses journées ensoleillées ainsi que de vitesses de vents raisonnables permettant l'utilisation des éoliennes pour l'électricité. Dans ces cas, il faut mener une analyse économique des options disponibles prenant en compte les caractéristiques spécifiques du site des sources. Cela étant dit, il n'est pas recommandé de sélectionner la source d'énergie à partir d'une liste de candidats disponibles indépendamment du processus de dessalement. Une liste préliminaire de technologies possibles devrait être établie à des fins de comparaison. Enfin, il faudrait à ce stade décider du type de la source d'énergie, à savoir fournir de l'énergie thermique ou électrique. Une approche hybride combinant les deux sources du même type (par ex. PV solaire et éolien) peut également être adoptée comme moyen de pallier aux variabilités inhérentes de chaque source individuelle.

Enfin, les résultats de l'évaluation des ressources d'énergie renouvelable peuvent faire apparaître la nécessité de disposer d'une source électrique de secours comme un générateur diesel pour couvrir les périodes de faible disponibilité énergétique. Le besoin et le type de stockage de l'énergie sont intimement liés au type de procédé et devraient ainsi être abordés à un stade ultérieur après une liste de sélection des processus de dessalement.

4.3 Liste de sélection des procédés de dessalement basée sur les SER disponibles

L'étape précédente d'identification, de caractérisation et de sélection des SER devrait permettre d'éliminer tous les procédés de dessalement qui ne conviennent pas au type d'énergie choisi. La décision d'adopter une SER mécanique ou électrique élimine les procédés thermiques et sélectionne : OI, ED, et MVC. Parmi ces options, l'OI est le plus économique pour le dessalement de l'eau de mer. Le procédé MVC consomme plus d'énergie mais est généralement plus solide que l'OI, car comparativement, il nécessite un prétraitement minimal. Les membranes OI sont sujettes à l'encrassement et au calcaire et pardonnent moins les erreurs des opérateurs. Pour les installations d'eau saumâtre dans les zones reculées, le procédé ED est très intéressant car plus solide que l'OI et bien adapté aux installations de petite taille et à maintenance minimale dans les zones reculées.

Si, d'un autre côté, on retient une SER thermique à faible température, les trois procédés précédents ne sont plus pertinents et les candidats potentiels sont MSF, DME, TVC, DM, HD et les distillateurs solaires. Les trois derniers procédés sont généralement adaptés aux systèmes à petite échelle jusqu'à environ 5 m³/jour.

4.4 Maîtrise et niveau de déploiement des procédés

La maîtrise du procédé sélectionné se reflétera sur le niveau de risque associé au projet. Les procédés novateurs peuvent avoir des caractéristiques attrayantes, ouvrant de nouvelles possibilités et introduisant parfois des améliorations remarquables de performance, mais ils sont particulièrement difficiles à recommander pour les applications rurales et reculées. La nature des sites ruraux et reculés exclut l'accès facile à l'assistance technique et à des superviseurs et opérateurs hautement qualifiés. Ce facteur tend à favoriser des technologies approuvées et

testées pour des solutions fiables aux demandes urgentes en eau dans les zones rurales et reculées. Néanmoins, les gouvernements et les décideurs locaux devraient être conscients des développements potentiels de la technologie et des possibilités qu'ils offrent. Il est donc recommandé que les décideurs adoptent une politique de fonds alloués et d'encouragement pour tester de nouvelles technologies prometteuses pour en établir la fiabilité, en comprendre les besoins en maintenance et être convaincus de leur applicabilité aux conditions locales.

En résumé, les facteurs suivants doivent être pris en compte.

- La fiabilité d'un procédé de dessalement est de la plus haute importance, même pour le coût unitaire total du procédé, lorsque les projets de dessalement visent à fournir de l'eau potable.
- La technologie de dessalement connaît un développement rapide et il est recommandé de suivre les progrès des procédés de dessalement de pointe.
- Un procédé peut être considéré comme maîtrisé/éprouvé s'il a été commercialisé avec succès pendant \geq 3 ans et recommandé par des professionnels de l'eau qui l'utilisent.
- Dans tous les cas et afin d'augmenter la fiabilité de tout procédé de dessalement, une installation devrait être conçue avec au moins deux lignes parallèles d'une capacité de 50% chacune, afin de réduire le risque d'arrêt total.
- Les procédés novateurs peuvent avoir des caractéristiques attrayantes, ouvrant de nouvelles possibilités et introduisant parfois des améliorations remarquables de performance, mais ils sont particulièrement difficiles à recommander pour les applications rurales en attendant qu'on les maîtrise. Afin de transférer les procédés novateurs, l'investissement devrait être contracté sous forme de CET ou CAET afin que le risque soit supporté par l'investisseur. Les investisseurs préfèrent investir dans des installations pour les zones rurales et reculées plutôt que dans les villes puisque le risque d'investissement dans les petites installations est minime par rapport aux grandes et méga installations.
- Pour réduire le risque de technologies innovantes et immatures dans les zones rurales, une technologie maîtrisée et testée peut être examinée à côté d'une nouvelle technologie. Cela réduira les risques de dépendance totale par rapport à la technologie novatrice. Le fournisseur de la nouvelle technologie offrira les garanties nécessaires de fonctionnement et de compensation en cas d'échec.

4.5 Besoins en prétraitement

Les procédés de dessalement diffèrent au niveau du prétraitement nécessaire pour une exploitation stable et une longue vie de l'installation. Les procédés membranaires sont généralement plus sensibles que les procédés thermiques, et parmi les procédés membranaires, l'OI a tendance à être plus sensible à la qualité d'alimentation, surtout en ce qui concerne la présence de fer, silice, fluorure, charges organiques, etc. dans l'eau d'alimentation. Les installations OI alimentées par des prises d'eau à ciel ouvert nécessitent des prétraitements consistant en un dosage et une filtration chimiques. De plus, le nettoyage périodique des membranes est nécessaire sur la base des performances de l'installation ainsi qu'un traitement fréquent des filtres et une désinfection régulière des systèmes de prise d'eau. Il est évident qu'un bon niveau de compétences est nécessaire pour le fonctionnement sans encombre des installations OI. Lorsque la géologie locale du site permet l'utilisation de puits côtiers comme puits d'eau d'une installation SWRO, les besoins en prétraitement peuvent être moins exigeants et cette option est préférable chaque fois que cela est possible. De récentes expériences dans plusieurs installations SWRO exploitées ou supervisées par WESCO en Arabie Saoudite ont montré que souvent, la plupart des réactifs comprenant coagulants, chloration et dosage d'acide, peuvent être réduits ou éliminés sans aucun effet négatif sur les installations OI tout en réduisant l'impact sur l'environnement et en abaissant les coûts de fonctionnement. Cela ne peut bien sûr être établi qu'au cas par cas et les possibilités doivent être examinées installation par installation. Les installations d'eau saumâtre à récupération élevée sont souvent conçues pour dépasser les limites de la solubilité de certains sels légèrement solubles présents dans l'eau d'alimentation, et dans ce cas, l'utilisation

d'anticalcaire est sans doute nécessaire. De récentes innovations technologiques comprennent les installations SWRO ou OI saumâtre sans aucun procédé chimique dans le prétraitement, à la fois économique et respectueux de l'environnement et plus faciles à gérer.

Le procédé ED est généralement plus solide que l'OI, nécessitant un prétraitement moins rigoureux. Cela en fait une option intéressante pour les installations d'eau saumâtre en zones rurales et reculées ayant peu d'accès à l'assistance technique ou aux opérateurs qualifiés. La distillation membranaire, grâce à la nature hydrophobe de sa membrane, est relativement résistante à l'encrassement par rapport à l'OI et nécessite ainsi peu de prétraitement ; cependant une attention accrue est nécessaire lors de la mise en route de l'installation.

Le volume de l'eau produite et la disponibilité des sources d'énergie renouvelable sont les facteurs les plus importants dans le choix d'une combinaison de technologie de dessalement et de la source d'énergie renouvelable. Le volume d'eau produit détermine la taille de l'installation de dessalement et l'énergie requise. Bien évidemment pour les grandes installations de dessalement, les besoins en énergie sont très importants, ce qui rend non réalisable économiquement le mariage de l'installation avec des sources d'énergie renouvelable (puisque l'installation de dessalement et la source d'énergie renouvelable seront très grandes). Pour limiter la taille de l'installation de dessalement et celle de l'énergie renouvelable, on pourrait utiliser la nuit l'énergie du réseau.

4.6 Niveau de compétences requis

Une des questions relative à la maîtrise de la technologie et aux besoins en prétraitement qui est un facteur important pour la sélection et la recommandation d'une technologie, est la relative simplicité de l'exploitation de l'installation par rapport au niveau de compétences disponibles dans les communautés rurales. Cependant, étant donné que les installations de dessalement dans les zones rurales et reculées sont généralement sélectionnées pour leur petite taille et leur simplicité de fonctionnement, le besoin en connaissances techniques pour faire fonctionner ces installations est faible.

Néanmoins, une formation appropriée peut être offerte aux communautés locales lors de l'étape de commercialisation (même dès la conception de l'installation si possible) et régulièrement après le démarrage de l'installation, en matière de gestion, d'exploitation et de maintenance de routine. Ce développement de capacité devrait doit se faire concrètement par la familiarisation au projet et aux concepts de la technologie de dessalement et des SER associées. De plus, une assistance du prestataire de service et/ou du concepteur devrait être assurée surtout pour des situations particulières (par ex. panne d'une tuyauterie ou pompes à haute pression, etc.) Sinon une assistance efficace pour des pannes irrégulières et importantes peut être fournie par des centres techniques qui peuvent être appelés à tout moment.

Le personnel minimum requis dans de tels projets pour assurer un fonctionnement efficace et ininterrompu des installations devrait comprendre

- un Gestionnaire d'installation, avec une formation minimum pour le fonctionnement quotidien de l'installation
- un Experts en maintenance (petite équipe d'1 ou 2 personnes au niveau central intervenant à la demande pour un certain nombre d'installations DES)
- des Spécialistes au niveau central comprenant des experts en pompes haute pression, des experts en informatique pour l'automatisation, des chimistes et des experts en science des matériaux.

Il a également été suggéré qu'en cas de manque de compétences du personnel local, un schéma PPP pourrait être choisi pour faire fonctionner l'installation de dessalement et éventuellement augmenter les capacités du personnel local.

4.7 Options de stockage de l'énergie contre stockage de l'eau

Les installations de dessalement sont presque invariablement conçues pour fonctionner à des points fixes ou à faibles variations (saisonniers), fournissant de l'énergie fixe à des taux fixes. Cela contraste nettement avec la nature de nombreuses SER, solaires ou éoliennes, marquées par des variations passagères, diurnes ou saisonnières. Cela rend nécessaire de stocker l'énergie et de prévoir un système de tampon. Le stockage tampon se réfère à une faible quantité de stockage d'énergie pour lisser et éliminer les variations passagères et éphémères de la source d'énergie. De plus longues interruptions d'énergie, comme l'absence d'énergie solaire durant la nuit, ne peuvent être traitées par le tampon et nécessitent un stockage à plus grande échelle. L'évaluation des SER disponibles mentionnées ci-dessus devrait fournir une image claire du degré de variabilité des sources proposées sur diverses échelles de temps. Les intermittences longues et fréquentes à court terme au rythme du taux de fourniture en énergie des SER augmentent les besoins en stockage tampon.

Le stockage de l'électricité n'est pas pratique sur la base de la technologie actuelle, tandis que, dans les cas de SER, le stockage de l'eau peut être plus efficace, particulièrement en zones rurales ou reculées, où les fournitures en eau sont relativement faibles et où les besoins en stockage de l'eau entraînent donc de faibles coûts d'investissement. D'un autre côté, le stockage de l'énergie thermique étant plus économique, la balance penchera en faveur d'un type d'énergie thermique d'une SER et d'une combinaison de procédés thermiques.

L'énergie géothermique en particulier fournit de l'énergie à un taux et dans des conditions de fonctionnement virtuellement constant, ce qui a l'avantage d'écartier la nécessité de stocker l'énergie.

Compte tenu du coût total de l'installation de dessalement et des SER ne fonctionnant que lorsque celles-ci sont disponibles, on peut dire que les deux seront le double, voire plus, de la capacité journalière nécessaire. La capacité et les tailles des installations SER peuvent être réduites de beaucoup si une énergie hybride est disponible en utilisant les SER durant leur rendement maximum (par ex. énergie solaire durant la journée) et hydrocarbures (diesel) ou réseau électrique (si disponible) en substitution lors de leur faible rendement. Cette solution doit être soigneusement analysée pour montrer qu'elle est plus rentable.

4.8 Évacuation de la saumure

4.8.1 Méthodes d'évacuation de la saumure et comparaison

Dans les régions côtières, la saumure peut être dispersée dans la mer. L'évacuation de la saumure est un élément crucial et de la plus haute importance pour les installations de dessalement d'eau saumâtre dans les terres, qui doit être pris en compte lors du choix de l'emplacement de l'installation et de la technologie de dessalement. La technologie de dessalement avec une très faible récupération entraînera comparativement le rejet d'un grand volume de saumure. L'OI l'emporte sur les procédés ED, MSF et DME lorsque l'évacuation de la saumure est problématique. Dans les installations de dessalement terrestres, la saumure peut être dispersée par n'importe laquelle des techniques suivantes :

- Techniques de zéro rejet liquide par méthode thermique.
- Traitement VSEP.
- Injection de la saumure.

- Bassin d'évaporation.
- Utilisation de la saumure pour la production agricole et l'aquaculture
- Bassin d'évaporation utilisant des mécanismes d'évaporation renforcés.

a. Concentrateurs de saumure (évacuation de la saumure par les techniques de zéro rejet liquide par méthode thermique) :

La saumure générée par l'installation de dessalement peut être concentrée en utilisant des concentrateurs ou évaporateurs de saumure pour produire quasiment zéro rejet. Même si cette option semble idéale pour l'évacuation de la saumure, elle n'est pas recommandée à cause de son investissement très important, associé à des coûts F&E élevés et à la nécessité d'un personnel qualifié.

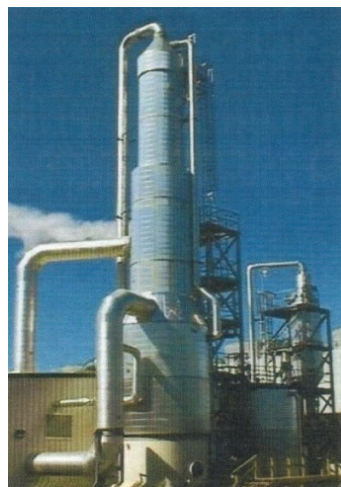
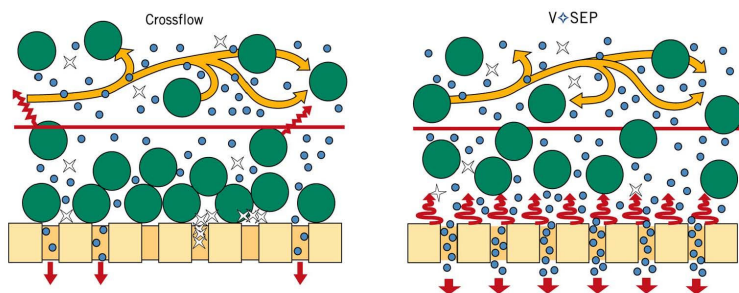


Figure 24 : Concentrateur ionique et cristalliseur de saumure de l'usine électrique Ironwood AES.

b. Concentrateurs de saumure (évacuation de la saumure par traitement VSEP) :

New Logic Research, à Emeryville, Californie, a développé un nouveau système breveté de filtrage membranaire par vibration non limité par la solubilité des sels légèrement solubles contrairement à la technologie membranaire conventionnelle par osmose inverse, qui est capable de récupérer un taux très élevé d'eau traitée à partir de saumure. Ce procédé est appelé VSEP (Vibration Shear Enhanced Process: application d'intenses ondes vibratoires au niveau de la surface membranaire). Le VSEP utilise une vibration de torsion à la surface de la membrane créant une énergie de cisaillement à la surface de la membrane. Cela entraîne une forte réduction de l'encrassement colloïdal et de la polarisation de la membrane dus à la concentration de la saumure. De plus, les taux de VSEP sont 5 à 15 fois plus élevés en terme de GFD (gallons par pied carré de la surface membranaire) comparé à d'autres membranes OI conventionnelles. L'onde sinusoïdale se propage de la surface de la membrane aux particules en suspension au-dessus de la surface membranaire, permettant un transport des fluides liquides à travers la membrane.



Fluid Dynamics Comparison between VSEP and Conventional Crossflow Filtration

Figure 25 : VSEP Comparaison de la dynamique des fluides



Figure 26 : Module VSEP

New Logic a mené un test pilote de plusieurs projets et fourni quelques installations commerciales VSEP où l'objectif était de réduire le volume du rejet des systèmes membranaires à OI. Les résultats ont montré qu'il est possible de récupérer 99% de la saumure avec seulement 1% de rejet. Cependant, pour une récupération à 99%, un système VSEP à deux étages est nécessaire, dont le coût est très élevé. Le système VSEP n'est pas recommandé pour les installations rurales de dessalement avec rejet de saumure, car l'investissement est énorme, et il nécessite des coûts F&E élevés et des personnels qualifiés.

c. Injection de la saumure :

Le rejet de saumure par injection dans les puits est une méthode possible d'évacuation de la saumure à moindre coût. Cependant, le rejet de saumure par injection dans les nappes aquifères a été jugé dangereux par les hydrogéologues, car l'injection de saumure peut détruire la nappe aquifère dans laquelle elle est pompée et compromettre son exploitation à long terme. Il existera toujours des risques de contamination de la nappe aquifère dans le futur puisque la prévention des fuites ne peut pas toujours être garantie pour de nombreuses raisons, l'une d'entre elles étant les fissures qui pourraient se développer à cause des activités tectoniques. La décision d'un puits d'injection de rejet de saumure doit être prise après une enquête hydrogéologique détaillée.

d. Évacuation de la saumure par bassin d'évaporation :

L'évaporation solaire est une méthode bien établie pour extraire l'eau de la saumure. Les bassins d'évaporation pour le rejet des eaux usées sont utilisés dans le monde entier et particulièrement dans les régions relativement chaudes, avec un climat sec, des taux élevés d'évaporation, et un faible coût de terrain. Les bassins d'évaporation solaires sont utilisés dans de grandes installations de dessalement (Salbook & Bouyeb) d'une capacité de 60 000 m³/jour dans la région de Riyadh (KSA).

Par conséquent, pour le dessalement rural où l'accès à la mer n'est pas possible, les bassins d'évaporation sont plus adaptés pour les raisons suivantes :

- Leur construction est relativement facile et simple.
- Des bassins d'évaporation bien construits nécessitent peu de maintenance et peu d'attention de la part de l'opérateur par rapport à une installation mécanique.
- Aucun équipement mécanique n'est requis à part les pompes pour transporter les eaux usées au bassin.

- Pour de plus petits flux, les bassins d'évaporation sont souvent les moyens de rejet les moins coûteux, surtout dans les régions à fort taux d'évaporation et faible coût de terrain.

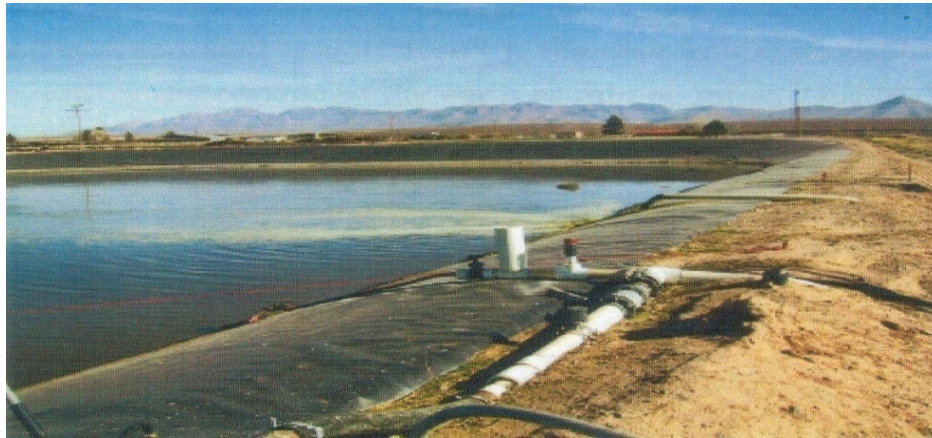


Figure 27 : Bassin d'évaporation à double revêtement synthétique et système de détection des fuites au Nouveau-Mexique.

Malgré les avantages intrinsèques des bassins d'évaporation, certains désavantages, décrits ci-dessous, peuvent en limiter l'application :

- Ils peuvent nécessiter de grandes parcelles de terrain s'ils sont situés dans un lieu où le taux d'évaporation est faible ou le taux de rejet élevé.
- Les besoins en revêtement d'argile imperméable ou synthétique comme le PVC ou le HDPE augmentent sensiblement les coûts des bassins d'évaporation.
- Les eaux d'infiltration de bassins d'évaporation de mauvaise qualité peuvent contaminer les nappes d'eau potable.
- Petite économie d'échelle pour cette option de rejet intensif.

e. Utilisation de la saumure pour la production agricole et l'aquaculture

Une des alternatives pour le rejet de la saumure est de l'utiliser pour l'agriculture ou l'aquaculture. Cette technique nécessite des installations supplémentaires qui peuvent être considérées comme un projet séparé de l'installation en elle-même. Cette option, si elle est correctement mise en œuvre, créera de l'emploi pour les locaux, des opportunités pour les investisseurs potentiels et servira de modèle pour le rejet de saumure des installations de dessalement terrestre.

La technique implique quelques-uns ou tous les éléments suivants :

- Construction d'une ferme d'algues.
- Construction d'une exploitation piscicole.
- Plantation d'halophytes comme le panicum antidotal

Idéalement, la saumure de l'installation de dessalement devrait d'abord être dirigée vers la ferme d'algues, où une bonne qualité d'algues peut être produite et récoltée quotidiennement. L'algue peut être utilisée pour nourrir les poissons, animaux ou produire de l'urée verte. L'excédent d'eau de la ferme d'algues peut ensuite être dirigé vers l'exploitation piscicole, où on peut élever une variété de poissons comme le Tilapia. Enfin, la saumure enrichie de la ferme piscicole peut être utilisée pour irriguer des plantes tolérantes au sel (halophytes) comme la panicum antidotale. On estime que la récolte pourrait avoir lieu plusieurs fois par an. Le panicum antidotale peut être utilisé pour le fourrage et offre de bonnes protéines. Les eaux d'infiltration des fermes/bassins d'évaporation peuvent contaminer les nappes d'eau potable sous-jacentes.

Cependant, une étude détaillée de faisabilité doit être menée de cas en cas.

f. Rejet de saumure dans des bassins d'évaporation utilisant des mécanismes d'évaporation renforcée :

La taille du bassin d'évaporation dépendra du taux auquel la saumure rejetée est évaporée. S'il était possible d'augmenter/améliorer le taux d'évaporation naturelle, la taille des bassins d'évaporation pourrait être réduite. Une telle réduction offrirait des économies substantielles sur le coût de construction des bassins.

Les méthodes pour améliorer l'évaporation naturelle des bassins d'évaporation comprennent :

- évaporation par pulvérisation
- turbulences dans le bassin ;
- faire passer la saumure sur des surfaces inclinées rugueuses ;
- créer un débit d'air au dessus du bassin

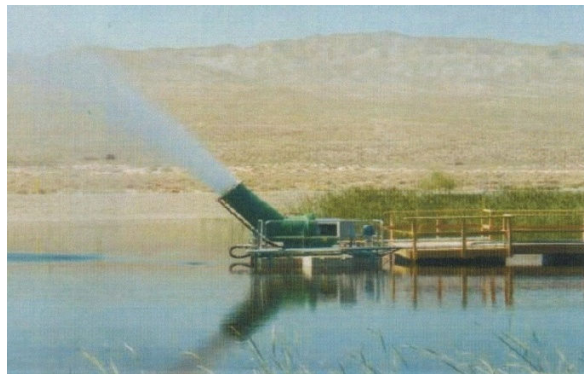


Figure 28 & Figure 29 évaporateur Turbo-Mist en fonctionnement

Il a été prouvé que l'évaporation par pulvérisation réduit la taille du bassin d'évaporation d'un sixième. Cette technique nécessite de l'énergie pour le fonctionnement continu des évaporateurs turbomist et est adaptée aux hauts-plateaux. Le transport par le vent de la saumure pulvérisée peut entraîner des dépôts de sel autour des bassins d'évaporation, provoquant d'éventuels problèmes écologiques.

g. Tableau de comparaison des rejets de saumure dans les installations terrestres : Le tableau ci-dessous montre les options disponibles pour les rejets de saumure.

Description	Coût d'investissement	Frais F&E	Compétences F&E requises	Impact environnemental	Préférence
Rejet liquide zéro (thermique)	Très élevé	Très élevé	Élevé	Modéré	Sixième
Traitement VSEP	Élevé	Élevé	Élevé	Très bas	Cinquième
Injection de la saumure	Bas	bas	Zéro	Bas/Modéré	Deuxième

Bassin d'évaporation	Bas	bas	Zéro	Très bas	Premier
Production agricole et aquaculture	Modéré	Modéré	Modéré	Élevé	Troisième
Bassin d'évaporation utilisant des mécanismes d'évaporation renforcée.	Modéré	Modéré	Bas	Bas	Quatrième

4.8.2 Généralités sur le rejet de saumure

Par expérience, la méthode la plus appropriée pour le rejet de saumure des installations de dessalement en zones rurales et reculées est l'utilisation de bassins d'évaporation, à cause de leur production de saumure limitée (basé sur la supposition que dans la plupart des zones rurales et reculées le dessalement provient de l'eau saumâtre qui bénéficie d'un taux de récupération jusqu'à 90% du volume de l'eau d'alimentation. Ainsi, seul 10% de l'eau d'alimentation est perdue en saumure. La facilité relative de disposer de terrains en zones rurales et reculées et le faible coût d'investissement par rapport à d'autres méthodes de rejet font de cette option la plus réalisable.

Les injections de saumure également faisables techniquement et rentables dans des zones offrant place de place pour les bassins nécessitent d'importantes études et enquêtes hydrogéologiques afin de vérifier que la saumure sera confinée et ne causera pas de dommages aux nappes d'eau fraîche. Vu les hauts niveaux d'études hydrogéologiques requis et le risque important de pollution des nappes d'eau fraîche, l'injection de saumure doit être prise en compte après l'exclusion de toute autre méthode et après avoir vérifié que le risque pour les nappes d'eau fraîche est faible ou nul.

Une autre approche de rejet de saumure qui pourrait être examinée pour les communautés locales, est sa réutilisation dans l'agriculture et l'aquaculture. Un des gros désavantages en est que l'utilisation de la saumure en agriculture dégraderait la qualité du sol et il faudrait 3-4 fois le volume d'eau salée pour nettoyer le sol des sels.

Dans les régions côtières, la méthode de rejet la plus rentable est la dispersion dans l'eau en utilisant des déversoirs avec diffuseurs soigneusement conçus pour aider à la dispersion de la saumure dans l'environnement marin avec un minimum d'impacts sur l'environnement. Les exigences du programme MED-POL doivent être prises en compte dans la conception des systèmes de rejet de la saumure, par une évaluation de l'impact sur l'environnement. Le programme MED-POL (composant de surveillance et d'évaluation de la pollution marine du PAM) est responsable du suivi des travaux liés à la mise en œuvre du Protocole de sources de pollution d'origine terrestre, du Protocole de surveillance de la mer Méditerranée contre la pollution due à des sources et des activités d'origine terrestre (1980, amendé en 1996) et des Protocoles Décharges et Produits dangereux. MED-POL aide les pays méditerranéens à formuler et mettre en œuvre des programmes de surveillance de la pollution, comprenant des mesures de contrôle de la pollution et l'ébauche de plans d'action visant à éliminer la pollution due à des sources terrestres.

Selon le représentant du MED-POL, de nombreux pays refusent de ratifier le nouveau protocole. D'un autre côté, les experts internationaux ont expliqué que le rejet de saumure dans la mer (résultant du dessalement) n'affectent l'environnement marin que dans un rayon de 10 km autour des diffuseurs. Le rejet de la saumure des installations de dessalement bien situées et bien conçues aura un impact limité sur l'environnement marin à proximité des côtes. Selon le GRD, on a constaté que le rejet de saumure (surtout lorsqu'elle est mélangée à des eaux de

refroidissement) via des déversoirs en pleine mer, où les courants dispersent et diluent la saumure, a un impact écologique très limité.

Une recommandation solide émanant de discussions du GRD indique qu'une fois la décision du projet de dessalement prise, ses impacts environnementaux doivent être évalués conformément aux politiques EIE nationales et guidés par les méthodologies et critères internationalement reconnus (voir section 3.9.2.1)

4.9. Autres caractéristiques pratiques du site

En plus des facteurs ci-dessus, plusieurs éléments supplémentaires liés aux caractéristiques du site proposé auront une influence sur le choix de la technologie. Des facteurs tels que l'accès et la topographie du lieu, la disponibilité et la qualité des routes et des transports, ainsi que d'autres infrastructures sont autant d'éléments qui devront être pris en considération lors de la planification et du filtrage des options pour assurer l'adéquation des technologies proposées. Plus de détails sur les critères de sélection du site de dessalement figurent au point 3.11.

4.10 Coûts d'investissement et de fonctionnement de la solution proposée (Voir aussi point 3.12)

Une fois les autres éléments dûment pris en compte et évalués, le dernier facteur déterminant pour la sélection de la meilleure solution parmi plusieurs solutions tout aussi acceptables techniquement, est le coût total. Ce classement souligne que le coût seul ne peut être un élément déterminant lorsque l'on tient compte de l'approvisionnement d'une ressource aussi précieuse que l'eau aux communautés locales reculées ou désavantagées, et qu'un nombre important de particularités doivent être prises en considération dans de tels cas. Après s'être assuré que ces particularités sont prises en compte et avoir mené à bien la procédure de sélection, il est raisonnable de baser la sélection finale entre les technologies candidates restantes sur la base du coût total du cycle de vie. Des détails sur le classement des coûts et du budget figurent au point 3.12. Les coûts sociaux et environnementaux de(s) communauté(s) affectée(s) doivent également être pris en compte.

5. Modalités pour l'évaluation des besoins des communautés

5.1 Considérations géographiques

Le profil géographique complet d'un site proposé joue un rôle central dans la mise en place et la modification des besoins et exigences des communautés locales pour les MTD de dessalement. Ces éléments incluent la géographie du lieu, qui influe sur le type de sol et de terrain, les activités volcaniques et sismiques, la topographie, l'activité géothermique et d'autres facteurs géologiques. Ces facteurs auront une influence immédiate sur les pratiques de construction et sur l'ingénierie civile du site, ainsi que sur les codes et standards de construction. De plus, la topographie aura une influence significative sur la qualité des sources d'énergie renouvelables disponibles ou sur la capacité à l'extraire de façon efficace.

Un autre aspect critique du profil géographique total d'une communauté particulière est l'hydrologie du site. Cela comprend la circulation, la distribution et la qualité de l'eau du site, et l'inventaire des ressources en eau disponibles telles que rivières et lacs (eau fraîche) en plus des nappes aquifères souterraines, les taux d'extraction renouvelable, les bassins de drainage et zones inondables et d'autres aspects du profil hydrologique global.

La mise en place d'un plan hydrologique de la région, avec ses trois composantes principales : précipitations, écoulement et évapo-transpiration, permet une meilleure gestion des ressources en eau et une compréhension claire des pénuries ainsi que les échelles temporelles associées à divers composantes de la balance hydrologique. Les différents aspects du profil hydrologique d'un lieu ou d'une région peuvent être vus comme les caractéristiques

intrinsèques de « l'offre » de l'alimentation en eau sur le site. Les caractéristiques de « gestion de la demande » sont examinées à la section suivante. Les disparités en quantité, temps ou site entre l'offre et la demande donnent la forme et la définition au problème que les solutions de MTD de dessalement cherchent à réduire partiellement ou entièrement.

Un autre aspect du profil géographique d'une communauté à prendre en compte est l'héritage historique et archéologique possible d'un site. Il faut être attentif à préserver un tel héritage de possibles dommages causés par les forages, les sites de construction et autres travaux publics. Il faut également préserver les sites historiques de dommages esthétiques plus subtils qui peuvent être causés par des installations disgracieuses. Pour citer un exemple, certaines sociétés et individus n'aiment pas la vue des éoliennes et des parcs éoliens. Ainsi l'impact visuel perçu de la technologie sur un site est à prendre en considération, surtout pour les sites historiques. Il faut éviter les lieux d'habitat de la vie sauvage pour les protéger.

5.2 Le facteur humain : considérations démographiques et socioculturelles

Les facteurs sociaux, culturels et démographiques sont d'une importance capitale pour le succès d'un projet de dessalement d'une région reculée ou rurale. Des statistiques doivent être réalisées et analysées au niveau de la communauté ou du village ainsi qu'au niveau régional. Cela comprend le pourcentage de population rurale par rapport à la population urbaine d'une région, la densité de population, le revenu moyen par famille, le niveau d'alphabétisation et d'éducation et le pourcentage de connexion au réseau. De plus, des évaluations qualitatives de perspectives culturelles et d'aspects sociaux liés à l'usage et à la consommation de l'eau doivent être menées. Souvent les aspects sociaux n'ont pas l'attention qu'ils méritent dans la planification d'un projet. Le projet ADIRA [28] souligne un nombre de principes de base liés aux aspects sociaux d'un projet autonome de dessalement. Ceux-ci sont répertoriés ci-dessous avec de légères adaptations :

1. L'approche sociotechnique

Ce principe renforce l'interdépendance et l'interaction entre trois facteurs : population, technologies et organisations. Cette interdépendance doit être totalement comprise et expliquée afin d'améliorer les chances de succès d'un projet.

2. Se concentrer sur l'humain

Les personnes affectées par le projet doivent prendre part à toutes les étapes et leur apport doit être pris en compte. De plus, leurs valeurs et perspectives culturelles doivent être reconnues et respectées.

3. Apprentissage

Le groupe cible, particulièrement dans les communautés rurales, doit apprendre à maximiser les bénéfices d'un nouveau projet. Des opportunités d'apprentissage, de sensibilisation et de formation doivent être offertes dès le début du projet.

4. Indépendance et autonomie

La volonté des membres de la communauté et du groupe cible de participer et de s'engager dans un projet dépend largement du niveau d'indépendance et d'autonomie dont ils sont capables. Cela signifie que les membres de la communauté doivent pouvoir prendre leurs propres décisions à propos des actions proposées qui peuvent affecter leur vie. Les solutions techniques, aussi intelligentes et innovantes soient-elles aux yeux des concepteurs ou des décideurs, ne doivent pas être imposées à une communauté qui les trouvent discutables.

5. Flexibilité et processus d'orientation

Les conditions et circonstances générales pour l'alimentation en eau en zones rurales peuvent changer rapidement et sont généralement très spécifiques au site. Cela impose d'adopter pour les projets une approche flexible axée sur les procédés, capable de réagir et de s'adapter facilement aux changements.

Les approches rigides ou les modèles de solutions fixes sont inadaptés pour traiter les variations importantes entre les différents projets, voire dans un même projet dans le temps.

6. Durabilité

Dans ce contexte, la durabilité se réfère au soutien continu des autorités et autres parties prenantes au projet après sa réalisation, et au service et au fonctionnement continus des systèmes installés. Bien que la durabilité, par définition, ne puisse être constatée que sur de longues périodes, de nombreux facteurs influençant la durabilité peuvent être identifiés dès les premières étapes d'un projet. Les critères de durabilité doivent être établis et documentés durant les étapes de planification pour donner une référence et un guide pour des activités futures, de manière à améliorer les chances d'atteindre la durabilité. Le revenu moyen par famille, les niveaux de pauvreté, la faisabilité budgétaire, la volonté de payer pour de l'eau produite par les installations de dessalement et les subventions du gouvernement jouent un rôle majeur dans la durabilité.

7. Faisabilité

Les projets, objectifs et attentes du projet doivent être réalistes et faisables. Les plans irréalistes ou très exigeants conduisent à une déception et/ou un échec. Une évaluation correcte et une bonne compréhension du contexte environnemental réel et des particularités d'un projet sont essentielles pour s'assurer que les plans du projet soient réalisables et solidement ancrés dans la réalité plutôt que d'être menés uniquement par des désirs.

Questions culturelles, religieuses et égalité des sexes :

Bien souvent, les raisons socioculturelles et religieuses sont au cœur des projets ratés de communautés de l'eau[14]. Les nuances culturelles et religieuses varient largement entre les cultures et communautés et par conséquent des efforts conscients et institutionnalisés doivent être faits dès le début pour comprendre ces aspects. À cet égard, les méthodes des sciences sociales sont les moyens les plus adaptés[28]. Souvent, une nouvelle technologie introduite pour la première fois dans une communauté est perçue comme une intrusion incompatible avec des traditions, des structures sociales et des responsabilités de la communauté de longue date[14].

Dans la plupart des sociétés et cultures, la responsabilité de la gestion de l'eau, de l'assainissement et de la santé au niveau du foyer revient aux femmes[29]. Alors que ce rôle a permis aux femmes d'acquérir plus de sagesse en matière d'assainissement et de gestion de l'eau, elles sont souvent exposées à des vulnérabilités comme parcourir de longues distances pour rapporter de l'eau, au harcèlement et à l'incapacité d'aller à l'école. Pour citer un exemple :

« Au *Maroc*, le projet de la banque mondiale de fournir eau et assainissement dans les régions rurales, vise à réduire le fardeau des filles qui sont traditionnellement impliquées dans la recherche de l'eau » afin d'améliorer leur présence à l'école. Dans les six provinces où le projet fonctionne, la présence des filles à l'école a augmenté de 20% en quatre ans, ce que l'on attribue en partie au fait que les filles passent moins de temps à aller chercher de l'eau. On a également constaté que l'accès à l'eau a réduit le temps passé par les femmes et les jeunes filles à chercher de l'eau de 50 à 90 %.[29]

Malgré le rôle important joué par les femmes dans la gestion et la préservation des ressources en eau du foyer, dans de nombreuses sociétés, ce sont les hommes qui sont chargés des questions et des décisions politiques et les femmes sont souvent laissées à l'écart. Les femmes n'ont que très peu de poids dans le choix du type de services et de soutien dont elles ont besoin pour faciliter leur tâche.

« L'égalité des sexes est au cœur de la fourniture, de la gestion et de la conservation de nos ressources en eau limitées et de la sauvegarde de la santé à travers une bonne hygiène. L'importance d'impliquer les femmes et les hommes dans la gestion de l'eau et de l'hygiène a été reconnue au niveau mondial au moins depuis la conférence sur l'eau des Nations unies en 1977 à Mardel Plata et durant la Décennie de l'eau potable et de l'assainissement, 1981-1990. Les principes de Dublin, ratifiés lors de la Conférence internationale sur l'Eau et l'Environnement en 1992 reconnaissent que « les femmes jouent un rôle central dans l'approvisionnement, la gestion et la sauvegarde de l'eau. » La déclaration appelle à la reconnaissance de la contribution des femmes en tant que fournisseurs et usagers de l'eau et gardiens d'un cadre de vie dans les arrangements institutionnels pour le développement et la gestion des ressources en eau. » [29]

Renforcement des Capacités

Le succès de la planification du projet, de la mise en œuvre et de la durabilité nécessite un renforcement des capacités planifié avec soin. Idéalement, cela devrait concerner toutes les parties prenantes à un projet, y compris les consommateurs, les techniciens, les décideurs, les concepteurs, les entrepreneurs et les fournisseurs. Les consommateurs et les techniciens au niveau du village ou du site ainsi que les décideurs, sont les personnes les plus importantes parmi ces groupes. Les programmes de formation doivent être conçus et fournis pour développer les ressources humaines nécessaires dans les domaines suivants des PP :

- Gestion de l'alimentation en eau, évaluation de la technologie, et planification flexible du projet. Cet aspect vise principalement les planificateurs et les décideurs dans les PP.
- Conception de systèmes MTD de dessalement en utilisant les SER dans les zones rurales et reculées. Elle peut être introduite dans les formations d'ingénieurs des PP ou être proposée en tant que programme de formation intensive aux ingénieurs.
- Installation et commercialisation des technologies utiles. Il faut viser les sociétés locales d'ingénierie et les sociétés contractantes et cela peut être réalisé en partenariat avec les fabricants de technologies et intégrateurs de système.
- Fonctionnement et entretien En plus des sociétés d'ingénierie et des sociétés contractantes, cet élément doit se concentrer sur la formation de la main d'œuvre locale disponible dans le village ou la zone reculée afin d'atteindre le niveau requis pour la durabilité continue du projet. Cela peut être vu comme un complément à la sélection rationnelle de technologies adaptées aux opérateurs disponibles. Un élément n'empêche pas le besoin de l'autre. Le choix de la technologie doit correspondre au niveau de compétences disponibles tandis que la formation doit toujours être assurée pour garantir que le niveau de compétences corresponde aux technologies adoptées.

5.3 Disponibilité des ressources en eau

Comme mentionné précédemment, un vaste inventaire des ressources en eau à proximité des sites proposés doit être réalisé. La quantité et la qualité globales de l'eau doivent être déterminées, en plus des analyses des puits et/ou de l'eau de mer. Les analyses chimiques détaillées des échantillons d'eau brute sont nécessaires pour la conception des systèmes de dessalement afin d'éviter l'encrassement et/ou le calcaire. En cas d'utilisation d'eau de puits comme source d'eau brute pour le dessalement, des études/tests hydrologiques détaillés devront être réalisés afin d'assurer l'aspiration dans le puits et la durabilité du puits pour la capacité prévue tout au long de la période d'exploitation de l'installation. La réalimentation des nappes doit également être prise en compte, si l'étude révèle que cela est nécessaire pour la capacité de l'installation évaluée. Un autre aspect important concerne la proximité des sources d'eau sur le site proposé, qui peut avoir une influence sur le coût de l'eau.

5.4 Structures de prix et schémas financiers

Un projet réussi de dessalement en zones rurales ou reculées devrait réussir à amortir ses frais de fonctionnement et d'amortissement[28]. Cela implique que les tarifs de l'eau reflètent les coûts réels de l'alimentation en eau. D'un autre côté, l'accès à une eau potable sûre est un droit fondamental pour tous les humains, et par conséquent les besoins fondamentaux en eau devraient être disponibles et abordables pour tous. Les subventions sont généralement nécessaires pour garantir l'alimentation en eau dans les communautés rurales. Cependant, les subventions appliquées aux ressources en eaux conventionnelles dénaturent le marché et rendent les ressources alternatives comme le dessalement et les SER moins attrayantes. Les subventions doivent donc être appliquées de façon cohérente permettant au marché de sélectionner la méthode d'alimentation en eau la plus efficace [14].

Les difficultés principales de la mise en œuvre du dessalement par SER dans les communautés rurales sont :

1. Les faibles revenus des communautés rurales.
2. Les ressources financières limitées dans les communautés rurales.
3. Les coûts d'investissement élevés pour de tels projets.

Pour répondre à ces difficultés, plusieurs mécanismes de soutien ne déformant pas la fonction de marché sont possibles, tels que[28][14] :

- Financement direct de l'infrastructure.
- Avantages financiers pour les opérateurs.
- Encourager l'implication du secteur privé.
- L'adoption d'un « tarif minimal » où une structure de prix variable est appliquée selon le volume de l'eau utilisé. Le premier niveau de consommation, représentant les besoins essentiels des hommes, serait abordable pour tous, tandis que les niveaux suivants de consommation sont tarifés à des taux de plus en plus élevés.

Le tarif minimal offre de nombreux avantages : 1) les besoins minimums en eau sont abordables pour tous ; 2) le prix moyen des niveaux de consommation peut être fixé pour refléter le coût réel ; et 3) il y a une incitation pour les usagers à économiser l'eau.

Les principaux modèles de financement possibles, afin d'augmenter l'investissement par le fournisseur du système et de l'abaisser par les usagers, sont listés ci-dessous :

- Ventes au comptant : Les usagers achètent et possèdent au préalable le système complet. L'utilisateur final détient ainsi le système depuis le début et est responsable du fonctionnement et de la maintenance.
- Crédits à la consommation : Les usagers achètent le système au fabricant ou versent un acompte pour lequel le crédit est accordé par le fournisseur du système.
- Établissements de crédit : Les usagers achètent le système à crédit, qui est accordé par un établissement de crédit.
- Location : L'utilisateur n'achète pas le système mais le loue à la société ou à un intermédiaire financier avec option d'achat à la fin de la période de location. Dans ce cas, la propriété du système reste au fournisseur ou à l'intermédiaire financier qui en assure généralement la maintenance et les réparations.
- Frais de service : Une société ou un fournisseur d'eau pour usages publics est propriétaire du système et vend le produit (l'eau) aux usagers. La société est responsable du fonctionnement, de la maintenance et des réparations.

5.5 Facteurs institutionnels et de contrôle

Le partage des responsabilités dans le secteur de l'eau peut généralement être divisé en trois niveaux [28], [30] :

1. Niveau décisionnel

Il comprend les ministères et autres entités gouvernementales impliquées dans la planification et les politiques de l'eau. La responsabilité principale revient en général à un ministère qui a le contrôle global du secteur de l'eau. Cependant d'autres ministères sont également impliqués à des degrés divers dans la politique de l'eau, le ministère de l'environnement, de l'agriculture, du développement, des finances et d'autres ministères.

2. Niveau d'application

C'est généralement le rôle des organisations gouvernementales travaillant sous les organes de décision

3. Niveau usager

Des organisations gouvernementales ou non gouvernementales (ONG) peuvent assurer le fonctionnement et la maintenance pratiques des installations d'alimentation en eau. Le niveau de l'utilisateur est généralement différent dans les zones urbaines et dans les zones rurales. Alors que les villes bénéficient de conditions favorables telles que la demande élevée et la forte concentration géographique permettant des économies d'échelle, les zones rurales offrent différents enjeux économiques et techniques. Cela signifie la plupart du temps que les subventions sont nécessaires pour fournir l'essentiel des ressources en eau aux communautés rurales.

Alors qu'aucune régulation spécifique ne vise directement les projets de dessalement, une foule de permis sont nécessaires pour les projets de dessalement en zones rurales et reculées. Ces permis sont spécifiques à chaque pays, mais de manière générale, on peut s'attendre aux éléments suivants[28] :

- Forage et prélèvement de l'eau de mer.
- Rejets de saumure (souvent sous la forme de dispersion de liquides).
- Construction en zones côtières
- Qualité de l'eau potable
- Approbation des installations d'énergies renouvelables ou alimentation en électricité.

5.6 Lignes directrices supplémentaires pour le contrôle et l'évaluation des MTD de dessalement utilisant les SER

Ce point contient quelques informations supplémentaires pour le contrôle et l'évaluation des Meilleures Technologies Disponibles utilisant les SER. Cette section comporte des recommandations des experts nationaux et internationaux comme convenu lors de la réunion à Athènes les 11 et 12 juin 2012. Les lignes directrices sont données des étapes 1 à 4 comme suit.

Étape 1 : Évaluation des ressources en eau disponibles et caractéristiques de la demande : Les experts nationaux et internationaux se sont mis d'accord sur le besoin d'une évaluation complète des ressources en eau disponibles, ainsi que sur une évaluation des caractéristiques de la demande en eau sur les sites proposés dans un premier temps, dans le but de s'assurer que toutes les options ont été épuisées avant de se décider en faveur du dessalement.

Afin d'évaluer et établir les besoins des communautés rurales et reculées en projets de dessalement, les besoins réels de la communauté doivent être examinés lors d'une évaluation globale des ressources en eau disponibles. Si elle est décidée, l'introduction du dessalement dans une communauté doit se faire dans un contexte GIRE et

devrait être prise en compte par les autorités centrales et locales comme une première étape vers un développement durable global de la communauté. En conséquence, une analyse détaillée des coûts d'opportunité doit être élaborée avant de prendre une décision concernant le dessalement. Les éléments à prendre en compte lors de l'analyse des coûts d'opportunité devraient comprendre, sans s'y limiter, les ressources alternatives en eau, la réutilisation des eaux usées, le coût de production du dessalement au point d'utilisation, les coûts externes environnementaux, les économies provenant de la réduction de l'eau non comptabilisée (réduction des fuites et des prélèvements illégaux), la réaffectation de l'eau d'irrigation et ses impacts socioéconomiques, la réévaluation du développement des cultures dans les politiques agricoles, etc.

Des ateliers de développement de capacité doivent être mis en place pour former les fonctionnaires de l'eau sur les principes d'analyse des coûts d'opportunité pour le dessalement et devraient être pris en compte dans les MT de renforcement des capacités du programme SWIM. Cela sera mis en œuvre « parallèle mais séparé » dans les tâches du SWIM-SM.

Les activités recommandées doivent être intégrées aux autres projets UE ou méditerranéens tels que MED-POL et H2020 ; et tenir compte des donateurs et parties prenantes pour éviter le double emploi et partager les ressources.

Étape 2 : Évaluation des SER disponibles et raccordement au réseau : Selon les experts, l'étape suivante la plus importante dans ce processus est de mener une vaste étude des ressources disponibles en énergie, en se concentrant particulièrement sur les sources d'énergie renouvelables dans le cas où l'on ne dispose pas de réseau électrique. Une compréhension précise des SER disponibles et de leurs caractéristiques qualitatives et quantitatives est nécessaire. À ce stade, il a été suggéré que les analyses de risque des disponibilités SER doivent être prises en compte lors de l'évaluation des projets de dessalement.

De plus, un programme de développement de capacités est jugé nécessaire pour orienter les décideurs des politiques de l'eau dans les pays SWIM sur les nouveaux développements de pointe (techniques, avantages, économies, limitations, etc.) d'une SER compatible avec un dessalement à petite échelle.

Étape 3 : Liste de sélection des procédés de dessalement basés sur les SER disponibles : L'étape précédente d'identification, de caractérisation et de sélection des SER devrait permettre d'écarter tous les procédés de dessalement qui ne conviennent pas au type d'énergie choisi, en tenant compte des spécificités socioéconomiques, environnementales et culturelles de la communauté ayant besoin du dessalement.

Étape 4 : Évaluation de l'impact environnemental des projets DES-MTD et SER : Une fois que la mise en œuvre d'une installation de dessalement est décidée sur la base de l'élimination des alternatives en utilisant les outils d'analyses des coûts d'opportunité, une EIE doit être entreprise pour identifier, éviter et/ou réduire tout impact potentiel sur l'environnement en accord avec les politiques EIE nationales. On accordera un poids adéquat dans les études EIE aux impacts environnementaux cumulatifs (provenant principalement du rejet de saumure en mer ou de sa réutilisation en agriculture) résultant de l'exploitation de l'installation de dessalement.

Suite aux discussions du GRD avec les consultants nationaux, on est d'accord sur les éléments suivants :

1. Le SWIM-SM devrait étudier le développement d'une boîte à outils complète (lignes directrices) pour aider les décideurs politiques sur le dessalement après élimination de toutes les autres options. Cette boîte à outil devrait suivre une séquence logique, simple et facile à utiliser. Elle doit contenir les instruments financiers et environnementaux nécessaires pour décider du dessalement en évitant les impacts écologiques.

2. Le SWIM garantit l'intégration de l'EIE en tant qu'étape fondamentale dans la structure et le contexte des lignes directrices DES-MTD et SER proposées.
3. Un plan succinct pour le développement des lignes directrices proposées (boîte à outils) doit être développé et discuté avec le GRD, partagé électroniquement avec les PP, développé, partagé puis discuté lors d'une réunion consultative régionale élargie avec la participation des experts nationaux en eau et environnement des PP en collaboration avec le PNUE-PAM.

6. Recommandation pour l'intégration dans les plans GIRE nationaux

Depuis l'Antiquité, l'eau est reconnue comme « le sang de la Terre », en tant que pré requis de la vie sur notre planète et comme une des ressources naturelles les plus vulnérables et les plus rares. L'augmentation du stress hydrique dans les pays du sud de la Méditerranée menace le développement économique et les habitudes des habitants, plus particulièrement parmi les populations pauvres et vulnérables vivant dans les zones rurales arides. L'agriculture utilise 70 à 85% [35] des ressources d'eau renouvelables. Les systèmes d'irrigation sont souvent dispersés dans de vastes zones rurales, avec une faible efficacité et un manque de contrôle de gestion. Le secrétaire général des NU l'a souligné lors du Sommet du millénaire (2000) : « Nous avons besoin d'une révolution bleue dans l'agriculture visant à accroître le rendement agricole par unité d'eau. L'urbanisation, la pollution, la surexploitation des ressources naturelles font pression sur la biodiversité de l'écosystème aquatique méditerranéen. La région a perdu plus de 50% de ses terres humides.

Le besoin d'une gestion attentive et judicieuse des ressources en eau a été reconnu à Stockholm en 1972. L'augmentation de la demande en eau, la détérioration de sa qualité et de sa quantité et la mauvaise gestion des ressources naturelles font de l'eau une ressource limitée et vulnérable. Ce dernier aspect est plus évident dans la région méditerranéenne où les approches sectorielles dans la gestion de l'eau prévalent toujours dans de nombreux pays [35] et ne peuvent atteindre les besoins actuels d'une gestion durable des ressources.

Durant ces dernières décennies, il y a eu une prise de conscience récurrente et plus importante d'une part sur le rôle crucial que l'eau joue dans le développement durable, et d'autre part sur l'interdépendance et les demandes concurrentes des divers secteurs d'utilisation de cette ressource vulnérable. Cela a conduit à un nouveau modèle de gestion et de planification des ressources en eau communément appelé Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Le Partenariat Mondial pour l'Eau (GWP) définit la GIRE comme « un processus qui promeut le développement et la gestion coordonnés de l'eau, de la terre et des ressources liées, afin d'optimiser le bien-être économique et social qui en résulte, de manière équitable sans compromettre le développement durable des écosystèmes vitaux ».

Le cycle de l'eau est « le modèle intégré des ressources en eau » de la nature. Une pratique de gestion durable des ressources en eau doit non seulement tenir compte mais également respecter l'équilibre entre les composants du cycle de l'eau. L'eau de pluie, l'eau terrestre (lacs, rivières, etc.), l'eau côtière et marine, les terres humides : tout doit être géré de façon globale basée sur leur particularités et implications, en utilisant tous les outils et méthodes disponibles. Un cycle de l'eau modifié recommandé est illustré ci-dessous.



Figure 30 : Cycle recommandé de l'eau

L'application de la GIRE nécessite :

1. Un environnement propice de politiques et de lois appropriées, où l'autorité gouvernante agit comme un catalyseur plutôt que comme un gestionnaire descendant.
2. Un cadre et des rôles institutionnels, représentés par toutes les organisations et les agences à travers les secteurs de l'eau. La mission première de ces rôles institutionnels est de discuter, planifier et agir ensemble, en comprenant bien la nature participative du modèle GIRE.
3. Une série d'instruments de gestion, qui sont les outils pratiques au travers desquels les plans GIRE pourraient être mis en œuvre. Cela comprend les évaluations des ressources en eau, le développement d'Organismes de bassin (RBO), la participation des parties prenantes aux prises de décision, la communication et la diffusion de l'information, l'assurance de la viabilité financière, les allocations de ressources et la résolution des conflits, les instruments de régulation et la technologie.

C'est en gardant à l'esprit ce bref contexte lors de la planification des projets de dessalement pour les régions rurales, que l'on prendra en compte les éléments suivants.

- Le dessalement étant une source d'eau fraîche relativement coûteuse, il est clair que prendre en compte le dessalement en tant que source alternative d'alimentation en eau dès le début, devrait faire partie intégrante d'un plan GIRE national. Le dessalement ne devrait être examiné qu'après s'être assuré que les bonnes pratiques de gestion de l'eau sont suivies au niveau national et que les ressources en eau correctement gérées se révèlent insuffisantes. Envisager la construction d'une installation de dessalement pour fournir de l'eau potable à une communauté reculée qui épuise ses ressources en eaux souterraines pour l'irrigation avec un faible retour économique devrait être sérieusement reconsidérée et réattribué en conséquence. Cela dit, dans les zones rurales et reculées arides, il est fréquent que le coût de l'alimentation en eau et du transport de ressources conventionnelles soit plus cher que le dessalement [14].
- Le choix rationnel d'une technologie de dessalement fonctionnant à vie est durable.
- En calculant le cycle de vie, il faudra prendre en compte aussi le coût de production de l'eau fraîche des installations de dessalement, en plus des coûts des installations, du fonctionnement et de la maintenance, des frais associés à la fourniture en eau brute, prétraitement, post-traitement, des rejets de saumure répondant au plan de protection de l'environnement (EMP).
- L'évaluation de la faisabilité du dessalement pour les zones rurales et reculées doit faire partie intégrante d'une approche globale tenant compte des spécificités de chaque région et lieu afin de proposer la meilleure approche ou combinaison d'approches pour chaque cas. Le coût d'opportunité de chaque solution proposée doit être bien compris et étudié avant qu'une décision ne soit prise d'une manière ou d'une autre. De plus, le coût élevé de la production d'eau dessalée devrait encourager la société et les décideurs à voir les eaux usées qui en résultent comme une ressource précieuse qui devrait être récupérée et réutilisée autant que possible.
- Le transport de l'eau est un autre domaine qui devrait être examiné avec soin tout comme le dessalement, particulièrement si les lieux d'utilisation sont à une altitude plus élevée que les lieux de production. Il est nécessaire que les autorités prennent en considération les frais de pompage.
- Des EIE rigoureuses et précises doivent imposer plusieurs mesures pour la réduction des impacts écologiques du dessalement, telles que des conduites de prise d'eau plus longues avec une vélocité en amont très faible à la prise d'eau et de plus longues conduites pour le rejet de la saumure, la dilution et la dispersion de la saumure en mer, pour éviter d'endommager l'écosystème marin sensible, pour ne citer que quelques exemples. Des impacts écologiques potentiels sont présents à chaque phase d'un projet de dessalement [31]. La pratique de la GIRE offre en particulier l'opportunité et le contexte pour effectuer des EIE à l'échelle nationale et régionale associées à l'augmentation du dessalement.
- En tenant compte du rythme rapide du développement de la technologie, les décideurs devraient également fréquemment réaliser des évaluations des technologies visant à récupérer une plus-value des cuves de dessalement. Cela comprend l'extraction de minéraux de valeur, de sel et la production d'électricité via des moyens électrochimiques ou par des différentiels de pression osmotique.
- Bien que non spécifique à la seule alimentation en eau dessalée, la priorité sera donnée pour arrêter les fuites du réseau de manière à contrôler les pertes d'eau et faire une évaluation juste des ressources disponibles.

Une politique de l'eau GIRE idéale devrait épuiser toutes les opportunités pour réorganiser les dotations d'eau entre les différents usagers pour que **tout le monde soit gagnant**. Par exemple, une politique de recyclage des eaux usées pour l'irrigation pourrait permettre aux agriculteurs et aux foyers de mieux s'en sortir et d'allouer des eaux suffisantes pour les terres humides locales et ainsi être une politique **gagnante pour tous**. La gestion intégrée de l'eau peut également ouvrir des possibilités pour des synergies positives entre le dessalement et le traitement des eaux usées. Le projet japonais *Water Plaza* [32] en est un bon exemple, alliant le traitement tertiaire des eaux usées avec alimentation SWRO pour réduire la salinité de l'OI, réduisant ainsi l'énergie nécessaire, tout en profitant de la disponibilité des eaux usées traitées pour réduire la taille requise des systèmes de prétraitement SWRO. Une amélioration de 30% du rendement énergétique a été réalisée par cette approche.

Enfin, il faut souligner que même si le concept et les principes de gestion intégrée de l'eau sont communs, les stratégies et outils peuvent varier énormément, même à l'intérieur de la région du sud de la Méditerranée, selon les conditions socioculturelles, économiques et écologiques des pays impliqués.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADIRA, "ADIRA Handbook - A guide to autonomous desalination system concepts," 2008.
- [2] S. Kalogirou, "Seawater desalination using renewable energy sources," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 31, no. 3, pp. 242-281, 2005.
- [3] B.-H. Jeong et al., "Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: A new concept for reverse osmosis membranes," *Journal of Membrane Science*, vol. 294, no. 1-2, pp. 1-7, May 2007.
- [4] C. Kurth, R. L. Burk, and J. Green, "Improving Seawater Desalination With Nanocomposite Membranes," *IDA Journal on Desalination and Water Reuse*, no. Third Quarter, pp. 26-31, 2010.
- [5] LLNL, "Nanotube Membranes Offer Possibility of Cheaper Desalination," 2006. [Online]. Available: <https://www.llnl.gov/news/newsreleases/2006/NR-06-05-06.html>.
- [6] A. Al-Karaghoul, "Renewable Energy Opportunities in Water Desalination," in *Desalination, Trends and Technologies*, M. Schorr, Ed. InTech, 2011.
- [7] C. Alh riti rea, W. R. Ernst, and T. A. Davis, "Metathesis of magnesium and sodium salt systems by electro dialysis," *Desalination*, vol. 7, pp. 189-198, 1998.
- [8] T. A. Davis and S. C. Rayman, "Pilot Testing of Zero-Discharge Seawater Desalination – Application to Selenium Removal from Irrigation Drainage," 2008.
- [9] M. Elbourawi, Z. Ding, R. Ma, M. Khayet, and M. S. El-Bourawi, "A framework for better understanding membrane distillation separation process," *Journal of Membrane Science*, vol. 285, no. 1-2, pp. 4-29, Nov. 2006.
- [10] W. Heinzl, S. B ttner, and G. Lange, "Industrialized modules for MED Desalination with polymer surfaces," in *International Workshop on Membrane Distillation and Related Technologies*, 2011, pp. 110-115.
- [11] GWI, "Memsys secures a second pilot study," *Global Water Intelligence*, 2011. [Online]. Available: <http://www.globalwaterintel.com/archive/12/1/general/memsys-secures-second-pilot-study.html>. [Accessed: 31-Mar-2012].
- [12] J. L. McCutcheon, R. L. McGinnis, and M. Elimelech, "The Ammonia-Carbon Dioxide Forward Osmosis Desalination Process," *Water Conditioning & Purification*, 2006.
- [13] R. L. McGinnis and M. Elimelech, "Energy requirements of ammonia-carbon dioxide forward osmosis desalination," *Desalination*, vol. 207, no. 1-3, pp. 370-382, Mar. 2007.
- [14] ProDes, "Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy," 2010.
- [15] "MAGE Watermanagement: MAGE Solar Desalination." [Online]. Available: <http://www.mage-watermanagement.com/>. [Accessed: 22-Mar-2012].

- [16] M. Goosen, H. Mahmoudi, and N. Ghaffour, "Water Desalination Using Geothermal Energy," *Energies*, vol. 3, no. 8, pp. 1423-1442, Aug. 2010.
- [17] Mediras, "Multi-module two loop system in Italy: Mediras - Membrane Distillation in Remote Areas." [Online]. Available: <http://www.mediras.eu/index.php?id=121>. [Accessed: 22-Mar-2012].
- [18] K. Bourouni and M. Chaibi, "Water desalination by humidification and dehumidification of air: state of the art," *Desalination*, vol. 137, pp. 167-176, 2001.
- [19] H. Mahmoudi, N. Spahis, M. F. Goosen, N. Ghaffour, N. Drouiche, and A. Ouagued, "Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: A case study from Algeria," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 512-517, Jan. 2010.
- [20] M. Goosen, H. Mahmoudi, N. Ghaffour, and S. S. Sablani, "Application of Renewable Energies for Water Desalination," in *Desalination, Trends and Technologies*, M. Schor, Ed. InTech, 2010, pp. 89-118.
- [21] A. Ghermandi and R. Messalem, "Solar-driven desalination with reverse osmosis: the state of the art," *Desalination and Water Treatment*, vol. 7, no. November 2008, pp. 285-296, Jul. 2009.
- [22] V. Subiela and J. Carta, "The SDAWES project: lessons learnt from an innovative project," *Desalination*, vol. 168, pp. 39-47, 2004.
- [23] EGEC, "Geothermal Desalination," 2007.
- [24] G. R. Constantine Karytsasas, Dimitrios Mendrinou, "The Current Geothermal Exploration And Development Of The Geothermal Field Of Milos Island In Greece," *GHC Bulletin*, no. June, 2004.
- [25] H. Gutiérrez and S. Espíndola, "Using Low Enthalpy Geothermal Resources to Desalinate Sea Water and Electricity Production on Desert Areas in Mexico," *GHC Bulletin*, pp. 19-24, 2010.
- [26] K. Bourouni, R. Martin, L. Tadrist, and M. T. Chaibi, "Heat transfer and evaporation in geothermal desalination units," *Applied Energy*, vol. 64, no. 1-4, pp. 129-147, Sep. 1999.
- [27] J. Andriane and F. Alardin, "Desalination site selection on North-African coasts," *Desalination*, vol. 165, pp. 231-239, Aug. 2004.
- [28] ADIRA, *ADIRA HANDBOOK: A guide to autonomous desalination concepts*. 2008.
- [29] IANGWE, "A Gender Perspective on Water Resources and Sanitation," no. 2. New York, 2005.
- [30] M. Papapetrou et al., "Market analysis for Autonomous Desalination Systems powered by renewable energy in southern Mediterranean countries. Case study on Turkey," *Desalination*, vol. 183, no. 1-3, pp. 29-40, Nov. 2005.
- [31] UNEP, *Desalination Resource and Guidance Manual for Environmental Impact Assessments*. 2008.
- [32] GWSTA, "Water Plaza." [Online]. Available: <http://waterplaza.jp/en/>. [Accessed: 29-Mar-2012].
- [33] Desalination Markets 2010 Global forecast and analysis by Global Water Intelligence.

- [34] Sparrow, B. and Zoshi, J. "A Breakthrough Low Electricity Thermo-ionic Desalination Process : Background, Piloting and Economics", 2009 IDA World Congress, Dubai.
- [35] Scoullos M., Malotidi V., Spirou S. and Constantianos V., "Integrated Water Resources Management in the Mediterranean", GWP-Med & MIO-ECSDE, Athens, 2002
- [36] Nicos X. TSIOURTIS, "Framework for Action of the Mediterranean Islands." The Hague WATER FORUM March 1999.
- [37] Nicos X. TSIOURTIS, "Desalination and the Environment " Key Note Speech Contribution to the European Desalination Conference , Limassol May 2001. Desalination 141 (2001) 223-236.
- [38] Nicos X. TSIOURTIS, "Criteria and Procedure for selecting site for a desalination Plant" Desalination 221 (2008) 114 124
- [39] Nicos X. TSIOURTIS, "Bankability of Desalination Projects" Desalination –Visions for the Future Israel Desalination Society Neaman Institute, Technion City, Technion IIT, Haifa ISRAEL 12th Annual Conference.
- [40] Nicos X. TSIOURTIS, "Small Islands water resources development –a holistic approach" A paper presented to the Symposium in Paros island on "Aegean Sea-Water Sustainable Development " 6-7 July 2001.
- [41] Nicos X. TSIOURTIS. "The role of non conventional and lower quality water for the satisfaction for the satisfaction of the domestic needs in drought management plans" 2007.