

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat 3^{ème} cycle

Spécialisation : Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

SADAoui Yassine

**Contribution à l'amélioration de la production d'eau douce
basée sur un processus de dessalement solaire**

Soutenue publiquement le : 25/02/2025

Devant le jury composé de :

Mr. Mohammed Salah BENNOUNA	Maître de Conférences A	Université de Ouargla	Président
Mr. Nouredine CHERRAD	Professeur	Université de Ouargla	Encadreur
Mr. Amar ROUAG	Maître de Conférences A	Université de Ouargla	Examineur
Mr. Hichem NECIB	Maître de Conférences A	Université de Ouargla	Examineur
Mr. Mebarki GAZALI	Professeur	Université de Batna 2	Examineur
Mr. Rassim BELAKROUM	Professeur	Université de Ouargla	Co-encadreur

Remerciement

*Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadreur, **M. Nouredine CHERRAD**, pour ses précieux conseils et orientations, particulièrement dans le domaine méthodologique, qui ont grandement contribué à la réalisation de mon article.*

*Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mon co-encadreur, **M. Belakroum Rassim**, pour son appui et ses recommandations, notamment sur les aspects pratiques et méthodologiques.*

*Je remercie également toutes les personnes qui m'ont soutenu, de près ou de loin, en particulier **mes parents**, qui m'ont toujours inspiré, ainsi que **mon épouse**, dont le soutien inégalable a été d'une aide précieuse. Enfin, je n'oublie pas tous les membres de ma famille pour leur soutien constant*

Sommaire

REMERCIEMENT	II
SOMMAIRE	III
LISTE DES FIGURES	IX
INTRODUCTION GENERALE	1
1 CHAPITRE 1 : TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT	7
1.1 INTRODUCTION.....	7
1.2 HISTORIQUE ET DEFINITION DU DESSALEMENT	7
1.3 LA CLASSIFICATION DES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT	9
<i>1.3.1 Évaporation & Condensation</i>	9
1.3.1.1 Processus mécanique.....	9
1.3.1.2 Processus thermique.....	9
1.3.1.2.1 Distillation à effets multiples (MED)	9
1.3.1.2.2 Distillation flash multi-étagée (MSF).....	11
1.3.1.2.3 Distillation solaire par effet de serre (SSD).....	13
1.3.1.2.4 Humidification-Déshumidification (HDH)	15
1.3.1.2.5 Cheminée Solaire (SC)	17
<i>1.3.2 Filtration</i>	17
1.3.2.1 Osmose Inverse (RO).....	18
1.3.2.2 Osmose directe (FO)	19
1.3.2.3 Nanofiltration (NF)	20
1.3.2.4 Résine Échangeuse d'Ions (IXR).....	21
1.3.2.5 Distillation par Membrane (MD)	22
1.3.2.5.1 Distillation par Membrane à Contact Direct (DCMD).....	23
1.3.2.5.2 Distillation par Membrane avec Espace d'Air (AGMD)	24
1.3.2.5.3 Distillation par Membrane avec Gaz de Balayage (SGMD).....	25
1.3.2.5.4 Distillation par Membrane sous Vide (VMD)	26
1.3.2.6 Électrodialyse (ED).....	26
<i>1.3.3 Cristallisation</i>	27

Sommaire

1.3.3.1	Congélation	27
1.3.3.1.1	Dessalement par congélation à contact direct.....	28
1.3.3.1.2	Dessalement par congélation à contact indirect	28
1.3.3.1.3	Dessalement par congélation sous vide	28
1.3.3.2	Processus de Dessalement par Hydrate	29
1.4	CONCLUSION	34
2	CHAPITRE 2 : L'ETAT DE L'ART	36
2.1	INTRODUCTION.....	36
2.2	SYSTEME D'IRRIGATION PAR CONDENSATION (CI).....	37
2.2.1	<i>Étude de Widegren</i>	37
2.2.2	<i>Étude de Gustafsson et Lindblom</i>	37
2.2.3	<i>Étude de Lindblom et Nordell</i>	39
2.2.4	<i>Études d'Okati</i>	41
2.2.4.1	Première contribution (2016)	41
2.2.4.2	Deuxième contribution (2018)	41
2.2.4.3	Troisième contribution (2019).....	43
2.2.5	<i>Étude de Hammadi</i>	43
2.2.6	<i>Étude de Veretennikov</i>	45
2.3	CONCLUSION.....	48
3	CHAPITRE 3 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL	50
3.1	INTRODUCTION.....	50
3.2	DESCRIPTION DU NOUVEAU SYSTEME PROPOSE	51
3.3	ÉTUDE EXPERIMENTALE	53
3.3.1	<i>Méthodes de mesure</i>	54
3.3.2	<i>Analyse des incertitudes</i>	58
3.4	CONCLUSION	60
4	CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	62
4.1	INTRODUCTION.....	62
4.2	RESULTATS ET DISCUSSION	63
4.2.1	<i>Production d'eau douce à partir de l'humidité de l'air</i>	63

Sommaire

4.2.2	<i>Production d'eau douce en couplant le prototype de laboratoire à une unité d'évaporation</i>	64
4.2.3	<i>Comportement hygrothermique du dispositif expérimental</i>	65
4.3	COMPARAISON DE LA PRESENTE ETUDE AVEC D'AUTRES ETUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES	69
4.4	CONCLUSION	72
	CONCLUSION GENERALE	73
	RÉFÉRENCES	77
	RESUME	85

Liste des abréviations

Symboles

m² – Mètre carré

ml/h – Millilitres par heure

T – Température

°C – Degrés Celsius

m/s – Mètres par seconde

HR – Humidité relative

\$ – Dollar américain (monnaie)

\$/l – Coût par litre

kg/jour – Kilogrammes par jour

cm – Centimètre

\$/m³ – Coût par mètre cube

W/m² – Watts par mètre carré

MJ/m² – Mégajoules par mètre carré

kW – Kilowatt

kg – Kilogramme

kWh/m³ – Kilowatt-heure par mètre cube

kg/m/j – Kilogrammes par mètre carré par jour

kg/h – Kilogrammes par heure

Nomenclatures

EAHE – Earth-Air Heat Exchanger

PV – Photovoltaic

PVC – Polyvinyl Chloride

DoE – Design of Experiments

HDH – Humidification-Dehumidification

MED – Multi-Effect Distillation

MSF – Multi-Stage Flash Distillation

TVC – Thermal Vapor Compression

VC – Vapor Compression Process

SSD – Solar Still Distillation

HDH – Humidification-Dehumidification

SC – Solar Chimney

RO – Reverse Osmosis

FO – Forward Osmosis

NF – Nanofiltration

IXR – Ion Exchange Resin

Ca²⁺ – Calcium

Mg²⁺ – Magnesium

Ca²⁺ – Calcium

Na⁺ – Sodium

Mg²⁺ – Magnesium

K⁺ – Potassium

Mn²⁺ – Manganese

Fe³⁺ – Ferric Iron

Liste des abréviations

H^+ – Hydrogen ion

Cl^- – Chloride ion

NO_3^- – Nitrate ion

SO_4^{2-} – Sulfate ion

SiO_2^- – Silicate ion

CO_3^{2-} – Carbonate ion

OH^- – Hydroxide ion

Liste des figures

FIG. 1-1 CLASSIFICATION DES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT SELON LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	8
FIG. 1-2 SCHEMA D'UNE UNITE MED	10
FIG. 1-3 SCHEMATIC DIAGRAM OF MSF UNIT.....	12
FIG. 1-4 SCHEMATIC DIAGRAM OF VC (MVC AND TVC) UNITS	13
FIG. 1-5 UNITE DE DESSALEMENT PAR DISTILLATEUR SOLAIRE	14
FIG. 1-6 DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATEURS SOLAIRES.....	14
FIG. 1-7 UN PROCESSUS SIMPLE D'HUMIDIFICATION-DESHUMIDIFICATION (HDH)....	16
FIG. 1-8 CLASSIFICATIONS DES PROCEDES DE DESSALEMENT HDH	16
FIG. 1-9 SYSTEME COMBINE DE CHEMINEE SOLAIRE POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE ET LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER.	17
FIG. 1-10 SCHEMA DU SYSTEME D'OSMOSE INVERSE (RO).....	18
FIG. 1-11 SCHEMA DU PROCESSUS D'OSMOSE DIRECTE	19
FIG. 1-12 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT ET SCHEMA D'UNE UNITE DE NANOFILTRATION	20
FIG. 1-13 TECHNOLOGIES DE FILTRATION SELON LA PRESSION DE GRADIENT REQUISE ET LA TAILLE DES PORES	21
FIG. 1-14 ION-EXCHANGE RESIN UNIT	22
FIG. 1-15 SCHEMA DE L'UNITE DE DISTILLATION MEMBRANAIRE SOLAIRE (MD).....	23
FIG. 1-16 DISTILLATION MEMBRANAIRE A CONTACT DIRECT	24
FIG. 1-17 DISTILLATION MEMBRANAIRE A GAP D'AIR	25
FIG. 1-18 DISTILLATION MEMBRANAIRE A GAZ BALAYE	25
FIG. 1-19 DISTILLATION MEMBRANAIRE SOUS VIDE	26

FIG. 1-20 SCHEMATIC DIAGRAM OF ELECTRODIALYSIS (ED) DESALINATION PROCESS [31].	27
FIG. 1-21 DESSALEMENT PAR CONGELATION UTILISANT UNE POMPE A CHALEUR A COMPRESSION DE VAPEUR AUTO-INVERSIBLE .	29
FIG. 1-22 SCHEMA TYPIQUE DE PROCEDE POUR LE DESSALEMENT UTILISANT LA TECHNOLOGIE DES HYDRATES .	30
FIG. 1-23 TECHNOLOGIES DISPONIBLES BASEES SUR LES INSTALLATIONS DE	31
FIG. 1-24 (A) MONTRE LE POURCENTAGE DES SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLE DANS LES SYSTEMES RED A L'ECHELLE MONDIALE. (B) L'INTEGRATION DES PROCEDES DE DESSALEMENT AVEC LES SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLE	33
FIG. 2-1 SCHEMA DU SYSTEME D'IRRIGATION.	37
FIG. 2-2 SCHEMA DU MONTAGE EXPERIMENTAL	38
FIG. 2-3 LE SCHEMA ILLUSTRE LE SYSTEME IC POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE, EN TENANT COMPTE DES PROPRIETES DE L'AIR HUMIDE A L'ENTREE.	39
FIG. 2-4 LE SCHEMA ILLUSTRE LE SYSTEME IC POUR LES BESOINS EN IRRIGATION	40
FIG. 2-5 EXPERIMENTATION DU SYSTEME IC POUR LES BESOINS EN IRRIGATION.	40
FIG. 2-6 ILLUSTRE L'USINE PILOTE EN TUNISIE, OU LE SYSTEME D'IRRIGATION SOUTERRAINE EST EN COURS DE TEST.	40
FIG. 2-7 LE SCHEMA ILLUSTRE LE SYSTEME D'IRRIGATION SOUTERRAINE UTILISANT UN HUMIDIFICATEUR SOLAIRE ET UN CONDENSEUR SOUTERRAIN.	41
FIG. 2-8 SCHEMA D'UN SYSTEME DE TRAITEMENT DE L'EAU UTILISANT UN HUMIDIFICATEUR SOLAIRE ET UN NOUVEAU CONDENSEUR SOUTERRAIN.	42
FIG. 2-9 SCHEMA DU CONDENSEUR/ECHANGEUR DE CHALEUR GEOTHERMIQUE	43
FIG. 2-10 MODELE PHYSIQUE COMBINANT UN DISTILLATEUR SOLAIRE, UN ECHANGEUR DE CHALEUR AIR-SOL ET UNE CHEMINEE SOLAIRE POUR TIRAGE D'AIR NATUREL.	44

Liste des figures

FIG. 2-11 SCHEMA DE L'UNITE PILOTE : 1 – MODELE DE CONDENSEUR A VORTEX, 2 – EAU DE REFROIDISSEMENT, 3 – RESERVOIR, 4 – ILLUMINATEUR HALOGENE.....	45
FIG. 2-12 CONDENSEUR D'HUMIDITE ATMOSPHERIQUE AVEC ACCUMULATION DE CHALEUR :	46
FIG. 3-1 SCHEMA DU SYSTEME HYBRIDE PROPOSE	51
FIG. 3-2 SCHEMA ILLUSTRANT LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PROTOTYPE A L'ECHELLE DE LABORATOIRE.	53
FIG. 3-3 SCHEMA DE L'EQUIPEMENT, DES THERMOCOUPLES ET DES CAPTEURS D'HUMIDITE.	55
FIG. 3-4 PHOTOGRAPHIES DE TOUS LES EQUIPEMENTS UTILISES DANS CETTE ETUDE EXPERIMENTALE.....	56
FIG. 3-5 PHOTOGRAPHIE DU PROTOTYPE A L'ECHELLE DE LABORATOIRE (UNITE D'EVAPORATION + CONDENSEUR VORTEX).	57
FIG. 3-6 PHOTOGRAPHIE DU CONDENSEUR VORTEX FAISANT PARTIE DU PROTOTYPE.	57
FIG. 4-1 VARIATIONS DE TEMPERATURE ET D'HUMIDITE A DIFFERENTS EMPLACEMENTS DANS LE PROTOTYPE SANS L'UNITE D'EVAPORATION.....	63
FIG. 4-2 CHANGEMENT D'ETAT DE L'AIR DE PROCEDE A TRAVERS LE CONDENSEUR SUR LE DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE SANS L'UNITE D'EVAPORATION	64
FIG. 4-3 VARIATION DE LA TEMPERATURE A DIFFERENTS EMBLEMES SUR LE PROTOTYPE.	66
FIG. 4-4 CHANGEMENT D'ETAT DE L'AIR DE PROCEDE A TRAVERS LE CONDENSEUR SUR LE DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE AVEC L'UNITE D'EVAPORATION.	66
FIG. 4-5 QUANTITE D'EAU DOUCE PRODUITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'ENTREE DE LA VAPEUR D'EAU ET DE SA VITESSE.....	68

Liste des tableaux

TABLE 1-1 SELECTION D'INSTALLATIONS RED.	33
TABLE 3-1 CARACTERISTIQUES DES INSTRUMENTS DE MESURE.....	59
TABLE 4-1 PRODUCTION D'EAU DOUCE POUR UNE TEMPERATURE MOYENNE DE VAPEUR D'EAU DE 44 °C ET TROIS VITESSES D'ENTREE DIFFERENTES.	67
TABLE 4-2 PRODUCTION D'EAU DOUCE POUR UNE TEMPERATURE MOYENNE DE VAPEUR D'EAU A L'ENTREE DE 46 °C ET TROIS VITESSES D'ENTREE DIFFERENTES.	67
TABLE 4-3 PRODUCTION D'EAU DOUCE POUR UNE TEMPERATURE MOYENNE DE VAPEUR D'EAU A L'ENTREE DE 53 °C ET TROIS VITESSES D'ENTREE DIFFERENTES.	68
TABLE 4-4 RESUME DES DEVELOPPEMENTS RECENTS DANS LA RECHERCHE SUR LE DESSALEMENT SOLAIRE A PETITE ET MOYENNE ECHELLE.....	70

Introduction générale

L'eau est une ressource indispensable à la vie, essentielle à la survie humaine et étroitement connectée à une multitude d'activités humaines. Tous les êtres vivants dépendent de l'eau pour leur survie. Elle joue un rôle majeur dans la sécurité alimentaire, le soutien à l'élevage, le fonctionnement des industries, ainsi que dans la protection de l'environnement et de la biodiversité [1,2]. Cependant, le monde moderne est confronté à une grave crise de l'eau. Le changement climatique bouleverse les régimes de précipitations habituels, perturbant la répartition des ressources hydriques au niveau mondial et affectant les méthodes de stockage traditionnelles comme les barrages et les lacs [3]. Actuellement, de nombreuses régions dans le monde connaissent des pénuries d'eau [4–6]. D'après les projections de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), d'ici 2050, près de 4 milliards de personnes habiteront des zones où l'accès à l'eau sera limité [7].

Près de 97,5 % de l'eau présente sur Terre est contenue dans les océans, les mers, les eaux souterraines, les lacs et diverses autres sources d'eau salée. Seulement 2,5 % de l'eau terrestre est de l'eau douce, dont la majorité (environ 68,7 %) est stockée dans les glaces et neiges des régions polaires, comme l'Arctique et l'Antarctique, ainsi que dans les glaciers de montagne. Les eaux souterraines comptent pour environ 30,1 % des réserves mondiales d'eau douce, tandis que l'eau de surface facilement accessible, comme celle des lacs, représente seulement 0,3 % de l'eau douce disponible [8,9]. La pénurie croissante de ressources en eau douce dans le monde, combinée à une demande toujours plus forte, pousse les experts à rechercher des solutions alternatives pour relever ce défi critique. Le dessalement est devenu une méthode essentielle pour satisfaire la demande croissante en eau douce dans de nombreuses régions du globe [10]. Cette technique montre un fort potentiel pour résoudre les problèmes de pénurie d'eau, en particulier dans les régions arides et plus chaudes [3].

Au fil du temps, les technologies de dessalement ont progressivement évolué et se sont diversifiées, donnant lieu à une large gamme de procédés [11,12]. Ces technologies se divisent généralement en deux grandes catégories : les technologies thermiques et les technologies à membrane [11–14]. Parmi les méthodes de dessalement thermique, les plus couramment utilisées à l'échelle commerciale sont la distillation multi-étagée (MSF) et la distillation multi-effet (MED) [15–18]. En revanche, les technologies à membrane incluent principalement deux méthodes : l'osmose inverse (RO) et l'électrodialyse (ED) [11,18,19].

Par ailleurs les procédés de dessalement thermique nécessitent environ 10 000 tonnes de combustibles fossiles chaque année pour produire 1 000 m³ d'eau douce par jour [12,20]. Cette demande énergétique importante non seulement accroît les coûts opérationnels du processus de dessalement, mais aggrave également la pollution environnementale [21].

L'énergie renouvelable s'est imposée comme la solution idéale pour alimenter les procédés de dessalement, offrant à la fois les avantages de la durabilité à long terme et l'élimination des coûts liés à l'extraction des combustibles fossiles [22].

Dans ce cadre, l'objectif de ce sujet de thèse est de développer un nouveau système de dessalement basé sur le processus d'évaporation-condensation. Ce système est capable de produire une quantité significative d'eau douce et repose entièrement sur des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et géothermique peu profonde.

Chapitre 1 : Les technologies de dessalement

Le chapitre 1 offre une vue d'ensemble complète des technologies de dessalement, en retraçant leur évolution depuis les procédés thermiques primitifs jusqu'aux méthodes modernes basées sur les membranes. Le chapitre commence par examiner le développement historique du dessalement, en mettant en lumière le rôle des premières techniques telles que la distillation multi-étagée (MSF) et la distillation multi-effet (MED) dans les opérations à grande échelle. Il aborde ensuite la montée des technologies basées sur les membranes, notamment l'osmose inverse (RO), qui est devenue la méthode dominante en raison de sa faible consommation d'énergie et de sa capacité à être mise à l'échelle. De plus, des techniques émergentes comme l'osmose directe (FO) et la déionisation par capacité (CDI) sont étudiées pour leur potentiel à améliorer encore l'efficacité du dessalement.

Le chapitre souligne également l'importance d'intégrer des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, avec les technologies de dessalement afin de répondre aux préoccupations en matière de durabilité. Les avancées continues dans les systèmes de dessalement alimentés par les énergies renouvelables (RED) sont présentées comme des solutions prometteuses pour réduire l'impact environnemental des procédés de dessalement conventionnels. Dans l'ensemble, le chapitre 1 prépare le terrain pour comprendre les principales tendances et défis technologiques du secteur, tout en offrant des perspectives sur le potentiel futur du dessalement en tant qu'outil essentiel pour résoudre le problème mondial de la rareté de l'eau.

Chapitre 2 : Chapitre 2 : État de l'art

Le chapitre 2 examine les avancées actuelles dans les technologies de dessalement alimentées par des énergies renouvelables, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de l'énergie solaire et de la géothermie peu profonde. Ce chapitre passe en revue à la fois les innovations théoriques et pratiques, notamment le développement des systèmes d'irrigation par condensation (CI) et des modèles de dessalement hybrides qui combinent l'énergie solaire et géothermique pour améliorer la production d'eau douce. Les systèmes CI utilisent l'énergie solaire pour l'évaporation et le refroidissement géothermique pour la condensation, offrant ainsi des solutions durables pour l'irrigation et la production d'eau potable.

Le chapitre explore également les études récentes visant à optimiser les paramètres des systèmes de dessalement solaire et les technologies émergentes, telles que les condenseurs à vortex pour la collecte de l'humidité atmosphérique, qui sont conçus pour fonctionner de manière autonome sans sources d'énergie externes. En outre, il est démontré que les systèmes hybrides permettent une amélioration significative de la production d'eau, même dans des conditions environnementales variées.

En examinant ces technologies de pointe, le chapitre met en lumière le potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans les procédés de dessalement, offrant ainsi un aperçu complet des méthodes à la pointe de la technologie qui pourraient traiter durablement les problèmes mondiaux de rareté de l'eau.

Chapitre 3 : Dispositif expérimental

Le chapitre 3 décrit en détail la configuration expérimentale développée pour évaluer les performances d'un système de dessalement hybride solaire-géothermique novateur. Ce système intègre l'énergie solaire, captée à l'aide d'un capteur parabolique, avec l'énergie géothermique peu profonde pour produire efficacement de l'eau douce. L'enquête expérimentale est réalisée à l'aide d'un prototype à l'échelle de laboratoire, conçu pour reproduire les composants clés du système à grande échelle. Ce prototype permet de tester de manière contrôlée les processus opérationnels, fournissant ainsi des informations précieuses sur la performance et la faisabilité du système.

Le chapitre présente le design et la configuration de l'appareillage expérimental, en mettant en évidence l'utilisation d'instruments de mesure précis tels que des thermocouples, des hygromètres et des capteurs de vitesse pour garantir une collecte de données fiable. Il discute également de la méthodologie employée pour maintenir des conditions contrôlées, élément crucial pour valider l'efficacité du système dans la production d'eau douce.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Le chapitre 4 présente une analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus à partir d'un prototype à l'échelle de laboratoire conçu pour la génération d'eau atmosphérique. Deux configurations ont été testées : la première consistait en un simple refroidissement sans unité d'évaporation, tandis que la seconde incorporait une unité d'évaporation pour améliorer la production d'eau. La première configuration a montré des résultats limités en raison d'un refroidissement insuffisant et d'une faible humidité initiale de l'air, ce qui a conduit à une production minimale d'eau douce.

En revanche, la seconde configuration, incluant l'unité d'évaporation, a considérablement amélioré le rendement en eau. En ajustant des variables clés telles que la température de la vapeur d'eau à l'entrée et la vitesse du flux d'air, le système a atteint une plus grande efficacité de condensation et

une production accrue d'eau douce. Les résultats révèlent une forte corrélation entre la température, le flux d'air et la production d'eau, soulignant l'importance de ces facteurs pour optimiser le système dans un cadre pratique pour les technologies de génération d'eau atmosphérique.

Chapitre 1: Technologies de dessalement

1 Chapitre 1 : Technologies de dessalement

1.1 Introduction

Le « dessalement » désigne une méthode technologique permettant d'obtenir de l'eau douce à partir d'eau saumâtre ou salée. L'eau de mer est fréquemment utilisée comme source principale pour alimenter ce procédé [23]. Ce processus peut avoir des applications municipales, industrielles ou commerciales [24]. Historiquement, le dessalement a été initié par la Royal Navy, la marine militaire du Royaume-Uni, vers la fin du XVIII^e siècle. Son but principal était d'améliorer l'autonomie des navires en minimisant le stockage d'importantes quantités d'eau [25]. À cette époque, les navires fonctionnaient à la vapeur, ce qui a conduit à l'utilisation de la distillation flash simple comme première technologie de dessalement. Avec le temps, cette technique a été optimisée pour devenir le processus de distillation multi-étagé (MSF) plus performant [23].

En 1907, une société néerlandaise a mis en place la première usine de dessalement à Djeddah, dans l'un des pays du Golfe arabe [26]. Sous les directives du roi Abdulaziz Al Saud, l'usine a été remplacée en 1928 par deux unités construites par Weir Westgarth, avec une capacité totale de 135 m³ par jour, employant la distillation multi-étagée (MSF). En 1977, la première usine de dessalement basée sur l'osmose inverse (RO) pour une municipalité a été inaugurée aux États-Unis, avec une capacité de 11 350 m³ par jour [23]. D'après l'Association Internationale de Dessalement (IDA) en 2015, plus de 300 millions de personnes dépendent de l'eau produite par 18 426 usines de dessalement dans 150 pays, avec une production de plus de 86,8 millions de mètres cubes d'eau par jour [27].

1.2 Historique et définition du dessalement

Afin de mieux appréhender le processus de dessalement, il est nécessaire d'établir une classification. Alkaiji a proposé trois catégories principales : évaporation et condensation, filtration, et cristallisation [20]. figure 1-1 présente une version mise à jour de cette classification, proposée par Alkaiji, qui inclut les nouvelles technologies actuellement à l'étude.

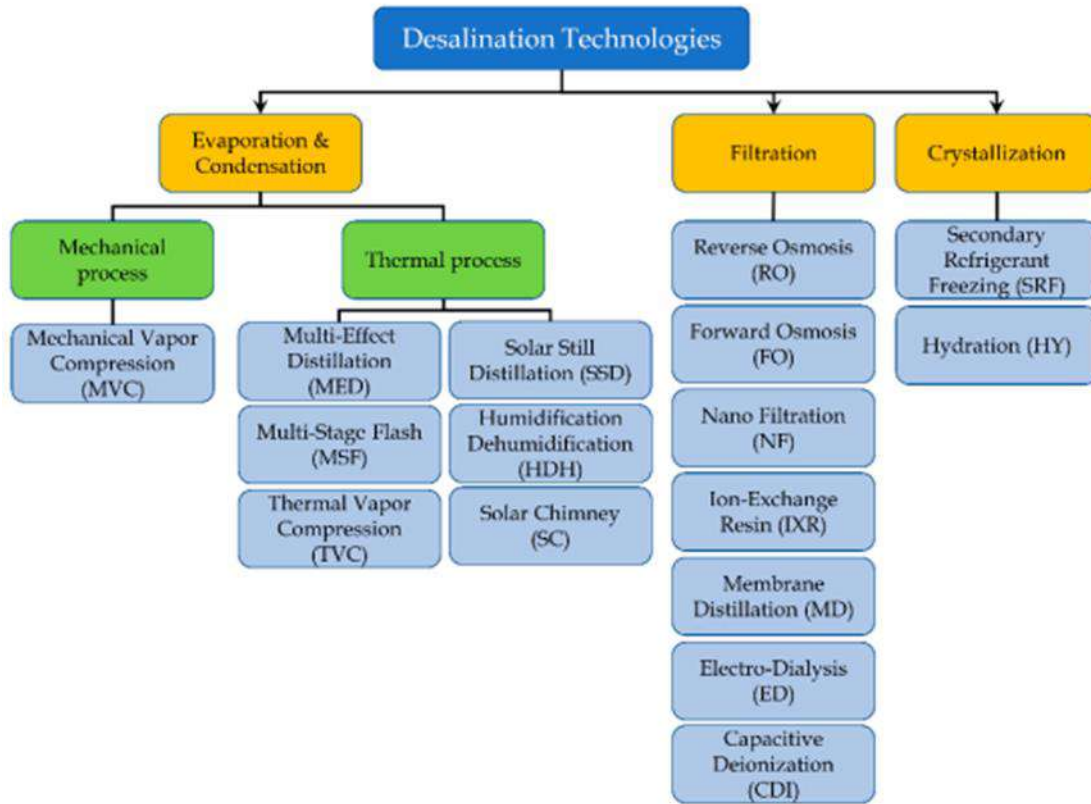


Fig. 1-1 Classification des technologies de dessalement selon le principe de fonctionnement [22]

Les technologies d'évaporation et de condensation ont été parmi les premières méthodes de dessalement introduites et utilisées pour produire de l'eau douce à des fins civiles. Le processus implique l'apport de chaleur à l'eau de mer afin de générer de la vapeur, qui est ensuite transformée en eau douce par condensation. Cette chaleur peut être produite à partir de sources thermiques (comme la chaleur résiduelle ou la combustion) ou par des moyens mécaniques. Parmi les techniques thermiques les plus répandues figurent la distillation à effets multiples (MED), la distillation flash multi-étagée (MSF), la compression thermique de vapeur (TVC), et la distillation à membrane (MD). Aujourd'hui, d'autres approches sont à l'étude, incluant des solutions innovantes utilisant l'énergie solaire, telles que la distillation solaire (SSD), la cheminée solaire (SC) et le dessalement par humidification-déshumidification (HDH) [23]. Pour les procédés mécaniques, la principale méthode utilisée pour l'évaporation et la condensation de l'eau de mer reste la compression mécanique de vapeur [28].

Chapitre 1 : Technologies de dessalement

Concernant les technologies de filtration, elles reposent majoritairement sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable, une couche qui permet le passage sélectif des molécules en fonction de leur taille ou de leur nature. La seule exception à cela est constituée par les résines échangeuses d'ions (IXR), qui utilisent des matériaux naturels ou synthétiques pour capturer les ions dissous par un procédé chimique [23]. Enfin, la technologie de cristallisation, incluant la congélation et l'hydratation, permet de séparer l'eau douce de l'eau salée en provoquant un changement de phase vers une forme cristalline.

1.3 La classification des technologies de dessalement

1.3.1 Évaporation & Condensation

L'évaporation et la condensation sont l'une des méthodes les plus anciennes et les plus efficaces de dessalement. Ce processus imite le cycle naturel de l'eau, où l'eau est chauffée (évaporation), laissant derrière elle les sels et les impuretés, puis refroidie (condensation) pour recueillir de l'eau douce. Cette méthode est classée en deux processus principaux Processus mécanique et thermique

1.3.1.1 Processus mécanique

Le processus mécanique de dessalement utilise l'énergie mécanique pour faciliter l'évaporation et la condensation de l'eau. L'une des techniques les plus courantes dans ce processus est la Compression Mécanique de Vapeur (MVC) , Cette technologie a été mentionnée avec la compression thermique de vapeur (TVC) voir figure 1-4 .

1.3.1.2 Processus thermique

Le processus thermique de dessalement utilise l'énergie thermique (chaleur) pour évaporer l'eau salée, laissant derrière elle les sels et les impuretés. La vapeur est ensuite refroidie et condensée pour produire de l'eau douce. Ce processus comprend six technologies..

1.3.1.2.1 Distillation à effets multiples (MED)

Le processus de distillation à effets multiples (MED) Figure 1-2 fonctionne à travers une série d'étapes, généralement comprises entre 2 et 16, chacune étant maintenue à des pressions de plus

Chapitre 1 : Technologies de dessalement

en plus basses. De la chaleur externe, qui peut provenir de sources telles que des chaudières à combustibles fossiles, la chaleur résiduelle des centrales électriques, l'énergie solaire ou d'autres alternatives, est appliquée pour élever la température de la saumure dans la première étape à environ 70 °C. Cette chaleur est utilisée pour évaporer une partie de la saumure dans cette étape, maintenue à une pression réduite. La vapeur produite dans cette phase est ensuite transférée à travers des tubes vers l'étape suivante, où elle permet l'ébullition d'une quantité supplémentaire d'eau de mer, générant ainsi de la vapeur supplémentaire de manière séquentielle.

Les unités MED ont généralement des capacités allant de 600 à 30 000 m³/jour et sont conçues selon deux configurations principales. La première configuration est celle des tubes verticaux, où l'eau de mer bout en formant un film mince à l'intérieur des tubes, tandis que la vapeur se condense sur les surfaces de transfert de chaleur. La seconde configuration est celle des tubes horizontaux, où l'eau de mer est pulvérisée sur la surface extérieure des tubes, et la vapeur circule à l'intérieur des tubes horizontaux, où elle se condense pour produire de l'eau douce [29]. Les premières installations de distillation d'eau utilisaient initialement le processus de distillation à effets multiples (MED), mais celui-ci a été progressivement supplanté par les unités à distillation flash multi-étagée (MSF) en raison de leur meilleure résistance au tartre. Cependant, à partir des années 1980, l'intérêt pour le processus MED a été ravivé. Ce renouveau a conduit au développement de nouveaux designs axés sur un fonctionnement à des températures plus basses, ce qui a contribué à réduire les problèmes de corrosion et de formation de tartre [30]

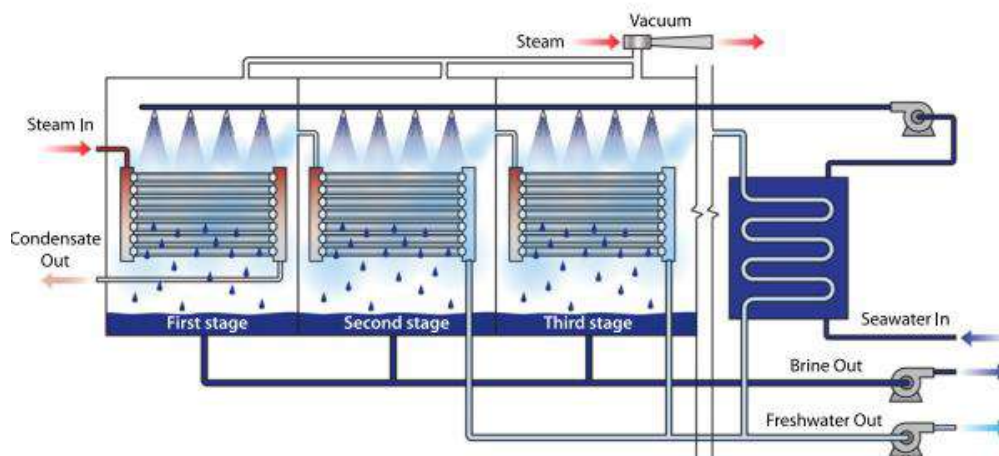


Fig. 1-2 Schéma d'une unité MED

1.3.1.2.2 Distillation flash multi-étagée (MSF)

Le processus de distillation flash multi-étagée (MSF) Figure 1-3 est extrêmement énergivore, nécessitant à la fois des apports en énergie thermique et électrique. L'énergie thermique est fournie sous forme de vapeur à basse pression (1 à 3 bars) pour chauffer la saumure d'alimentation, et de vapeur à moyenne pression pour les éjecteurs, qui créent le vide nécessaire dans différentes sections de l'unité. L'énergie électrique est indispensable au fonctionnement de diverses pompes du système, notamment celles responsables du recyclage, du refroidissement de l'eau, du produit distillé, du rejet de saumure, du condensat, et du dosage des produits chimiques.

Les unités MSF ont généralement des capacités comprises entre 10 000 et 35 000 m³/jour et sont constituées d'une série d'étages, allant de 4 à 40. Chaque étape fonctionne à des températures et pressions progressivement plus basses, provoquant l'évaporation flash de la saumure chauffée, suivie de la condensation de la vapeur en eau douce. Dans ce processus, l'eau de mer d'alimentation est circulée à travers des échangeurs de chaleur dans chaque étape, absorbant la chaleur, ce qui réduit non seulement le besoin d'énergie thermique externe pour chauffer la saumure, mais facilite également la condensation de la vapeur d'eau, qui est collectée sous forme d'eau douce.

Des sources de chaleur externes, telles que des chaudières à combustibles fossiles, la chaleur résiduelle des centrales électriques, des réacteurs nucléaires, des énergies renouvelables ou d'autres sources de chauffage, sont utilisées pour élever la température de l'eau de mer préchauffée à la température de saumure requise, généralement comprise entre 90°C et 110°C. Une fois que la saumure atteint cette température, elle est transférée à travers des étapes maintenues à des pressions de plus en plus basses. À chaque étape, une petite portion de l'eau s'évapore rapidement, tandis que la saumure restante passe à l'étape suivante pour un nouveau processus d'évaporation, jusqu'à ce que la saumure soit finalement évacuée. La vapeur produite à chaque étape est condensée et collectée sous forme d'eau douce [29].

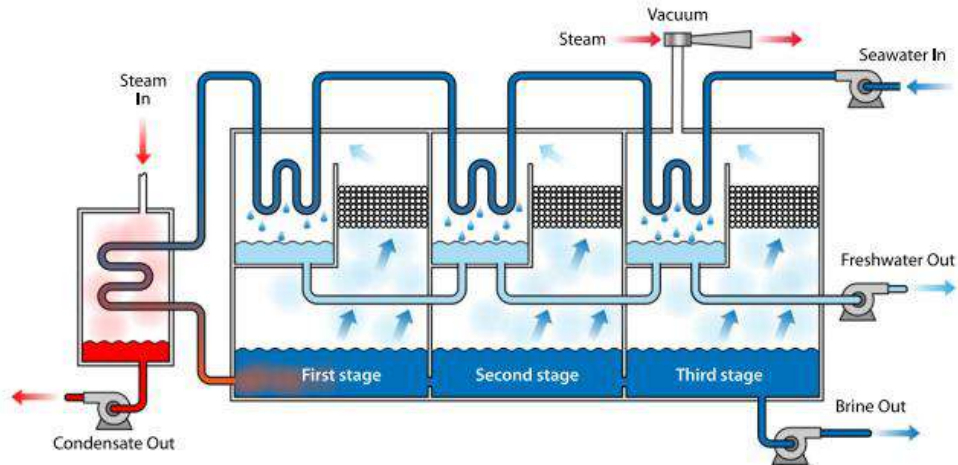


Fig. 1-3 Schéma fonctionnel de l'unité MSF [28]

Les installations de distillation par compression de vapeur utilisent la chaleur produite lors de la compression de la vapeur d'eau pour évaporer l'eau salée, en utilisant deux méthodes principales : la compression mécanique de vapeur (MVC) et la compression thermique de vapeur (TVC). Dans le processus de compression de vapeur (VC), l'eau d'alimentation est introduite via un échangeur de chaleur, où la vapeur est produite dans l'évaporateur et comprimée soit mécaniquement (dans MVC) soit thermiquement (dans TVC). La compression de la vapeur élève sa température suffisamment pour qu'elle puisse servir de source de chaleur pour l'évaporation. La saumure concentrée est extraite de l'évaporateur à l'aide d'une pompe de recirculation de concentré. Ce flux est ensuite divisé : une partie est mélangée avec l'eau d'alimentation entrante, et le reste est dirigé vers l'élimination des déchets. La figure 1-4 illustre les deux méthodes. Dans le système MVC, l'électricité alimente le compresseur, tandis que dans le système TVC, un jet de vapeur crée la basse pression nécessaire au processus [29]. Les unités de compression mécanique de vapeur (MVC) ont généralement une capacité allant jusqu'à environ 3 000 m³/jour, tandis que les unités de compression thermique de vapeur (TVC) peuvent atteindre des capacités allant jusqu'à 20 000 m³/jour. Les systèmes MVC fonctionnent généralement avec une seule étape, tandis que les systèmes TVC sont conçus avec plusieurs étapes pour améliorer l'efficacité et la capacité [31]. Cette différence s'explique par le fait que les systèmes MVC maintiennent la même consommation d'énergie spécifique (énergie par unité d'eau produite) indépendamment du nombre d'étapes. En revanche, l'efficacité thermique des systèmes TVC augmente avec l'ajout d'étapes supplémentaires, permettant ainsi des économies d'énergie accrues à mesure que le système s'agrandit [26].

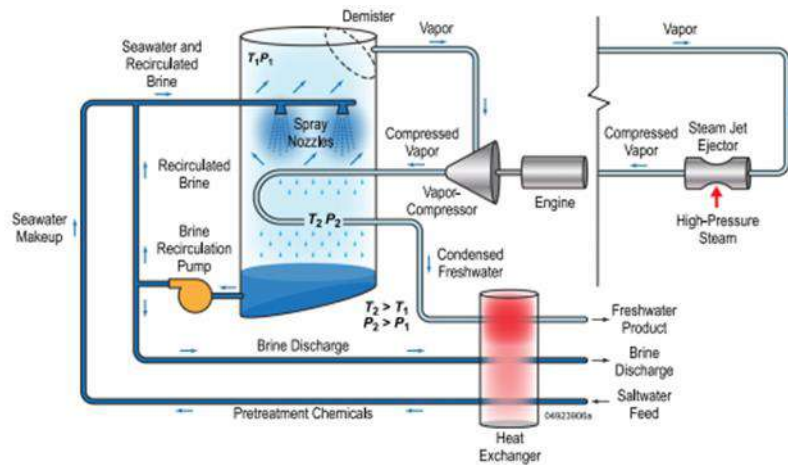


Fig. 1-4 Schéma fonctionnel de l'unité de VC (MVC et TVC)

1.3.1.2.3 Distillation solaire par effet de serre (SSD)

La structure de base d'un distillateur solaire est illustrée à la figure 1-5. Le distillateur solaire fonctionne en capturant le rayonnement solaire qui passe à travers une couverture transparente. Il se compose d'un bassin contenant de l'eau salée, avec deux panneaux en verre ou en plastique inclinés au-dessus du bassin, convergeant au sommet, formant ainsi une structure semblable à une serre. Le bassin est généralement peint en noir pour améliorer l'absorption du rayonnement de longue longueur d'onde qui atteint sa surface. Le rayonnement solaire frappe les panneaux inclinés, créant un effet de serre à l'intérieur de l'appareil, ce qui augmente la température de l'eau salée contenue dans le bassin. À mesure que l'eau de surface s'évapore, la vapeur d'eau produite s'élève, se condense au contact des panneaux inclinés, puis s'écoule vers le bas pour être collectée. Cette eau condensée est ensuite recueillie et retirée, fournissant de l'eau douce [32].

Chapitre 1 : Technologies de dessalement

Les distillateurs solaires peuvent produire 3 à 4 litres d'eau douce par jour et par mètre carré. En raison des faibles taux de production, il est essentiel de minimiser les coûts en utilisant des matériaux de construction peu coûteux [32]. Divers chercheurs ont cherché à améliorer l'efficacité des distillateurs solaires par des modifications de conception, l'intégration d'effets supplémentaires tels que des distillateurs multi-étages sous vide et l'ajout de matériaux absorbants. Ces améliorations ont permis d'augmenter la production d'eau par unité de surface [32]. figure 1-6 présente les différentes configurations de distillateurs solaires.

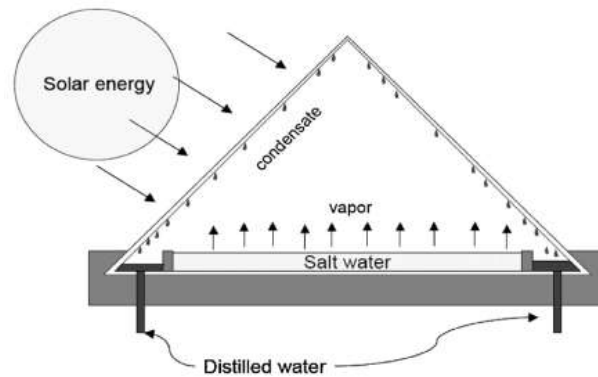


Fig. 1-5 Unité de dessalement par distillateur solaire [32].

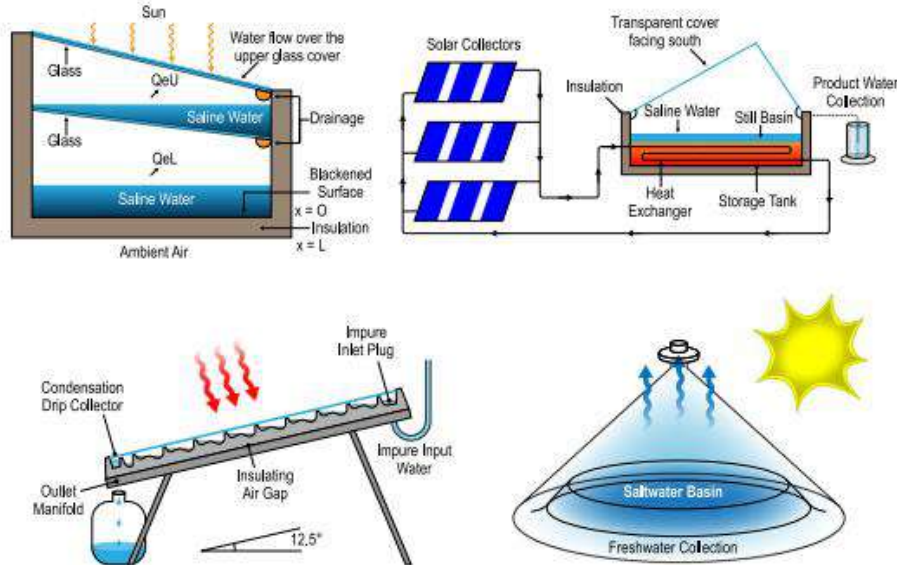


Fig. 1-6 Différents types de distillateurs solaires[32].

1.3.1.2.4 Humidification-Déshumidification (HDH)

Le processus d'humidification-déshumidification (HDH), illustré à la figure 1-7, repose sur le principe selon lequel l'air peut absorber différentes quantités de vapeur d'eau, sa capacité à retenir cette vapeur augmentant avec la température. Par exemple, 1 kg d'air sec peut contenir jusqu'à 0,5 kg de vapeur d'eau, ainsi qu'environ 2814 kJ d'énergie thermique, lorsque sa température passe de 30 °C à 80 °C, comme indiqué dans [25]. Lorsque l'air entre en contact avec de l'eau salée, il absorbe une certaine quantité de vapeur d'eau en utilisant la chaleur sensible de l'eau salée, ce qui entraîne un refroidissement de l'eau. L'eau distillée est ensuite récupérée en exposant l'air humide à une surface de refroidissement, ce qui provoque la condensation d'une partie de la vapeur contenue dans l'air. Cette condensation se produit dans un second échangeur de chaleur, où l'eau salée est préchauffée par récupération de la chaleur latente [25].

Le processus d'humidification peut impliquer le chauffage de l'eau, de l'air, ou une combinaison des deux. En conséquence, les systèmes de dessalement HDH (Humidification-Déshumidification) peuvent être classés en trois catégories : chauffés par l'eau, chauffés par l'air, et chauffés par les deux, eau et air. Une autre méthode de classification des systèmes HDH est basée sur le type de cycle utilisé pour les flux d'eau et d'air, qu'ils soient ouverts ou fermés. Ainsi, ces systèmes se divisent en quatre groupes : air ouvert/eau ouverte, air ouvert/eau fermée, air fermé/eau ouverte, et air fermé/eau fermée. De plus, les systèmes de dessalement HDH peuvent être classés en fonction du mode de circulation de l'air, qui se répartit en deux catégories : circulation forcée ou circulation naturelle [33] figure 1-8 montre Classifications des procédés de dessalement.

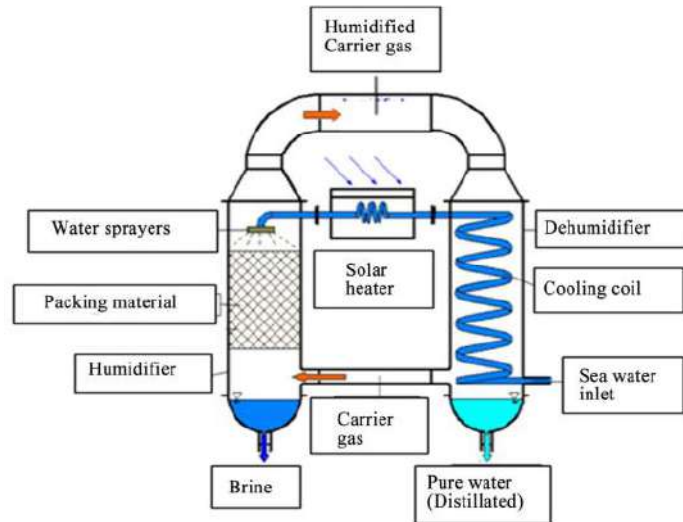


Fig. 1-7 Un processus simple d'humidification-déshumidification (HDH) [25]

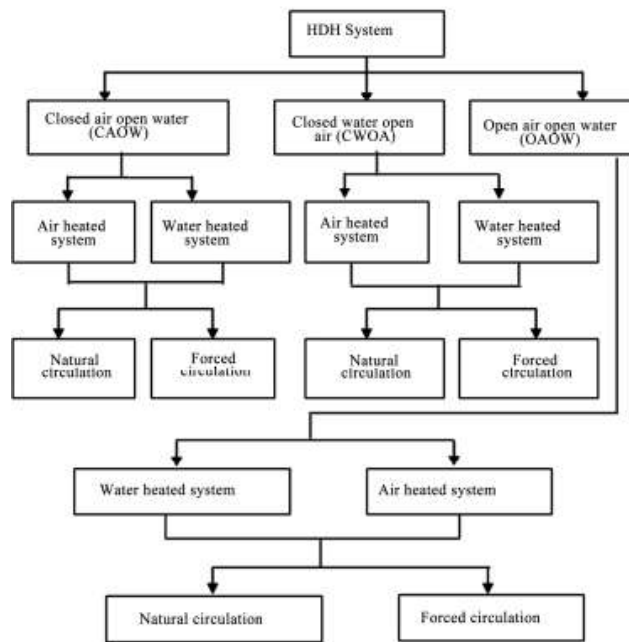


Fig. 1-8 Classifications des procédés de dessalement HDH [19]

1.3.1.2.5 Cheminée Solaire (SC)

Le système de cheminée solaire figure 1-9 est utilisé à la fois pour la production d'énergie et le dessalement de l'eau de mer. Il se compose d'un capteur solaire, d'une cheminée solaire, d'une turbine, d'un générateur, et d'un condenseur à haute efficacité. Le système est placé au-dessus d'un bassin d'eau salée, qui agit comme un lit absorbant. Le rayonnement solaire chauffe à la fois l'eau et l'air, entraînant l'évaporation de l'eau, la production d'eau distillée, ainsi que le déplacement de l'air à travers la cheminée pour générer de l'électricité [34].

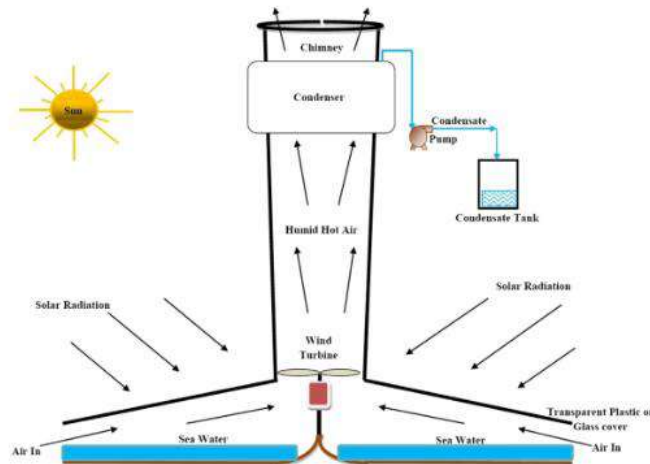


Fig. 1-9 Système combiné de cheminée solaire pour la production d'électricité et le dessalement de l'eau de mer[34].

1.3.2 Filtration

Le dessalement par filtration est un processus de purification de l'eau qui élimine le sel et les impuretés de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre en utilisant des membranes semi-perméables ou des supports de filtration. Contrairement au dessalement thermique, qui repose sur l'évaporation et la condensation, le dessalement par filtration sépare physiquement les sels dissous et les contaminants à travers différentes techniques de filtration ,Ci-dessous les principales technologies de filtration pour le dessalement.

1.3.2.1 Osmose Inverse (RO)

L'osmose inverse (RO) est un processus de séparation basé sur une membrane, où l'eau est séparée des sels dissous dans une solution saline sous pression en passant à travers une membrane perméable à l'eau (voir figure 1-10). Le passage de l'eau à travers la membrane est induit par la différence de pression entre l'eau d'alimentation sous pression et l'eau produite, maintenue à une pression proche de la pression atmosphérique. L'eau d'alimentation restante, désormais concentrée, reste sous pression dans le système sous forme de saumure. Ce processus n'implique ni chauffage ni changement de phase. L'énergie principale nécessaire est celle utilisée pour pressuriser l'eau d'alimentation au début [35].

La pression de fonctionnement des systèmes d'osmose inverse varie en fonction du type d'eau traité. Pour les systèmes traitant l'eau saumâtre, la pression se situe entre 15 et 25 bars, tandis que pour les systèmes traitant l'eau de mer, elle varie entre 54 et 80 bars, la pression osmotique de l'eau de mer étant d'environ 25 bars [30]. Aux États-Unis, la majorité de la production d'eau repose sur des systèmes d'osmose inverse (RO), principalement pour le traitement des eaux saumâtres et de surface [36].

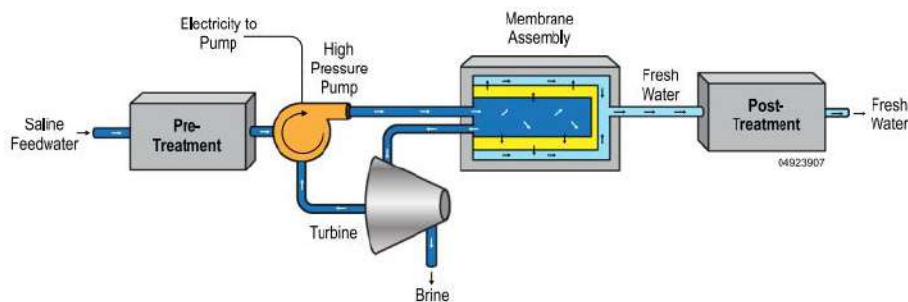


Fig. 1-10 Schéma du système d'osmose inverse (RO)

L'osmose directe (FO), également appelée osmose avant, est un processus de séparation par membrane dans lequel l'eau est transportée à travers une membrane semi-perméable, imperméable aux sels, grâce à un gradient de pression osmotique. Ce procédé a le potentiel de dessaler les sources d'eau salée à un coût inférieur et avec des taux de récupération plus élevés, en utilisant des forces osmotiques pouvant être nettement plus puissantes que les forces hydrauliques employées dans l'osmose inverse (RO) [37].

1.3.2.2 Osmose directe (FO)

Dans le processus d'osmose directe (FO), un gradient de pression osmotique est créé par une solution très concentrée, appelée "solution d'extraction", qui permet à l'eau de diffuser à travers une membrane semi-perméable depuis l'eau d'alimentation saline, qui a une concentration plus faible (voir figure 1-11). En conséquence, une solution d'extraction diluée est produite, qui peut ensuite être traitée pour extraire de l'eau douce. En choisissant une solution d'extraction adéquate, il est possible de générer des forces de pression osmotique élevées, permettant des taux de récupération élevés qui, en théorie, peuvent conduire à la précipitation du sel.

L'eau d'alimentation saline est introduite dans l'unité FO, qui peut intégrer des modules de membrane en spirale ou en fibres creuses. L'eau d'alimentation et la solution d'extraction circulent tangentiellement à la membrane dans une configuration en flux croisé. Par le processus d'osmose, l'eau passe de l'eau saline à travers la membrane rejetant les sels pour rejoindre la solution d'extraction. Pour produire de l'eau potable, la solution d'extraction diluée est traitée dans une unité de séparation, telle qu'une colonne de distillation ou une unité de séparation par membrane gazeuse. La solution d'extraction séparée est ensuite recyclée dans l'unité FO [31].

Le processus d'osmose directe (FO) se distingue par son faible potentiel d'encrassement, ses faibles besoins en énergie, sa simplicité de fonctionnement et sa grande fiabilité [38].

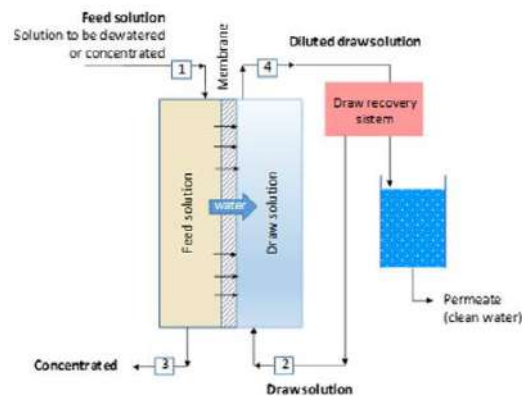


Fig. 1-11 Schéma du processus d'osmose directe [39].

1.3.2.3 Nanofiltration (NF)

La nanofiltration est un processus de filtration par membrane conçu pour éliminer les ions dissous ou les composés organiques, produisant ainsi une eau adoucie. Il s'agit d'eau dont la concentration en ions responsables de l'entartrage, tels que le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}), est réduite.

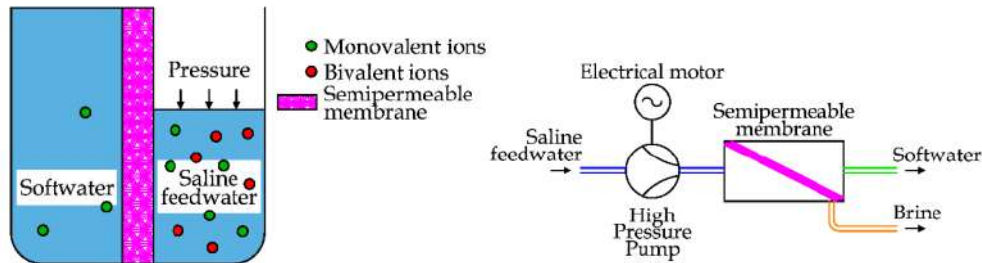


Fig. 1-12 Principes de fonctionnement et schéma d'une unité de nanofiltration [23].

Conceptuellement, la nanofiltration est similaire à l'osmose inverse (RO), la principale différence résidant dans le mécanisme spécifique par lequel les ions sont séparés de la solution saline, comme illustré à la figure 12 [23].

Les membranes de nanofiltration (NF) sont largement utilisées dans divers domaines, en particulier dans le traitement de l'eau, des eaux usées, et dans les processus de dessalement. De plus, les membranes NF sont employées dans les industries pharmaceutiques et biotechnologiques, ainsi que dans le secteur alimentaire et les milieux non aqueux [40]. Les principales caractéristiques distinctives des membranes de nanofiltration (NF) incluent leur faible rejet des ions monovalents, leur fort rejet des ions divalents, et des débits de flux plus élevés par rapport aux membranes d'osmose inverse (RO) [40]. Comme illustré à la figure 11, les technologies de filtration sont classées en fonction de la taille des particules et des molécules que la membrane est capable de retenir[41].

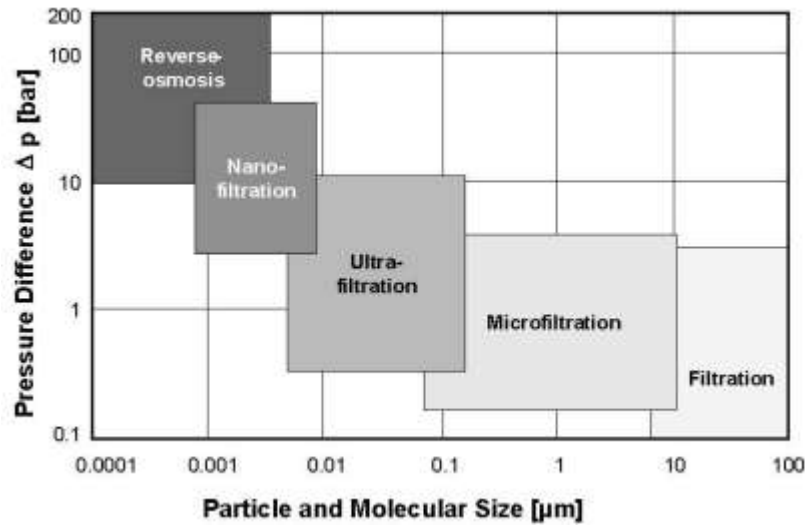


Fig. 1-13 Technologies de filtration selon la pression de gradient requise et la taille des pores [23]

1.3.2.4 Résine Échangeuse d'Ions (IXR)

Le terme « résine échangeuse d'ions » (IXR) désigne un ensemble de composés organiques traités chimiquement pour interagir avec les ions présents dans une solution. Ces résines capturent des ions spécifiques de la solution tout en libérant simultanément d'autres ions dans celle-ci. Historiquement, cette fonction était assurée par des minéraux appelés zéolites, qui possèdent des propriétés similaires.

Les résines acides, également appelées résines cationiques, sont conçues pour capturer des ions positifs (tels que Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Mn^{2+} , Fe^{3+}) et libérer des ions H^+ en échange. Ce processus diminue la dureté de l'eau tout en augmentant son acidité, car la concentration accrue d'ions H^+ abaisse le pH. En revanche, les résines basiques, ou résines anioniques, sont utilisées pour capturer des ions négatifs comme Cl^- , NO_3^{2-} , SO_4^{2-} , SiO_2^- , CO_3^{2-} et libérer des ions OH^- .

Au cours du processus normal, les résines se saturent progressivement par échange d'ions. Par conséquent, une régénération périodique est nécessaire pour restaurer leur fonctionnalité. Ce processus de régénération consiste à utiliser des solutions acides, comme H_2SO_4 et HCl , pour les résines acides, et des solutions basiques, telles que NaOH et NH_4OH , pour les résines basiques [23].

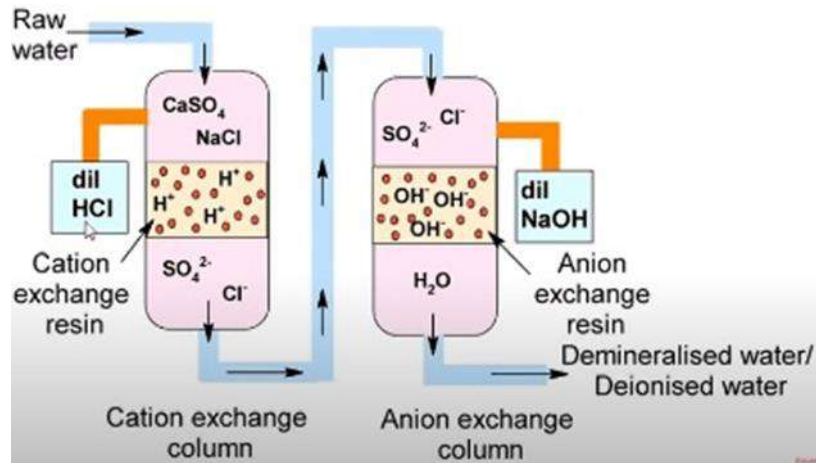


Fig. 1-14 Unité de résine échangeuse d'ions [42]

1.3.2.5 Distillation par Membrane (MD)

La distillation par membrane (MD) est une technique de séparation et de distillation dans laquelle l'eau est transportée entre deux flux — l'un chaud et l'autre froid — séparés par une membrane hydrophobe. Cette membrane ne laisse passer que la vapeur d'eau, bloquant ainsi l'eau liquide et les particules dissoutes. Le transfert de vapeur est induit par un gradient de température entre les deux flux, créant une différence de pression de vapeur. Cette différence permet à la vapeur de se déplacer à travers la membrane vers une surface de condensation. La figure 1-15 présente un schéma typique de ce processus.

Dans ce procédé, l'eau de mer est introduite dans le condenseur à une température d'environ 25°C et ressort à une température plus élevée. Elle est ensuite chauffée jusqu'à environ 80°C à l'aide de sources d'énergie externes telles que l'énergie solaire, la géothermie ou la chaleur résiduelle industrielle. La distillation par membrane offre l'avantage d'être un procédé simple, ne nécessitant qu'une faible différence de température pour fonctionner. Toutefois, l'efficacité globale du processus dépend de l'ampleur du gradient de température et du taux de récupération. Lorsqu'il fonctionne avec une faible différence de température, le procédé requiert un volume d'eau considérable, ce qui diminue son efficacité énergétique.

La distillation par membrane est perçue comme une technologie prometteuse, notamment dans les contextes où des sources de chaleur à basse température, comme l'énergie solaire, géothermique ou la chaleur résiduelle, sont disponibles. Elle peut être appliquée pour la production d'eau douce,

l'élimination des métaux lourds, ainsi que dans certains procédés de l'industrie alimentaire. Cependant, cette technologie n'est pas encore commercialement viable en raison des coûts élevés et des défis techniques associés aux membranes [29]. La majorité des études sur la distillation par membrane (MD) sont réalisées à l'échelle de laboratoire afin d'examiner les effets de diverses conditions de fonctionnement. Toutefois, les recherches à grande échelle axées sur les applications industrielles de la MD restent limitées, ce qui fait de ce domaine une perspective de recherche avec un potentiel significatif pour des explorations approfondies [43].

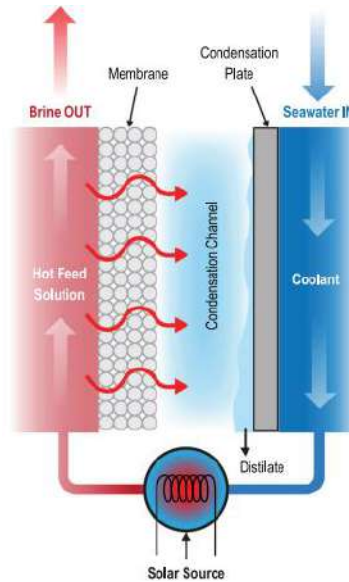


Fig. 1-15 Schéma de l'unité de distillation membranaire solaire (MD)[29].

Dans la technologie de distillation par membrane (MD), quatre configurations ont été utilisées pour séparer les solutions aqueuses d'alimentation à l'aide d'une membrane hydrophobe microporeuse. Ces configurations seront examinées en détail.

1.3.2.5.1 Distillation par Membrane à Contact Direct (DCMD)

Dans cette configuration (voir figure 1-16), la solution d'alimentation chaude est en contact direct avec la surface chauffée de la membrane. L'évaporation se produit à l'interface entre l'alimentation et la membrane. La vapeur résultante est entraînée par la différence de pression à travers la membrane vers le côté perméat, où elle se condense à l'intérieur du module de membrane. En raison de la nature hydrophobe de la membrane, la solution liquide ne peut pas pénétrer dans celle-ci, garantissant que seuls les pores de la membrane sont occupés par la phase gazeuse [43].

La distillation par membrane à contact direct (DCMD) est la configuration la plus simple de la distillation par membrane et est largement utilisée dans les processus de dessalement ainsi que pour la concentration de solutions aqueuses dans l'industrie alimentaire [44], ou la fabrication d'acides [45].

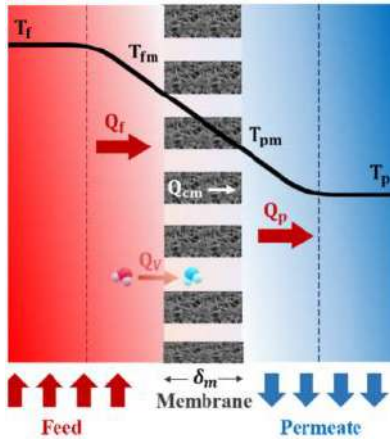


Fig. 1-16 Distillation membranaire à contact direct [46].

1.3.2.5.2 Distillation par Membrane avec Espace d'Air (AGMD)

Le schéma du système de distillation par membrane avec espace d'air (AGMD) est illustré à la figure 1-17. Dans cette configuration, la solution d'alimentation entre uniquement en contact avec la face chauffée de la membrane. Une couche d'air stagnant est placée entre la membrane et la surface de condensation, créant un espace d'air. La vapeur traverse cet espace et se condense sur la surface froide à l'intérieur de la cellule de membrane. Ce design permet de réduire efficacement les pertes de chaleur par conduction. Cependant, il ajoute également une résistance au transfert de masse, ce qui est considéré comme un inconvénient [46]. La configuration avec espace d'air est la plus polyvalente et peut être utilisée dans une large gamme d'applications [45].

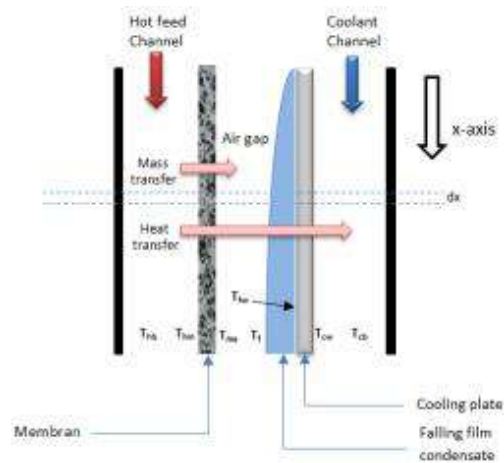


Fig. 1-17 Distillation membranaire à gap d'air [47].

1.3.2.5.3 Distillation par Membrane avec Gaz de Balayage (SGMD)

Dans la distillation par membrane avec gaz de balayage (SGMD), comme illustré dans le schéma de la figure 1-18, un gaz inerte est utilisé pour balayer la vapeur du côté perméat de la membrane, dirigeant cette vapeur pour qu'elle se condense en dehors du module de membrane. À l'instar de la distillation par membrane avec espace d'air (AGMD), une barrière gazeuse est présente pour minimiser les pertes de chaleur ; cependant, contrairement à AGMD, cette barrière n'est pas stationnaire, ce qui améliore le coefficient de transfert de masse [25]. Cette configuration est efficace pour l'élimination des composés volatils des solutions aqueuses .[30] L'inconvénient principal de cette configuration est qu'un petit volume de perméat se diffuse dans un grand volume de gaz de balayage, nécessitant ainsi l'utilisation d'un condenseur de grande taille [25].

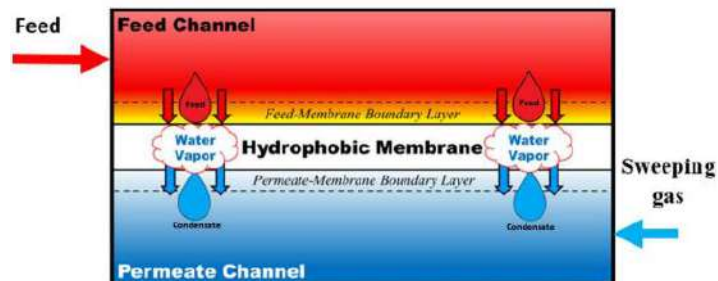


Fig. 1-18 Distillation membranaire à gaz balayé [48]

1.3.2.5.4 Distillation par Membrane sous Vide (VMD)

Le schéma de ce module est présenté à la figure 1-19. Dans la configuration de distillation par membrane sous vide (VMD), une pompe est utilisée pour créer un vide du côté perméat de la membrane, et la condensation se produit à l'extérieur du module de membrane [48]. L'un des principaux avantages de la distillation par membrane sous vide (VMD) par rapport aux autres configurations de distillation par membrane est la quasi-absence de pertes de chaleur conductrice à travers la membrane [43].

L'inconvénient principal de cette configuration est qu'un petit volume de perméat se diffuse dans un grand volume de gaz de balayage, ce qui nécessite l'utilisation d'un condenseur de plus grande taille [43].

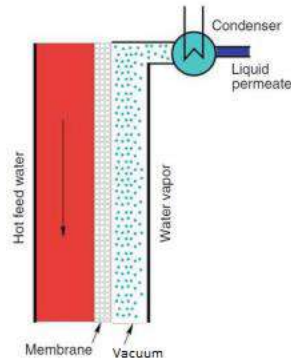


Fig. 1-19 Distillation membranaire sous vide [49].

1.3.2.6 Électrodialyse (ED)

L'électrodialyse (ED) figure 1-20 est une technique de séparation électrochimique qui fonctionne sous pression atmosphérique, en utilisant un potentiel électrique pour transférer les ions de sel à travers des membranes sélectives aux ions par courant continu, produisant ainsi de l'eau douce. Contrairement aux autres méthodes principales de dessalement, l'ED transporte les sels dissous hors de l'eau de mer d'alimentation, au lieu de retirer l'eau de la solution saline. Pendant le processus, les ions de sel positifs migrent à travers les membranes perméables aux cations vers les électrodes chargées négativement, tandis que les ions de sel négatifs se déplacent à travers les membranes perméables aux anions vers l'électrode chargée positivement [50].

Chapitre 1 : Technologies de dessalement

Un système d'électrodialyse (ED) comprend plusieurs composants clés, notamment un système de prétraitement, un empilement de membranes, une pompe de circulation à basse pression, une alimentation en courant continu et un système de post-traitement. La capacité de production des systèmes ED peut varier de 2 à 145 000 m³/jour [29].

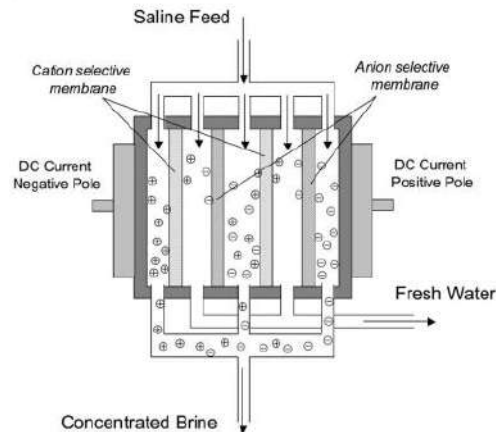


Fig. 1-20 Schéma fonctionnel du processus de dessalement par électrodialyse (ED) [31].

1.3.3 Cristallisation

Desalination by Crystallization is a process that removes salt from water by inducing the formation of salt crystals. It involves evaporating water until salts reach saturation and crystallize, allowing for the separation of purified water and solid salt.

1.3.3.1 Congélation

Pendant le processus de congélation, les sels dissous sont naturellement exclus des cristaux de glace au fur et à mesure de leur formation. En refroidissant l'eau salée dans des conditions contrôlées, l'eau de mer peut être dessalée grâce à la formation de cristaux de glace. Avant la congélation complète de l'eau, l'eau restante et les cristaux de glace sont généralement lavés et rincés pour éliminer les sels résiduels. Une fois que la glace est fondue, elle produit de l'eau douce. Théoriquement, la méthode de congélation présente plusieurs avantages par rapport à la distillation, qui était le principal procédé de dessalement lorsque la congélation a été introduite. Parmi ces avantages, on retrouve une consommation énergétique théorique plus faible pour une opération en une seule étape, un risque réduit de corrosion et moins de problèmes liés à l'entartrage ou à la précipitation.

Chapitre 1 : Technologies de dessalement

Cependant, le principal inconvénient de cette méthode réside dans la complexité mécanique du traitement et de la manipulation des mélanges glace-eau [30]. Il existe trois types de dessalement par congélation : le dessalement par congélation à contact direct, le dessalement par congélation à contact indirect et le dessalement par congélation sous vide [34].

1.3.3.1.1 Dessalement par congélation à contact direct

Dans le processus de dessalement par congélation à contact direct, un réfrigérant liquide, tel que le n-butane, est directement mélangé avec l'eau salée d'alimentation à l'intérieur d'un congélateur. Le réfrigérant absorbe la chaleur de l'eau salée, provoquant ainsi la formation de cristaux de glace. Ces cristaux de glace sont ensuite séparés et purifiés pour produire de l'eau potable [34].

1.3.3.1.2 Dessalement par congélation à contact indirect

Dans le dessalement par congélation à contact indirect, le réfrigérant et l'eau salée restent séparés par des surfaces de transfert de chaleur à l'intérieur du cristalliseur, évitant tout mélange direct. La glace se forme sur les surfaces de transfert de chaleur lorsque la chaleur est extraite de l'eau salée, puis cette glace est raclée des surfaces pour être traitée ultérieurement [34].

1.3.3.1.3 Dessalement par congélation sous vide

Dans un système de dessalement par congélation sous vide, l'eau salée d'alimentation est refroidie en dessous de son point triple à une pression réduite, ce qui entraîne la formation de glace et de vapeur. La glace formée est collectée, tandis que la vapeur est compressée et condensée dans une chambre de congélation [34].

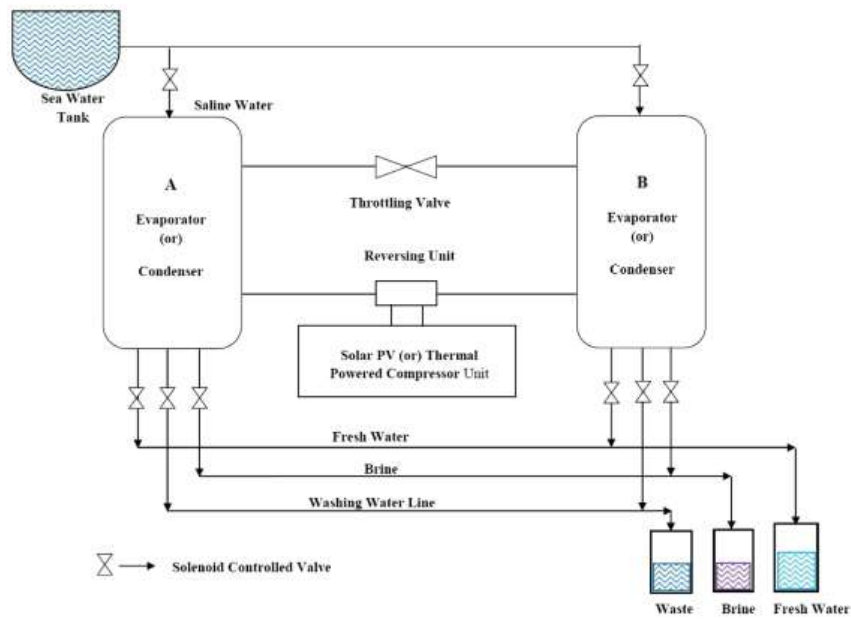


Fig. 1-21 Dessalement par congélation utilisant une pompe à chaleur à compression de vapeur auto-inversible [34].

1.3.3.2 Processus de Dessalement par Hydrate

Le processus de dessalement utilisant la technologie des hydrates gazeux repose sur un mécanisme de changement de phase, dans lequel l'eau liquide est transformée en hydrate solide, permettant ainsi de séparer les solides dissous de la phase liquide. Ce processus nécessite un formateur d'hydrate, tel qu'un gaz, qui est mélangé avec l'eau salée, suivi d'une séparation par formation d'hydrate. Le schéma de flux du processus, illustré à la figure 1-22, décrit la procédure de dessalement utilisant la technologie des hydrates gazeux. Avant d'introduire l'eau de mer dans le réacteur, son contenu thermique est réduit à l'aide d'un échangeur de chaleur [34].

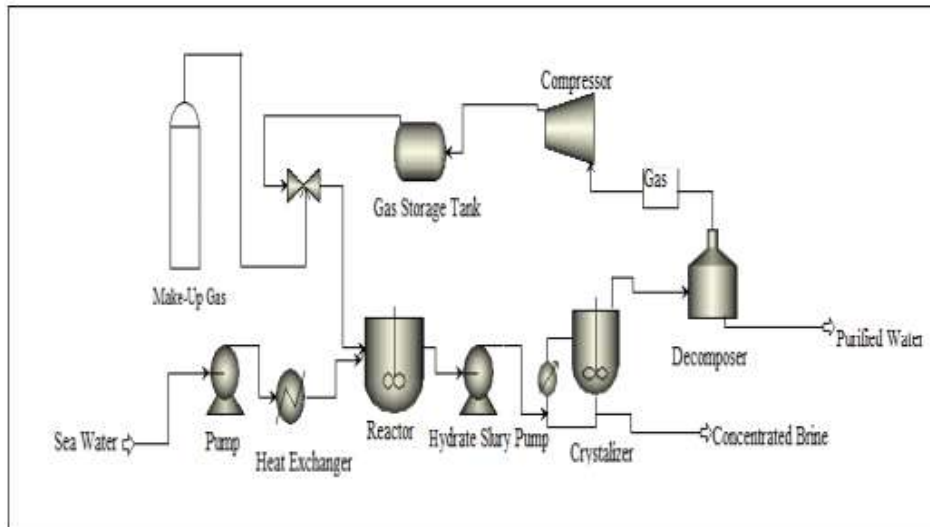


Fig. 1-22 Schéma typique de procédé pour le dessalement utilisant la technologie des hydrates [34].

Le réacteur est connecté à une chambre de gaz d'alimentation, qui fournit le gaz nécessaire au réacteur. Pour compenser les pertes de gaz durant le processus, une bouteille de gaz de remplacement est intégrée au système. À l'intérieur du réacteur, l'eau de mer et le gaz d'alimentation sont soigneusement mélangés à l'aide d'un agitateur fonctionnant à une vitesse de rotation spécifique, garantissant ainsi un mélange adéquat pour former des hydrates gazeux. Cela se produit en créant une interface optimale entre les molécules d'eau et de gaz sous des conditions contrôlées de pression et de température. Le réacteur fonctionne à basse température et haute pression pour favoriser la formation des hydrates gazeux.

Une fois le mélange d'hydrates formé, il est transféré dans le cristalliseur à l'aide d'une pompe à boue. Dans le cristalliseur, le mélange d'hydrates se transforme en une structure solide cristalline, tandis que la saumure concentrée est séparée et évacuée. L'hydrate de gaz cristallin est ensuite transféré dans un décomposeur, où il se décompose à nouveau en gaz et en eau par application de chaleur. Le gaz est collecté dans un réservoir de stockage via la partie supérieure du décomposeur, tandis que l'eau restante est recueillie en bas. Cette eau peut être utilisée pour des applications industrielles et domestiques [34].

1.3 L'évolution des technologies de dessalement : des procédés thermiques aux innovations émergentes

Les technologies commerciales reposent sur des procédés thermiques (distillation flash multi-étagée (MSF) et distillation à effets multiples (MED)), des procédés à membrane (osmose inverse (RO)), ainsi que sur d'autres techniques en développement, telles que la compression de vapeur (VC) [18]. En 2013, l'osmose inverse était considérée comme la technique la plus utilisée avec une part de 65 %, suivie par 22 % pour la distillation flash multi-étagée (MSF) [51]. figure 1-23 montre les installations de dessalement opérationnelles actuelles (en 2019), où l'utilisation de RO est passée à 69 %, tandis que la technologie MSF a diminué à 18 %. De nombreuses techniques, telles que l'osmose directe (FO), la désionisation par capacité et les hydrates gazeux, sont encore en cours de recherche et de développement, et sont utilisées à plus petite échelle par rapport à RO et MSF [52]. Le procédé MSF offre une haute qualité du distillat et une grande fiabilité, et ce procédé est couramment utilisé pour les grandes installations de dessalement d'eau de mer à double usage. Cependant, pour les installations à usage unique, l'osmose inverse est devenue une option compétitive, particulièrement pour les capacités modérées. Le procédé RO à membrane, étant une technologie économique adaptée aux capacités de petite et moyenne échelle, est principalement utilisé dans les pays occidentaux et développés. Le coût du combustible, la capacité de dessalement et la production d'énergie influencent fortement le choix du procédé de dessalement [18].

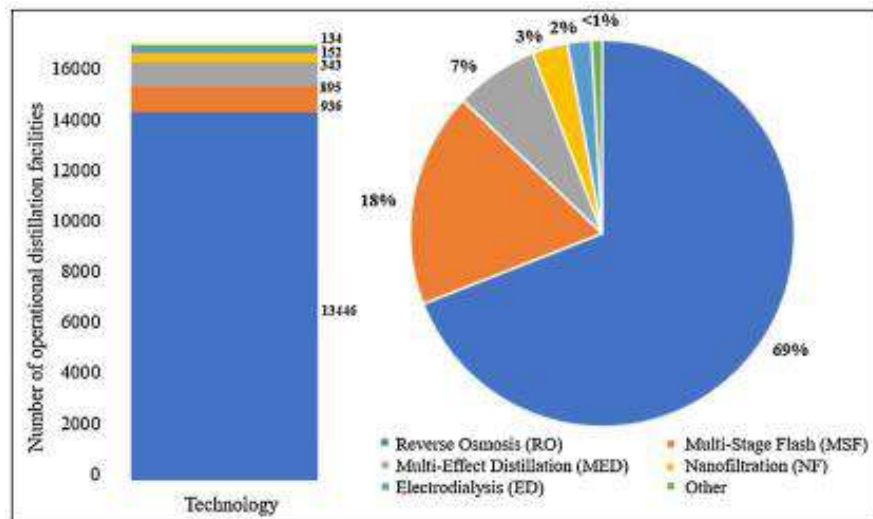


Fig. 1-23 Technologies disponibles basées sur les installations de dessalement opérationnelles [18].

Chapitre 1 : Technologies de dessalement

Les systèmes de dessalement alimentés par les énergies renouvelables (RED) suscitent un intérêt croissant dans le monde entier [20]. Jusqu'à récemment, environ 130 usines de dessalement alimentées par des énergies renouvelables représentaient seulement 1 % de la capacité totale mondiale de dessalement [53]. Tableau 1-1 présente une sélection d'usines RED dans divers pays [54].

Les principales sources d'énergie renouvelable sont le solaire, l'éolien, la géothermie, les vagues et les marées, en plus de l'hydroélectricité et de la biomasse. Cependant, l'hydroélectricité et la biomasse ne sont pas adaptées pour un couplage avec les technologies de dessalement, car elles requièrent des ressources en eau, souvent limitées dans les pays confrontés à une pénurie hydrique. L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus adaptée pour l'intégration avec la technologie de dessalement, car elle peut fournir à la fois la chaleur et l'électricité nécessaires à tous les procédés de dessalement. Les technologies photovoltaïques (PV), Fresnel linéaire, miroir parabolique et récepteur central sont les principales méthodes de captage solaire, avec le récepteur central ou la technologie solaire concentrée (CSP) étant la plus prometteuse [20]. La CSP peut produire des températures élevées d'environ 400 à 1000 °C, utilisées pour générer de la vapeur pour faire fonctionner des turbines à gaz ou à vapeur [55].

Près de 70 % des Installations de dessalement utilisant des énergies renouvelables fonctionnent grâce à l'énergie solaire [56]. Cependant, la collecte de cette énergie requiert de grandes surfaces de terrain, potentiellement utilisables à d'autres fins. L'énergie éolienne convient mieux aux zones côtières, où le vent et l'eau sont facilement disponibles [20]. Les eaux géothermiques à basse température, présentes dans les 100 premiers mètres de profondeur, peuvent représenter une source d'énergie viable pour le dessalement [57]. Même avec une énergie géothermique limitée, les procédés thermiques de dessalement, tels que la distillation à effets multiples (MED), la compression thermique de vapeur (TVC), la distillation flash à un seul étage (SF) et la distillation flash multi-étagée (MSF), peuvent tirer un avantage significatif en étant couplés à des sources géothermiques, ce qui permet de réduire l'énergie nécessaire au préchauffage [58].

Chapitre 1 : Technologies de dessalement

Leijon, J. (2020), dans sa thèse de doctorat, présente des recherches sur le dessalement alimenté par l'énergie des vagues. L'étude suggère que l'énergie des vagues pourrait être une alternative prometteuse pour les îles ou les régions côtières confrontées à des pénuries d'eau douce [59].

La figure 1-24 (a) montre la contribution de chaque source d'énergie renouvelable aux technologies de dessalement dans le monde [32]. La figure 1-24 (b) présente les principales sources d'énergie renouvelable et leur potentiel de couplage avec les installations de dessalement [20].

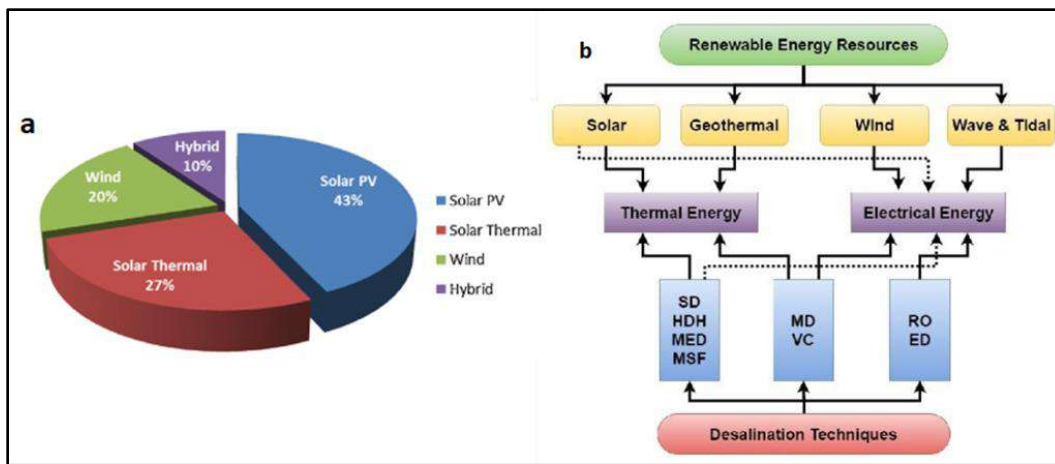


Fig. 1-24 (a) montre le pourcentage des sources d'énergie renouvelable dans les systèmes RED à l'échelle mondiale. (b) l'intégration des procédés de dessalement avec les sources d'énergie renouvelable

Table 1-1 Sélection d'installations RED. [20]

Nom de l'installation de dessalement	Localisation	Technologie de dessalement	Capacité (m ³ /j)	Source d'énergie renouvelable
Kimolos	Grèce	MED	200	Géothermie
Université Keio	Japon	MED	100	Collecteurs solaires
PSA	Espagne	MED	72	Energie solaire concentrée (CSP)
Ydriada	Grèce	RO	80	Éolienne
Maroc	Maroc	RO	12-24	Photovoltaïque (PV)
Oyster	Écosse	RO	n.d.	Énergie des vagues

1.4 Conclusion

L'évolution des technologies de dessalement a joué un rôle crucial dans la réponse à la demande croissante en eau douce à l'échelle mondiale, alimentée par l'augmentation de la population et les changements climatiques. Initialement fondé sur des méthodes thermiques telles que la distillation flash multi-étagée (MSF) et la distillation à effets multiples (MED), le dessalement a connu des progrès significatifs avec l'avènement des technologies à membrane, comme l'osmose inverse (RO). Ces technologies modernes offrent une meilleure efficacité énergétique et une grande capacité d'adaptation, ce qui les rend adaptées à une large gamme d'applications, notamment dans les régions où la pénurie d'eau est aiguë.

Comme le souligne ce chapitre, bien que les méthodes thermiques restent pertinentes, surtout pour les applications industrielles à grande échelle, la transition vers des procédés basés sur les membranes reflète la recherche continue de solutions économiques et durables. Les technologies émergentes, y compris l'osmose directe (FO), la désionisation par capacité (CDI) et les hydrates gazeux (HY), présentent un potentiel pour réduire davantage la consommation énergétique et élargir le champ d'application du dessalement. Par ailleurs, l'intégration de sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire et l'éolien, dans les systèmes de dessalement constitue une voie essentielle pour le développement de solutions écologiquement durables.

En conclusion, la technologie de dessalement est prête à poursuivre son évolution, avec des recherches et des innovations en cours offrant de nouvelles perspectives en termes d'efficacité et de durabilité. Alors que le monde fait face à une pénurie d'eau croissante, l'avancement des méthodes de dessalement sera essentiel pour garantir un approvisionnement en eau douce fiable et durable pour les générations futures.

Chapitre 2 : l'état de l'art

2 Chapitre 2 : l'état de l'art

2.1 Introduction

Ce chapitre propose une revue approfondie des technologies de pointe liées à cette recherche, en se concentrant sur l'intégration de l'énergie solaire et de la géothermie peu profonde dans les systèmes de dessalement. La demande croissante de méthodes de production d'eau douce durables et efficaces a conduit à des avancées significatives dans ces systèmes alimentés par des énergies renouvelables, qui apparaissent comme une alternative prometteuse aux processus de dessalement traditionnels.

Les technologies abordées dans ce chapitre explorent diverses approches innovantes du dessalement, telles que les systèmes d'irrigation par condensation (CI), qui utilisent l'énergie solaire pour évaporer l'eau de mer et l'énergie géothermique souterraine pour condenser l'air humide résultant. Les premières études théoriques et expérimentales, comme celles réalisées par Widegren, Gustafsson et Lindblom, ont jeté les bases de la compréhension du potentiel des systèmes CI pour l'irrigation et la production d'eau potable. Le chapitre examine également les développements plus récents, y compris les études numériques d'Okati et de ses collaborateurs, qui ont introduit des modèles avancés optimisant les paramètres du système pour améliorer la production d'eau douce grâce à l'humidification solaire et à la condensation souterraine.

En outre, ce chapitre explore les systèmes hybrides émergents qui combinent l'énergie solaire et géothermique pour le dessalement de l'eau. Ces systèmes montrent comment l'énergie renouvelable peut être efficacement exploitée pour réduire les coûts énergétiques et garantir une production continue d'eau douce, même dans des conditions environnementales variables. Les recherches couvrent également des conceptions innovantes, telles que le condenseur à vortex pour la condensation de l'humidité atmosphérique, qui fonctionne sans sources d'énergie conventionnelles externes, ouvrant de nouvelles perspectives pour la production autonome d'eau.

À travers cette revue des recherches existantes, ce chapitre vise à fournir une base solide pour comprendre les technologies actuelles de dessalement alimentées par des énergies renouvelables et à identifier les domaines où des avancées supplémentaires sont nécessaires pour améliorer l'efficacité et la scalabilité.

2.2 Système d'irrigation par condensation (CI)

L'énergie solaire et la géothermie peu profonde se révèlent être deux sources d'énergie durables pour alimenter le processus de dessalement. Le premier système proposé, utilisant à la fois l'énergie solaire et géothermique de surface, est le système d'irrigation par condensation (CI), comme illustré à la figure 2-1. Cette approche innovante exploite l'énergie solaire pour évaporer l'eau salée, par exemple à travers des distillateurs solaires. L'air humide ainsi généré est ensuite acheminé dans un réseau souterrain de tuyaux. En se refroidissant sous terre, la vapeur se condense en eau douce sur les parois intérieures des tuyaux. Cette eau peut ensuite être utilisée pour l'irrigation ou pour la production d'eau potable [60,61].

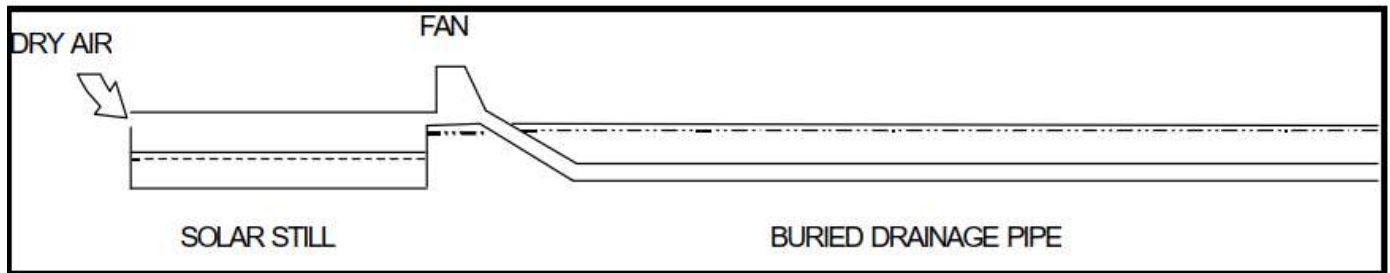


Fig. 2-1 Schéma du système d'irrigation.

2.2.1 Étude de Widegren

L'une des premières études théoriques sur le système d'irrigation par condensation (CI) a été réalisée par Widegren en 1986. Selon cette recherche, le système pourrait irriguer une surface d'un hectare en utilisant 200 tuyaux de 50 mètres de longueur et de 0,1 mètre de diamètre chacun. Le ventilateur nécessaire pour propulser l'air humide consomme entre 3 et 10 kW d'énergie [60].

2.2.2 Étude de Gustafsson et Lindblom

Gustafsson et Lindblom [60] ont réalisé des recherches théoriques, expérimentales et numériques sur le système CI dans le cadre de leur mémoire de maîtrise, comme illustré à la figure 2-2. Leurs conclusions théoriques ont révélé que la quantité totale d'eau douce obtenue à partir d'un seul tuyau sur une période de fonctionnement de dix heures est de 913 kg, et que l'approvisionnement en eau d'irrigation par jour et par unité de surface est de 4,6 mm/m². Dans le cas d'un champ avec des

Chapitre 2 : l'état de l'art

tuyaux parallèles, lorsque l'air est refroidi, par exemple, de 70 °C à 40 °C avec 20 tuyaux de 100 m de longueur chacun et espacés de 2 m, la quantité d'eau douce produite sera de 493 kg/jour.

Pour une utilisation du système CI dans la production d'eau potable, il est recommandé d'utiliser un tuyau de 0,3 m de diamètre et de 50 m de longueur. Leur étude expérimentale, illustrée dans la figure 2, portait sur un test à petite échelle, conçu pour démontrer divers phénomènes physiques à l'aide de méthodes simples. Les résultats de ce test n'avaient pas pour but de valider le modèle théorique, car le matériel et la configuration expérimentale n'offraient pas la précision nécessaire à cette fin. Leur objectif principal était plutôt d'acquérir une expérience pratique dans la planification et la mise en place d'un test de terrain depuis le début.

Dans leur expérience, deux types de tuyaux en PVC ont été utilisés : un tuyau en PVC standard et un tuyau de drainage avec des fentes permettant l'infiltration de l'eau. Les deux tuyaux mesuraient 110 mm de diamètre et 8 m de longueur. Ils ont été enterrés à une profondeur de 0,40 m de part et d'autre d'un réservoir d'eau couvert. L'eau contenue dans le réservoir était chauffée par quatre résistances électriques, et de l'air chaud et saturé était introduit dans les tuyaux grâce à un ventilateur informatique fixé à l'entrée du tuyau.

Avant de recouvrir le tuyau en PVC de terre, six blocs de résistance équipés de thermomètres ont été placés à intervalles réguliers le long de la surface du tuyau pour surveiller les variations de température dans le sol environnant. En outre, les premiers et derniers 30 cm des tuyaux ont été

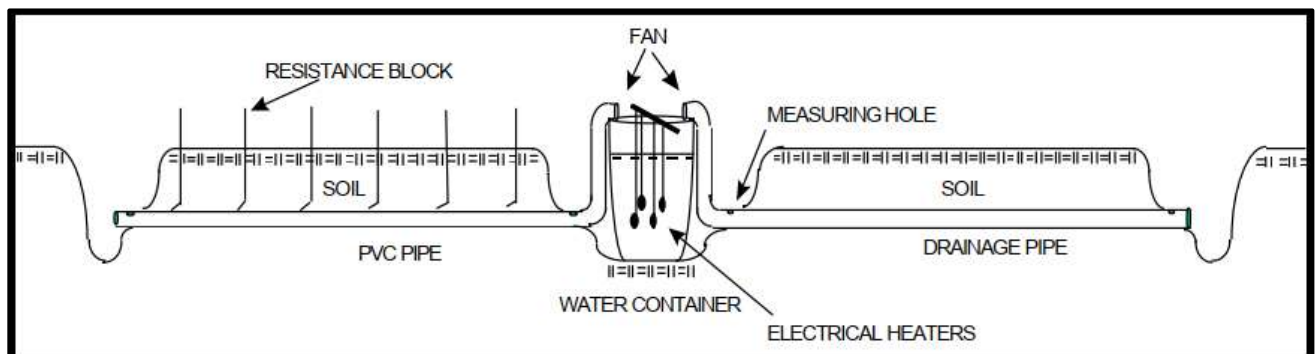


Fig. 2-2 Schéma du montage expérimental

Chapitre 2 : l'état de l'art

laissés non enterrés pour permettre la mesure de l'humidité, de la vitesse et de la température de l'air à l'aide d'un enregistreur de données et d'un thermomètre à mercure.

Ils ont également développé un modèle numérique pour simuler divers phénomènes physiques se produisant lorsque de l'air humide circule à l'intérieur du tuyau, comme la répartition de la température de l'air dans le tuyau et du sol environnant, ainsi que le débit massique de l'eau condensée pour chaque intervalle de température.

2.2.3 Étude de Lindblom et Nordell

Dans une étude numérique menée par Lindblom et Nordell [62], un système CI destiné à la production d'eau potable a été examiné figure 2-3. Ils ont utilisé un niveau de production en régime permanent pour dimensionner le système CI ; ainsi, le modèle de simulation a été appliqué aux 91^e et 92^e jours. Le taux total de condensation obtenu par jour était de 89,3 kg/j, soit environ 1,8 kg/m/j. L'énergie nécessaire pour faire circuler l'air dans un tuyau droit, calculée pour le ventilateur, était de 0,96 kWh/m³ d'eau. Ce coût énergétique diminuerait avec une augmentation de la température de l'air à l'entrée.

Leur système comprenait un tuyau de 50 mètres de long et de 0,2 mètre de diamètre, espacé de 1 mètre et enterré à une profondeur de 0,5 mètre.

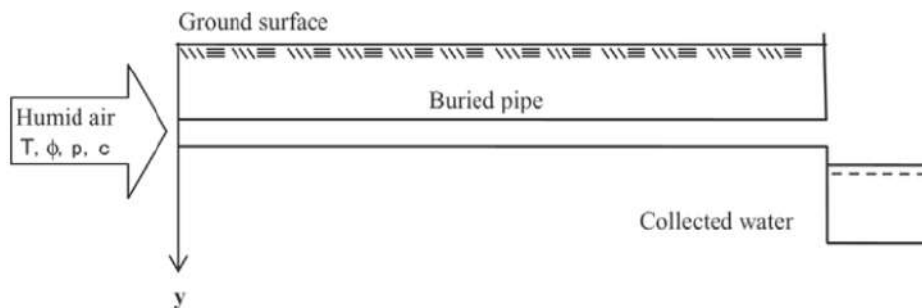


Fig. 2-3 Le schéma illustre le système IC pour la production d'eau potable, en tenant compte des propriétés de l'air humide à l'entrée.

Les recherches ultérieures menées en 2007 ont montré que l'intégration de tuyaux de drainage pour l'irrigation souterraine figure 2-4 augmentait la capacité de production à 3,1 kg/m²/jour [62]. Afin d'évaluer les modèles théoriques développés, une installation expérimentale en intérieur a été réalisée à l'Université de Technologie de Luleå, en Suède figure 2-5. Ce dispositif a été

Chapitre 2 : l'état de l'art

spécialement conçu pour reproduire les conditions des simulations numériques du système CI souterrain. Des installations pilotes de systèmes CI ont également été mises en place en Tunisie et en Algérie. De plus, les recherches futures analyseront les résultats obtenus de ces installations afin d'évaluer la faisabilité de l'irrigation par condensation. La figure 2-6 illustre l'installation pilote en Tunisie, où le système d'irrigation souterraine est en cours de test. Des études récentes ont été publiées, examinant le dessalement à l'aide d'un distillateur solaire servant d'humidificateur et de l'énergie géothermique de faible profondeur comme condenseur.

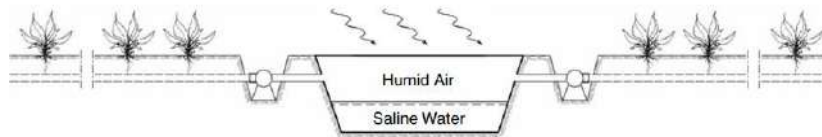


Fig. 2-4 Le schéma illustre le système IC pour les besoins en irrigation



Fig. 2-5 Expérimentation du système IC pour les besoins en irrigation.



Fig. 2-6 Illustre l'usine pilote en Tunisie, où le système d'irrigation souterraine est en cours de test.

2.2.4 Études d'Okati

Les études menées par Okati sur le système IC sont parmi les plus importantes, ayant apporté trois contributions majeures, qui sont les suivantes :

2.2.4.1 Première contribution (2016)

V. Okati et al. (2016) [63] ont présenté une étude numérique sur un système de dessalement solaire figure 2-7 basé sur un cycle d'humidification-déshumidification, composé d'un humidificateur solaire et d'une condensation souterraine. Après avoir validé leur modèle numérique en le comparant à des travaux antérieurs (les études de Sartori et de Lindblom), ils ont également analysé différents paramètres influençant la production d'eau douce afin de déterminer les paramètres optimaux en utilisant la méthode DoE (Design of Experiments). Leur étude numérique a montré qu'avec des paramètres d'entrée spécifiques, le taux de production d'eau douce par longueur de tuyau souterrain peut atteindre 3,812153 kg/h. Leurs résultats indiquent que la production d'eau augmente avec la température d'entrée de l'eau dans l'humidificateur solaire.

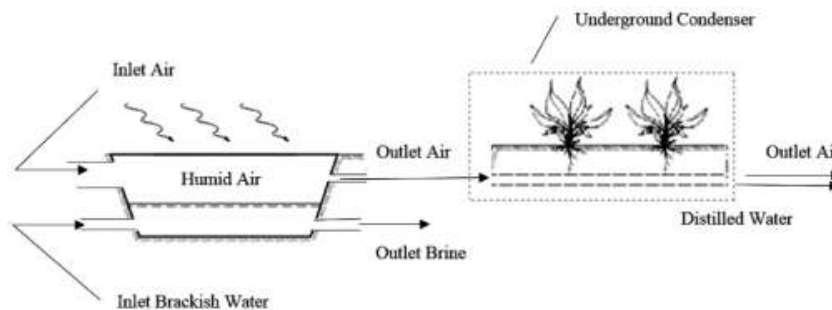


Fig. 2-7 Le schéma illustre le système d'irrigation souterraine utilisant un humidificateur solaire et un condenseur souterrain.

2.2.4.2 Deuxième contribution (2018)

Dans une autre étude numérique menée par Okati et al. (2018) [64], un capteur solaire à plaque plate a été intégré au système précédent afin d'augmenter la température de l'eau entrant dans l'humidificateur solaire figure 2-8. Leur étude s'est concentrée sur la variation de plusieurs paramètres, tels que la température d'entrée, la vitesse de l'air, l'humidité spécifique, etc., le long du tube de condensation et de l'humidificateur. Ils ont observé les résultats suivants :

Chapitre 2 : l'état de l'art

1. Le taux de production d'eau peut dépasser 264,86 kg/jour en utilisant 8 tuyaux enterrés de 50 mètres de longueur avec une vitesse de l'air de 0,5 m/s.
2. La réduction de la vitesse de l'air entrant dans l'humidificateur diminue la longueur requise pour atteindre les conditions de saturation de l'air à la sortie de l'humidificateur.
3. Par exemple, réduire la vitesse de l'air d'entrée de 0,2 m/s à 0,1 m/s à 60 °C entraîne une réduction de 40,91 % de la longueur nécessaire pour que l'humidificateur atteigne la saturation à la sortie.
4. L'augmentation de la vitesse de l'air entrant nécessite d'allonger la longueur des tubes de condensation pour obtenir une condensation complète de l'humidité présente. Par exemple, dans des tubes de condensation de 50 mètres avec une vitesse de l'air de 0,1 m/s, l'humidité spécifique atteint 78,57 %. Toutefois, lorsque la vitesse augmente à 0,3 m/s, l'humidité spécifique tombe à 35,71 %.
5. L'augmentation de la température de l'eau entrant dans l'humidificateur entraîne une augmentation de la production d'eau douce. Par exemple, une augmentation de la température de l'eau d'entrée de 30 °C à 50 °C améliore la production de 70,70 %.

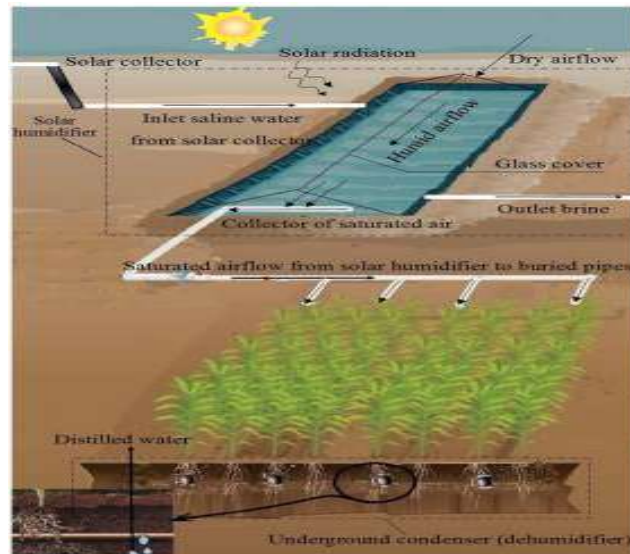


Fig. 2-8 Schéma d'un système de traitement de l'eau utilisant un humidificateur solaire et un nouveau condenseur souterrain.

2.2.4.3 Troisième contribution (2019)

V. Okati et al. (2019) [21] ont proposé un système hybride innovant pour le dessalement de l'eau, basé sur l'utilisation combinée de sources d'énergie solaire et géothermique figure 2-9 .Comparé à des travaux similaires, leur système intègre des capteurs solaires et des collecteurs d'air afin d'augmenter la production d'eau douce. Les résultats de leur simulation numérique ont montré que:

1. Dans des conditions spécifiques de température d'entrée de l'eau et de l'air, l'utilisation d'un capteur solaire augmente la production d'eau douce de 30,35 %, tandis qu'un collecteur solaire d'air ne l'augmente que de 4,45 %. De plus, avec un condenseur enterré à une profondeur de 1 mètre, ce système peut produire une quantité significative d'eau douce la nuit, lorsque l'humidité de l'air est élevée.
2. Réduire la température de surface du condenseur de 28 °C à 21 °C améliore la production d'eau douce de 60,6 %.

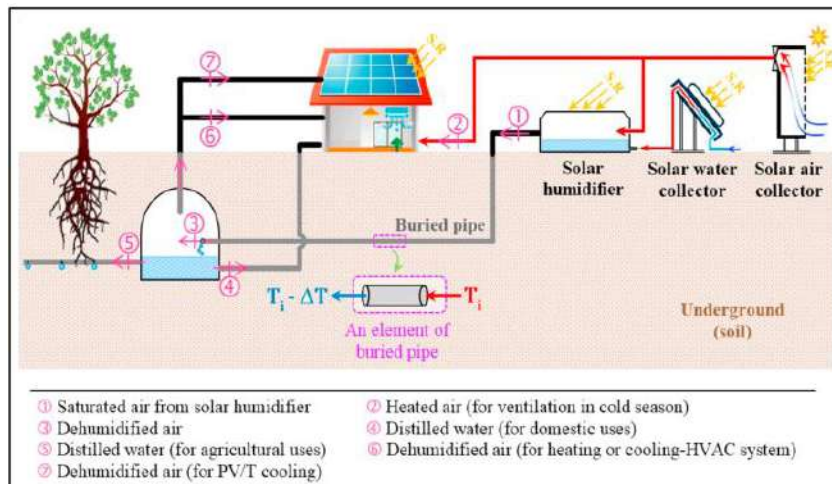


Fig. 2-9 Schéma du condenseur/échangeur de chaleur géothermique

2.2.5 Étude de Hammadi

Dans une étude récente réalisée par Hammadi [65], un modèle théorique des processus d'humidification-déshumidification dans un système combinant un distillateur solaire et un échangeur de chaleur air-sol figure 2-10. utilisant une circulation naturelle d'air induite par une cheminée solaire, est présenté. Les processus d'humidification-déshumidification transitoires dans l'ensemble du système sont formulés et simulés numériquement. Les résultats de son étude numérique montrent que :

Chapitre 2 : l'état de l'art

1. Le système complet a produit en moyenne 207,44 kg d'eau douce par jour tout au long de l'année, dont 151,64 kg provenant de l'échangeur de chaleur air-sol et 55,8 kg du distillateur solaire. La production maximale d'eau douce a été atteinte pendant les mois les plus chauds (juin et juillet), tandis que la productivité la plus basse a été constatée durant les mois les plus froids (décembre et janvier).
2. L'utilisation d'un échangeur de chaleur air-sol est particulièrement efficace pour la production d'eau douce à partir d'air humidifié, et le couplage d'un distillateur solaire avec un échangeur de chaleur air-sol assure une production continue d'eau douce tout au long de l'année.
3. La productivité maximale de l'échangeur de chaleur air-sol (EAHE) est atteinte par temps chaud, tandis que le distillateur solaire atteint son pic de productivité par temps froid.
4. La production d'eau douce a atteint son maximum pendant les mois les plus chauds (juin et juillet), alors que la productivité la plus faible a été observée durant les mois les plus froids (décembre et janvier).
5. Aucun effet significatif n'a été observé pour la profondeur du sol sur la productivité de l'échangeur EAHE au-delà de 5 mètres de profondeur, où la température du sol atteint une valeur uniforme de 27 °C.

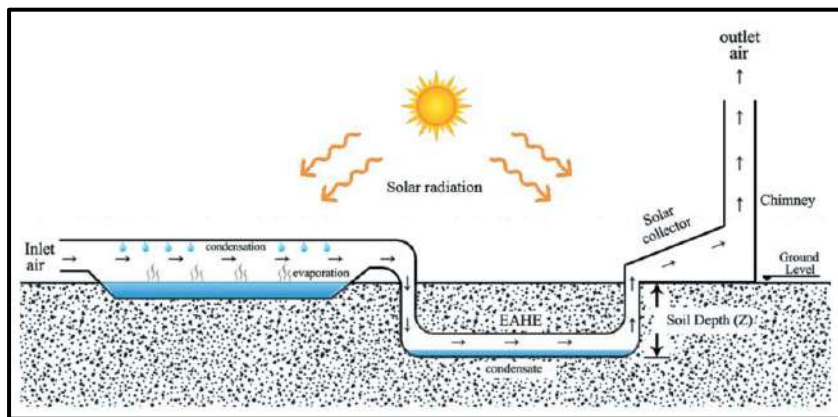


Fig. 2-10 Modèle physique combinant un distillateur solaire, un échangeur de chaleur air-sol et une cheminée solaire pour tirage d'air naturel.

2.2.6 Étude de Veretennikov

Dans une étude remarquable, Veretennikov et al [66]. Ont présenté une technique visant à condenser l'humidité de l'air atmosphérique dans des conditions de flux tourbillonnant, permettant une production autonome d'eau douce. Le système fonctionne en organisant un flux convectif libre, généré par les différences de température, qui refroidit l'air en dessous du point de rosée. Le condenseur à vortex, conçu pour capturer l'humidité de l'air, est alimenté par l'énergie solaire et ne nécessite aucune source d'énergie supplémentaire.

Pour évaluer le modèle de condenseur d'humidité atmosphérique, ils ont construit un prototype à une échelle de 1:15. Les parois du modèle sont fabriquées en acier galvanisé, tandis que le couvercle à ailettes et la base sont en aluminium. La figure 2-11 montre l'unité pilote. Afin de reproduire les conditions de température de la base du condenseur, similaires à celles observées à 2 mètres de profondeur dans le sol, le modèle de condenseur à vortex (1) a été placé dans un réservoir thermostabilisé (3) contenant de l'eau de refroidissement (2) maintenue à une température de +10 °C.

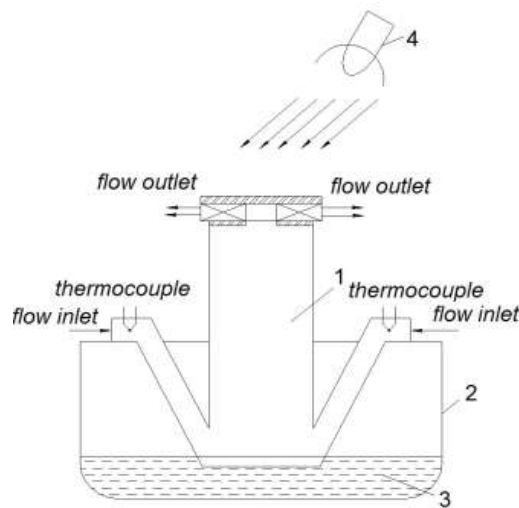


Fig. 2-11 Schéma de l'unité pilote : 1 – modèle de condenseur à vortex, 2 – eau de refroidissement, 3 – réservoir, 4 – illuminateur halogène.

La simulation du flux de chaleur solaire a été réalisée à l'aide d'un projecteur halogène (4) dont la puissance est réglable jusqu'à 1,2 kW. La puissance du projecteur et sa distance par rapport au couvercle du condenseur ont été ajustées afin de maintenir une densité moyenne de flux de chaleur

Chapitre 2 : l'état de l'art

radiatif de 100 W/m^2 sur le couvercle. Un capteur de densité de flux thermique a également été employé pour surveiller cette mesure. En Afrique, la densité annuelle moyenne de flux de chaleur radiatif varie de 2500 à 3350 MJ/m^2 , soit entre 80 et 110 W/m^2 .

Pour améliorer le transfert de chaleur radiatif, la surface du couvercle et les parois du modèle de condenseur à vortex ont été peintes en noir. Les entrées d'air sont placées de façon périphérique autour de la structure du modèle.

Au cours de l'expérience, l'humidité et la vitesse de l'air aux entrées et sorties du modèle de condenseur d'humidité atmosphérique ont été mesurées à l'aide d'une sonde de vitesse de l'air équipée d'un fil chauffé. L'expérience s'est déroulée sur une durée de $3,5$ heures.

En analysant la variation de l'humidité de l'air (la différence entre l'humidité relative à l'entrée et à la sortie), il a été confirmé que la condensation d'humidité se produisait dans la partie inférieure du condenseur. À la fin de l'expérience, l'eau condensée collectée a été mesurée, totalisant 15 ml .

En complément de cette étude expérimentale, ils ont également réalisé une simulation numérique pour modéliser la dynamique thermique et gazeuse du flux d'air dans le prototype. Leur simulation a montré que dans la partie centrale du condenseur, les forces centrifuges créent une zone de basse pression, ce qui favorise la condensation de l'humidité.

Après avoir analysé les données issues des tests expérimentaux et numériques, ils ont proposé un modèle de condenseur permettant la collecte d'humidité sur une durée de 24 heures figure 2-12.

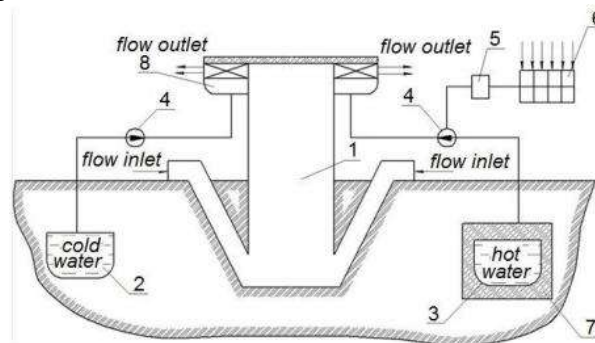


Fig. 2-12 Condenseur d'humidité atmosphérique avec accumulation de chaleur :
1 – condenseur à vortex pour l'humidité atmosphérique ;
2 – réservoir d'eau froide ; 3 – réservoir d'eau chaude ; 4 – pompe ; 5 – accumulateur ; 6 –
panneaux solaires ; 7 – isolation ; 8 – réservoir d'eau

Chapitre 2 : l'état de l'art

À cet effet, le couvercle à ailettes est équipé de réservoirs (8) remplis d'eau. Pendant la journée, le rayonnement solaire chauffe l'eau, qui est ensuite pompée par la pompe (4) dans le réservoir de stockage isolé thermiquement (3). La nuit, cette eau chaude est renvoyée dans le sens inverse pour chauffer les bords du couvercle. Ainsi, en stockant la chaleur dans les réservoirs d'eau, le processus peut également être poursuivi durant la nuit. Dans ce cas, les coûts énergétiques liés à l'alimentation des pompes peuvent être compensés par des panneaux solaires installés à proximité du condenseur. Le schéma est illustré à la figure 2-12. En stockant la chaleur dans les réservoirs d'eau, le processus peut également être poursuivi durant la nuit. Dans ce cas, les coûts énergétiques pour l'alimentation des unités de pompage peuvent être compensés par des panneaux solaires installés près du condenseur.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les dernières avancées des technologies de dessalement alimentées par des sources d'énergie renouvelable, en particulier l'énergie solaire et la géothermie peu profonde. La revue met en lumière la pertinence croissante des énergies durables pour faire face à la pénurie mondiale d'eau grâce à des méthodes innovantes telles que les systèmes d'irrigation par condensation (CI) et les modèles hybrides de dessalement. Ces systèmes exploitent la complémentarité entre le rayonnement solaire et l'énergie géothermique pour produire efficacement de l'eau douce, destinée tant à l'irrigation qu'à la consommation.

Les études abordées, allant de modèles théoriques à des projets pilotes expérimentaux, démontrent le potentiel de l'intégration des énergies renouvelables dans les processus de dessalement. Alors que les premiers travaux se concentraient sur la conceptualisation et la simulation des systèmes CI, des recherches plus récentes, comme celles d'Okati et Hammadi, ont mis l'accent sur l'optimisation des paramètres des systèmes pour maximiser la production d'eau. Ces efforts ont montré des résultats prometteurs, augmentant l'efficacité de la production d'eau tout en réduisant la consommation d'énergie.

Par ailleurs, l'introduction de systèmes hybrides combinant énergie solaire et géothermique représente une avancée significative pour assurer une production continue d'eau douce, même en conditions environnementales variables. Ces technologies, ainsi que des concepts novateurs comme le condenseur à vortex pour la collecte d'humidité atmosphérique, offrent des solutions autonomes pour la génération d'eau et ouvrent la voie à de futures recherches et développements en matière de dessalement durable.

En conclusion, bien que des progrès significatifs aient été réalisés dans le domaine du dessalement alimenté par les énergies renouvelables, il reste un potentiel important pour des recherches supplémentaires afin d'optimiser ces systèmes et de les étendre à une application plus large. Les connaissances acquises grâce à ces technologies de pointe offrent une base solide pour l'évolution continue de solutions de dessalement durable, répondant ainsi à la demande mondiale croissante en eau douce.

Chapitre 3 : Dispositif expérimental

3 Chapitre 3 : Dispositif expérimental

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le dispositif expérimental conçu pour évaluer les performances d'un nouveau système de dessalement hybride solaire-géothermique. Ce système innovant combine l'énergie solaire, captée par un concentrateur parabolique, avec l'énergie géothermique peu profonde pour une production efficace d'eau douce. Contrairement aux systèmes traditionnels, cette conception utilise un tuyau souterrain placé verticalement pour la condensation, optimisant ainsi l'utilisation de l'espace et améliorant l'efficacité de refroidissement du système.

L'étude expérimentale menée se concentre sur un prototype à l'échelle du laboratoire qui reproduit les composants essentiels du système à grande échelle. Ce prototype permet de créer un environnement contrôlé pour tester les processus opérationnels de base, fournissant des informations précieuses sur la fonctionnalité du système, la faisabilité de sa conception et les défis potentiels. Grâce à cette configuration, le chapitre établit une base pour comprendre le fonctionnement du système dans des conditions spécifiques et sert de fondement pour des analyses ultérieures.

Ce chapitre détaille la méthodologie de mise en place, décrit les équipements utilisés et explique les conditions expérimentales qui ont permis de collecter des données précises et fiables. En contrôlant rigoureusement les variables et en mesurant des paramètres clés tels que la température et l'humidité, l'étude vise à valider les performances du prototype et à orienter la transition vers des applications à plus grande échelle dans le futur.

3.2 Description du nouveau système proposé

Le système de dessalement proposé opère principalement pendant les heures d'ensoleillement et se compose de deux éléments principaux : un générateur de vapeur d'eau et un condenseur destiné à la production d'eau douce. La figure 3-1 illustre schématiquement ce système hybride. Le système est alimenté par un collecteur solaire cylindro-parabolique qui capte le rayonnement solaire pour chauffer un fluide caloporteur. Ce fluide chauffé est ensuite utilisé pour augmenter la température de l'eau salée dans le générateur de vapeur, entraînant ainsi son évaporation.

condenseur à vortex comprend une conduite cylindrique verticale souterraine avec une structure conique à sa base, conçue pour optimiser la circulation de l'air dans le condenseur. Un prototype à l'échelle de laboratoire, illustré en figure 3-1, constitue une étape préliminaire vers une application pratique. Une photographie de ce prototype est présentée en figures 3-5 et 3-6.

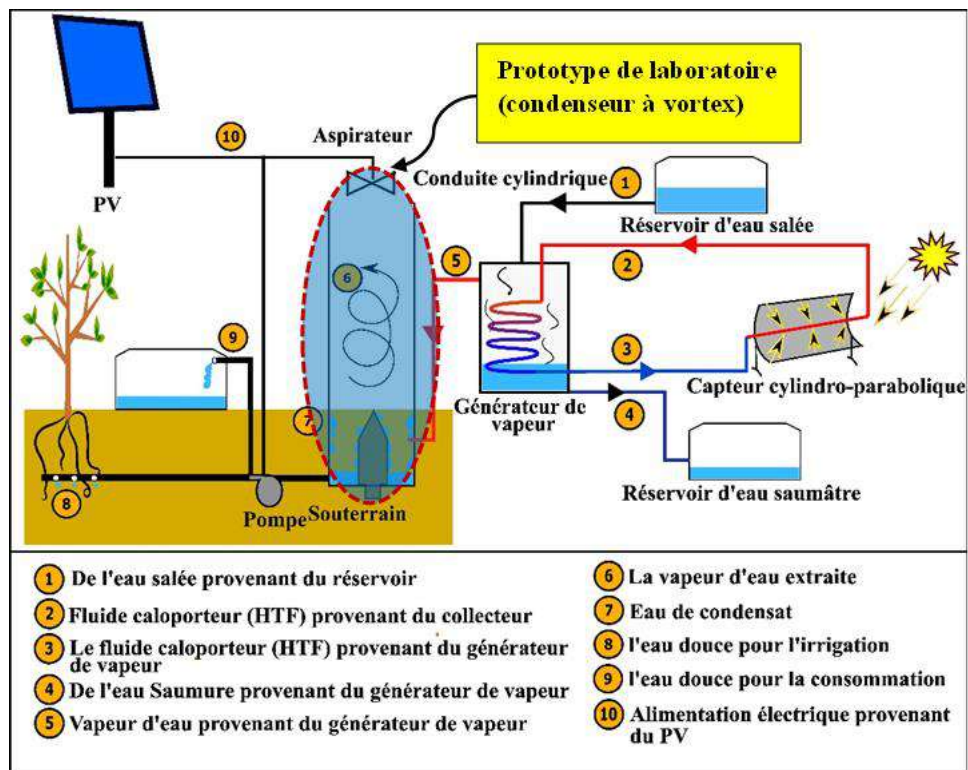


Fig. 3-1 Schéma du système hybride proposé

Chapitre 3 : Dispositif expérimental

La température du sol en profondeur suit un comportement sinusoïdal et est influencée par plusieurs paramètres tels que la profondeur, la température moyenne annuelle du sol, l'amplitude annuelle de la température de surface, la diffusivité thermique du sol et la constante de phase. Al-Ajmi et al.[67] ont démontré que la température annuelle du sol à une profondeur de 4 m varie entre 24 °C et 30,9 °C au Koweït. Ils ont exploité cette température souterraine dans un modèle théorique d'échangeur de chaleur terre-air pour le refroidissement des bâtiments résidentiels. De leur côté, Tuan Le et al.[68] ont mis en évidence que la température moyenne annuelle du sol à des profondeurs comprises entre 0,1 m et 3,6 m oscille entre 13,1 °C et 17,6 °C dans la ville de Shouguang. Par ailleurs, Florides et Kalogirou .[69] ont constaté qu'à Nicosie, à Chypre, la température du sol à une profondeur de 3 m varie entre 15 °C et 25 °C au cours de l'année. Ces résultats expérimentaux montrent que la fraîcheur naturelle de l'environnement souterrain permet de maintenir les parois du cylindre vertical à des températures constamment basses, facilitant ainsi la condensation de la vapeur d'eau et la production d'eau douce. L'eau recueillie a un double usage : elle peut être utilisée pour l'irrigation et la consommation humaine. Il convient de noter que les systèmes d'extraction d'air et de pompage de l'eau sont alimentés par des cellules photovoltaïques (PV). Pour assurer le fonctionnement continu du système par temps nuageux et durant la nuit, lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible, une unité de stockage d'énergie thermique est intégrée pour remplacer le collecteur parabolique, garantissant l'apport thermique nécessaire au système. De plus, la pompe peut être alimentée par l'électricité stockée dans les batteries du système photovoltaïque autonome.

Cette technique est conçue pour des applications de dessalement de petite échelle, avec des possibilités d'amélioration pour augmenter la production d'eau douce. Le système est particulièrement adapté aux espaces restreints, permettant l'installation de plusieurs dispositifs de condensation verticaux. Cette conception optimise l'utilisation de l'espace disponible sans compromettre la capacité du sol à dissiper la chaleur accumulée. À la différence des installations horizontales, susceptibles d'entraîner une saturation thermique du sol, l'organisation verticale des cylindres permet une répartition de chaleur plus équilibrée, maintenant ainsi l'efficacité du système de dessalement. Cette configuration offre une flexibilité considérable pour installer le système dans des espaces restreints.

3.3 Étude expérimentale

L'étude expérimentale d'un prototype à échelle de laboratoire est essentielle pour fournir une première évaluation des performances attendues du système grandeur nature. Conçu pour reproduire les fonctionnalités principales du système de grande taille, ce prototype permet aux chercheurs d'analyser et d'étudier les résultats dans un environnement contrôlé. Son rôle est crucial pour affiner la conception du système et faciliter la transition vers une mise en œuvre à grande échelle. Le prototype de laboratoire, illustré en figure 3-2, comporte trois composants principaux : une unité d'évaporation (3), un bassin de refroidissement agissant comme source froide (5) et un tuyau cylindrique servant de condenseur (9). Dans l'unité d'évaporation (3), un chauffage à gaz (1) chauffe l'eau salée (2) jusqu'à son point d'évaporation, permettant la séparation du sel de l'eau vaporisée. La vapeur produite est ensuite acheminée par deux tubes de raccordement (4) vers le tuyau cylindrique (9), où elle se condense. Ce processus transforme la vapeur en liquide, produisant ainsi de l'eau douce. La température de l'eau dans le bassin de refroidissement est maintenue à 16°C par l'ajout progressif de blocs de glace.

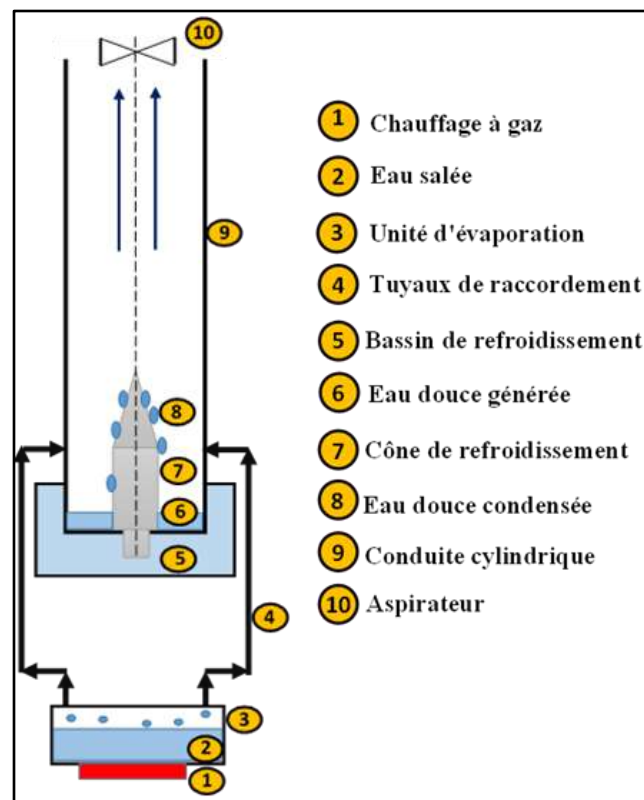


Fig. 3-2 Schéma illustrant le principe de fonctionnement du prototype à l'échelle de laboratoire.

3.3.1 Méthodes de mesure

Tous les paramètres utilisés pour générer les résultats sont basés sur des données mesurées expérimentalement, comme indiqué dans la figure 3-3. De plus, toutes les expériences ont été réalisées exclusivement dans des conditions de laboratoire contrôlées, garantissant l'absence d'interférence des facteurs environnementaux ambiants. Les paramètres mesurés incluent :

- Température de l'air humide à l'entrée et à la sortie du tuyau vertical, respectivement T1 et T2.
- Température du cône T3.
- Température de l'eau dans le bassin T4.
- Humidité relative à l'entrée et à la sortie la conduite vertical, respectivement HR1 et HR2.

Le dispositif de variation de vitesse permettait de régler le débit d'air humide. Un appareil multifonction CA 1051 (muni d'un thermo-anémomètre à fil chaud) a été utilisé pour mesurer la vitesse de la vapeur d'eau. La température a été relevée à l'aide d'un capteur thermocouple PT100. Deux capteurs d'hygrométrie analogiques B-530 ont servi à mesurer l'humidité relative. Pendant les expériences, le microcontrôleur GRAPHTEC midi LOGGER GL840 enregistrait les données de température et d'humidité relative toutes les 30 secondes, tandis que la vitesse était relevée manuellement toutes les 2 minutes. La figure 3-5 montre une photographie du prototype de laboratoire exploré, et la figure 3-4 présente les photographies de tous les équipements utilisés dans cette étude expérimentale.

Chapitre 3 : Dispositif expérimental

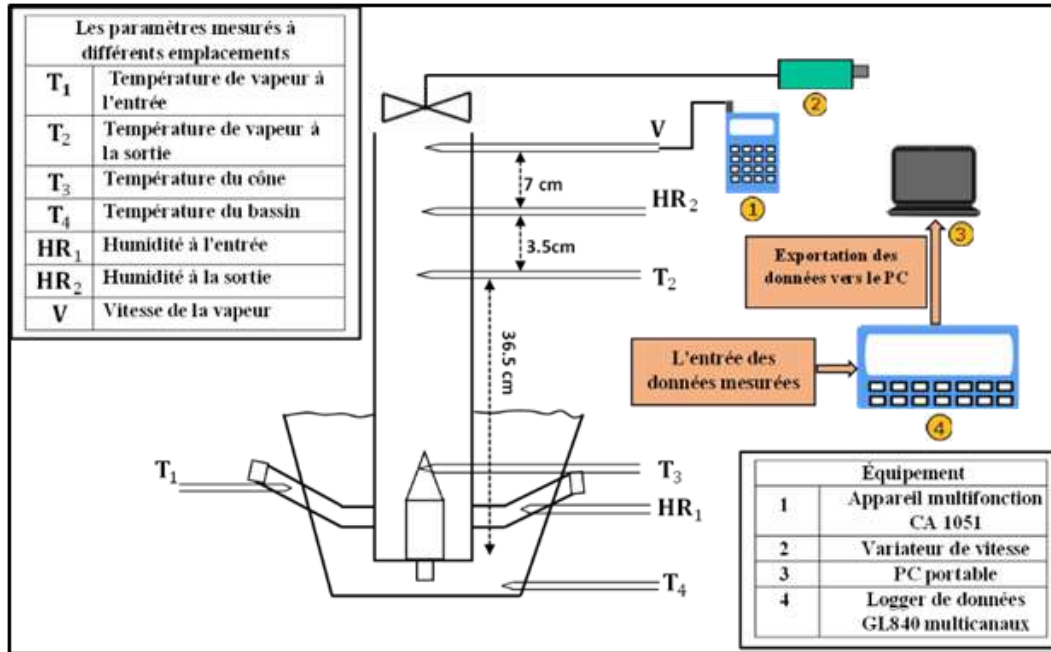


Fig. 3-3 Schéma de l'équipement, des thermocouples et des capteurs d'humidité.

Chapitre 3 : Dispositif expérimental









	
Thermo-anémomètre à fil chaud	Capteur d'humidité B-530
	
Thermocouple de type PT100	Appareil multifonction CA1051
	
Aspirateur	Variateur de vitesse
	
Le microcontrôleur GRAPHTEC MIDI LOGGER GL840	PC portable

Fig. 3-4 Photographies de tous les équipements utilisés dans cette étude expérimentale.

Chapitre 3 : Dispositif expérimental

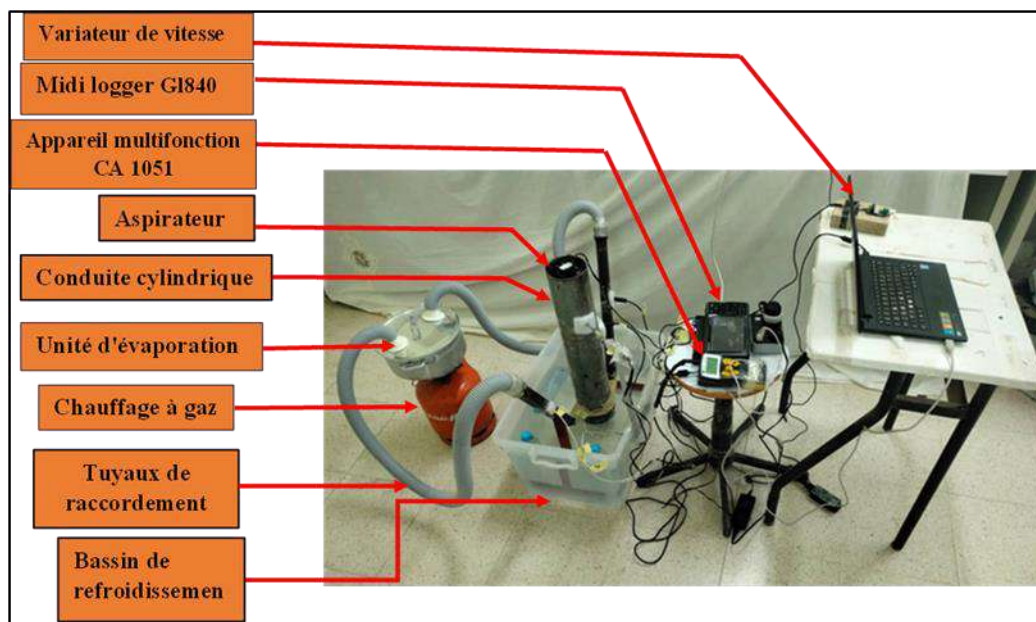


Fig. 3-5 Photographie du prototype à l'échelle de laboratoire (unité d'évaporation + condenseur vortex).

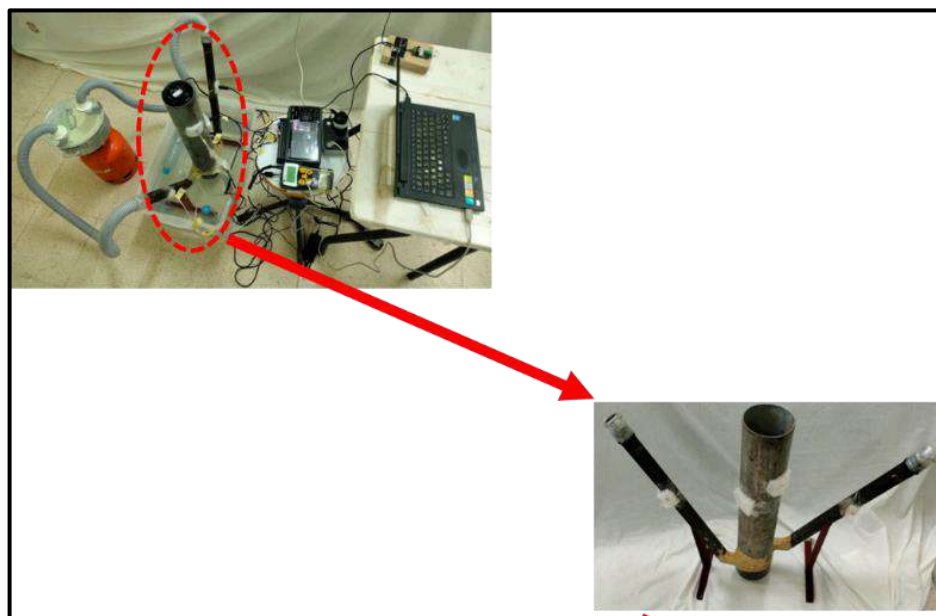


Fig. 3-6 Photographie du condenseur vortex faisant partie du prototype.

3.3.2 Analyse des incertitudes

Étant donné que cette étude est purement expérimentale, l'accent a été mis sur l'évaluation des performances du prototype, en particulier sa capacité à produire de l'eau douce. Les seules expressions mathématiques utilisées ont permis de calculer la température moyenne d'entrée de la vapeur d'eau, sa vitesse, ainsi que les écarts types associés.

Dans le domaine de la mesure, il est crucial de considérer toutes les sources d'incertitude significatives lors de l'analyse [70]. L'incertitude expérimentale se classe en deux types : les mesures directes et les mesures indirectes [71]. Dans cette étude, nous avons utilisé des mesures directes, car aucune variable dépendante n'était impliquée.

L'expression mathématique employée pour calculer la moyenne des mesures répétées (température et vitesse) est la suivante

$$\bar{x} = \frac{\Delta t \sum x}{T} \quad \text{Équation 3—1}$$

où :

- Δt est l'intervalle de temps entre deux mesures successives (30 secondes pour la température et 2 minutes pour la vitesse),
- x représente la valeur mesurée de la température ou de la vitesse, et
- T est la durée totale de chaque expérience (1800 secondes).

L'écart type pour la température moyenne d'entrée et la vitesse a été calculé en utilisant l'expression suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Équation 3—2}$$

Chapitre 3 : Dispositif expérimental

où :

- \bar{x} représente la valeur moyenne des mesures répétées de la température ou de la vitesse pour chaque test.
- n est le nombre de mesures répétées pour la température ou la vitesse (respectivement 61 mesures pour la température et 16 pour la vitesse).

Table 3-1 Caractéristiques des instruments de mesure

Instrument de mesure	Plage	Précision	Utilisation
1. Thermo-Anémo à fil chaud	0 to 3 m/s 3,1 to 30 m/s	$\pm 0,03$ m/s $\pm 0,1$ m/s	Vitesse
2. Capteur d'humidité B-530	0 to 100% RH	$\pm 3\%$ RH at 25°C	Humidité
3. Thermocouple de type PT100	-200 to -100 °C -100 to 1370 °C	± 1.5 ± 0.8	Temperature
4. Le microcontrôleur GRAPHTEC midi LOGGER GL840	/	/	Acquisition de données

3.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une description détaillée du dispositif expérimental conçu pour évaluer les performances d'un nouveau système de dessalement hybride solaire-géothermique. Le design innovant du système, qui combine un collecteur parabolique pour capter l'énergie solaire et une unité de condensation souterraine verticale, a été soigneusement décrit. Le prototype à échelle de laboratoire reproduit ici les éléments clés du système grandeur nature et offre un environnement contrôlé pour tester ses processus opérationnels fondamentaux.

Dans ce chapitre, l'accent a été mis sur le cadre méthodologique, incluant la configuration de l'appareil expérimental, le choix des outils de mesure, ainsi que les procédures suivies pour garantir la précision des données collectées. L'utilisation d'instruments précis tels que des thermocouples, hygromètres et capteurs de vitesse a été cruciale pour l'intégrité du dispositif expérimental. De plus, une attention particulière a été accordée au contrôle des facteurs externes afin d'assurer la fiabilité des expériences.

Le dispositif expérimental détaillé dans ce chapitre constitue le socle de la recherche, offrant une approche structurée pour évaluer la fonctionnalité du système. Il établit un cadre pour des recherches ultérieures sur la scalabilité et l'application pratique du système de dessalement, sans interférence de variables non contrôlées. Ce travail fondamental permettra aux études futures de s'appuyer sur la configuration décrite et de perfectionner le système pour une application concrète.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4 Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation détaillée des résultats de l'étude expérimentale visant à évaluer la faisabilité et l'efficacité de la production d'eau potable à partir de l'humidité atmosphérique, à l'aide d'un prototype à l'échelle de laboratoire. Le dispositif expérimental examine deux configurations distinctes, chacune étant conçue pour tester divers aspects de l'efficacité de la génération d'eau.

Dans la première configuration, le prototype fonctionne sans unité d'évaporation, avec pour objectif principal d'évaluer la capacité fondamentale du système à condenser l'humidité atmosphérique via un simple processus de refroidissement. En analysant les variations de température, les niveaux d'humidité et d'autres paramètres opérationnels clés, cette configuration fournit une compréhension de base de la capacité du système à extraire de l'eau avec une intervention minimale.

La seconde configuration intègre une unité d'évaporation dans le prototype, conçue pour renforcer le processus de condensation et accroître le rendement en eau douce. Ce dispositif simule un système plus avancé, capable d'améliorer l'efficacité en contrôlant à la fois la température et le flux d'air. En comparant les deux configurations, cette étude vise à identifier les conditions opérationnelles optimales permettant de maximiser la production d'eau.

Les résultats présentés dans ce chapitre comprennent des données approfondies sur la température, l'humidité et le rendement en eau pour les deux configurations. Ces données sont analysées de manière critique afin d'évaluer le comportement thermique et hygrothermique du prototype, ainsi que sa capacité à produire de l'eau douce dans différentes conditions environnementales. Des tableaux, figures et diagrammes psychrométriques illustrent les principales tendances et corrélations, telles que l'impact de la température et de la vitesse de l'air sur l'efficacité de la condensation et la production d'eau.

4.2 Résultats et discussion

Dans cette étude expérimentale, deux configurations distinctes ont été analysées. La première configuration impliquait un prototype sans unité d'évaporation, visant principalement à évaluer la faisabilité de produire de l'eau potable à partir de l'humidité de l'air. Dans la seconde configuration, une unité d'évaporation a été ajoutée au système afin d'augmenter la production d'eau douce.

4.2.1 Production d'eau douce à partir de l'humidité de l'air

Dans cette section de l'investigation expérimentale, la performance du prototype sans unité d'évaporation est évaluée. L'air atmosphérique est introduit dans le système par deux tubes à une vitesse moyenne de 0,64 m/s, Il circule ensuite dans le condenseur (une conduite cylindrique verticale). En traversant cette conduite à basse température, l'air subit un refroidissement, comme illustré en figure 3-5 (voir chapitre 3).

Les résultats, illustrés dans la figure 4-1, montrent les variations de température et d'humidité à différents points du prototype. La température moyenne de l'air entrant a été enregistrée à $T1 = 22,19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le transfert de chaleur par convection entre l'air atmosphérique et les parois du condenseur entraîne une baisse de la température de l'air, avec une température de sortie moyenne de $T2 = 20,32\text{ }^{\circ}\text{C}$.

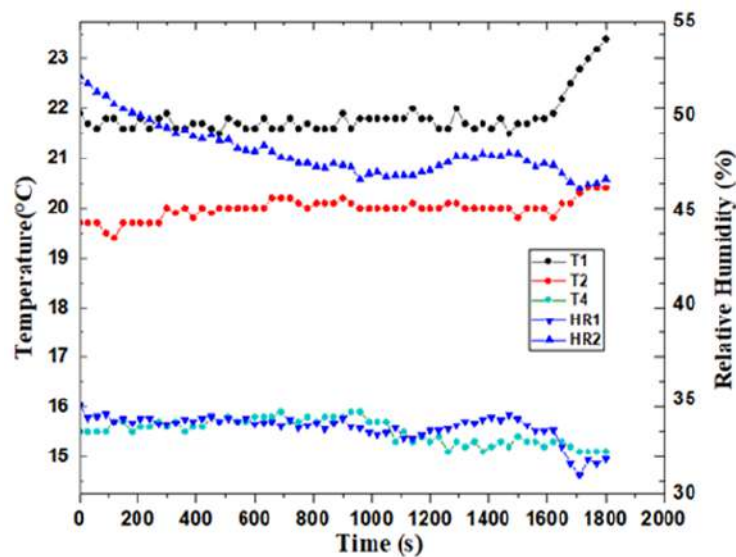


Fig. 4-1 Variations de température et d'humidité à différents emplacements dans le prototype sans l'unité d'évaporation

Tout au long de la procédure expérimentale, la température du bassin a été maintenue à une valeur moyenne de $T_4 = 15,77\text{ °C}$ grâce à l'ajout de glace. Le refroidissement de l'air atmosphérique a entraîné une augmentation de l'humidité relative, passant de $HR_1 = 34,08\%$ à l'entrée à $HR_2 = 48,95\%$ à la sortie. Ce processus, appelé refroidissement simple, maintient constante la teneur spécifique en humidité [72]. La figure 4-2 illustre ce comportement, montrant les variations de température et de teneur en humidité de l'air lorsqu'il traverse le condenseur, représentées sur un diagramme psychrométrique.

Cette expérience a démontré que la quantité d'eau lors de la condensation de l'air atmosphérique est négligeable.. Ce résultat est attribué à l'humidité initiale relativement faible de l'air et à la capacité de refroidissement insuffisante du système, qui n'a pas permis de créer les conditions optimales nécessaires à la formation de gouttelettes d'eau libre.

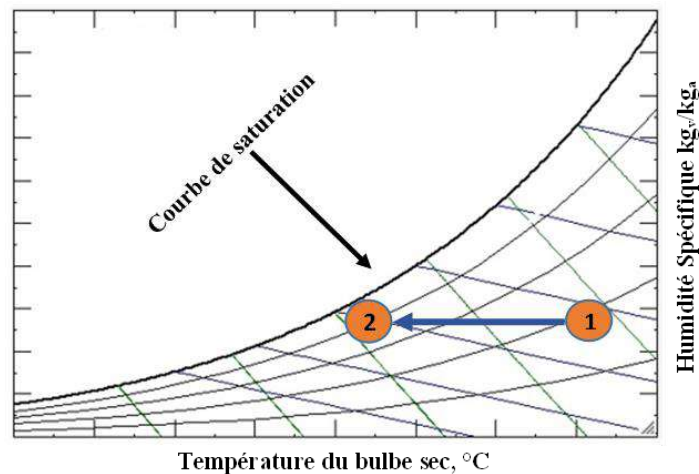


Fig. 4-2 Changement d'état de l'air à travers le condenseur sur le diagramme psychrométrique sans l'unité d'évaporation

4.2.2 Production d'eau douce en couplant le prototype de laboratoire à une unité d'évaporation

Un module de production de vapeur d'eau a été intégré afin d'optimiser la génération d'eau dans le système étudié. La vapeur produite dans l'unité d'évaporation circule à travers deux tuyaux de raccordement avant d'entrer dans l'unité de condensation, où elle se condense en gouttelettes d'eau.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

L'enquête expérimentale s'est principalement concentrée sur l'influence des variations de température et de la vitesse de l'air à l'entrée du condenseur sur la production d'eau douce. La température du bassin a été maintenue entre 15 °C et 16 °C, simulant les températures souterraines typiques à une profondeur d'environ 3 mètres[69]. Chaque test a duré 30 minutes, et la production horaire d'eau douce a été déterminée en doublant le résultat de chaque test.

4.2.3 Comportement hygrothermique du dispositif expérimental

Trois tests ont été menés pour analyser le comportement thermique du dispositif expérimental. La figure 4- 3 présente l'évolution temporelle de la température aux points prédéfinis du prototype pour trois températures différentes de vapeur d'eau : 44 °C, 46 °C et 53 °C.

Selon les données illustrées dans la figure 4- 3a, la température de la vapeur d'eau (T1) entrant dans le condenseur se maintient autour de 44,07 °C. La température moyenne mesurée à la sortie (T2) est de 28,66 °C. Cette diminution de température est attribuée au transfert de chaleur par convection entre la vapeur d'eau chaude entrant dans le condenseur et les parois plus froides de ce dernier. Après une brève période de stabilisation, la température du cône (T3) atteint une valeur stable de 25 °C. La température du bassin (T4) est restée quasi constante, avec une moyenne de 15,69 °C. Un comportement thermique similaire a été observé dans les Figures 4-3b et 4- 3c, correspondant à des températures d'entrée de 46 °C et 53 °C, respectivement. Cependant, pour des températures d'entrée plus élevées, la température du cône (T3) tend à se rapprocher de la température de l'air sortant du condenseur. Dans le cas où $T1 = 53$ °C, il a été observé que les deux températures, T2 et T3, convergent vers une même valeur de 30 °C. L'humidité relative a également été mesurée au cours des expériences. Elle a été constamment enregistrée à 100 % pour l'air humide, à la fois à l'entrée et à la sortie du condenseur, indiquant que le processus s'est déroulé dans des conditions de saturation, comme le montre la figure 4- 3. Dans les expériences (A), (B) et (C), la température de la vapeur à l'entrée varie. Cette variation est due à un arrêt forcé nécessaire pour la prise des mesures.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

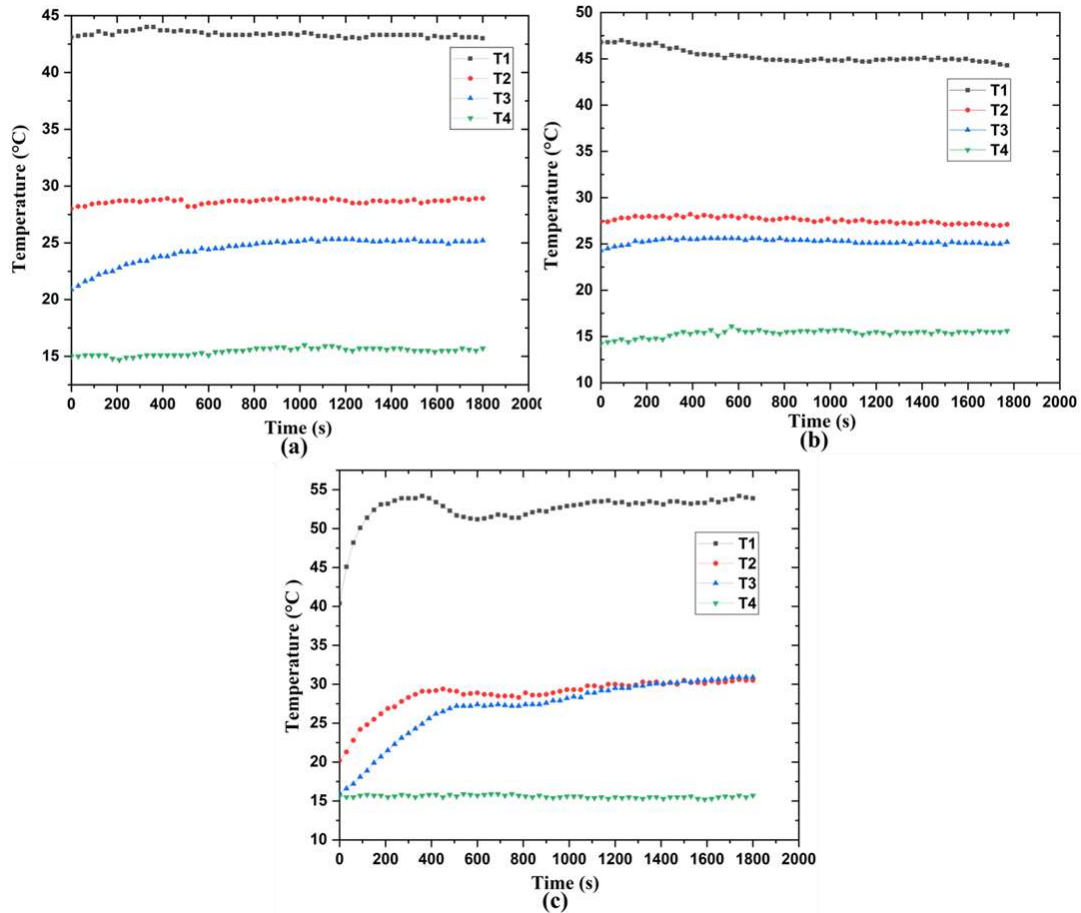


Fig. 4-3 Variation de la température à différents emplacements sur le prototype.

- (a) Pour température moyenne d'entrée et une vitesse de vapeur, respectivement 44 °C et 1,09 m/s.
- (b) Pour température moyenne d'entrée et une vitesse de vapeur, respectivement 46 °C et 1,35 m/s.
- (c) Pour température moyenne d'entrée et une vitesse de vapeur, respectivement 53 °C et 0,73 m/s.

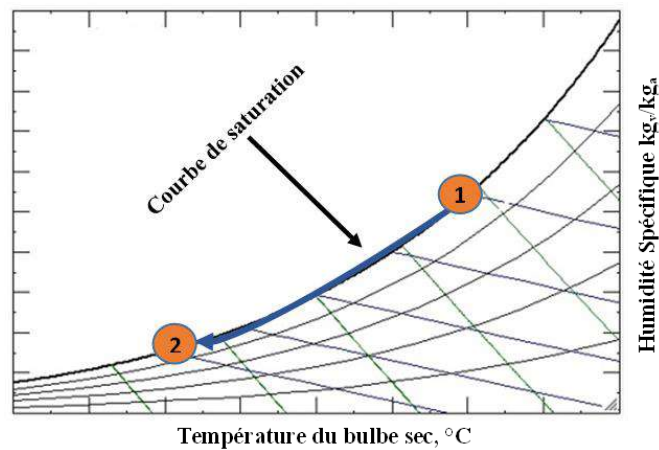


Fig. 4-4 Changement d'état de l'air de procédé à travers le condenseur sur le diagramme psychrométrique avec l'unité d'évaporation.

4.2.4 Production d'eau douce

Une série de tests a été réalisée pour évaluer la capacité de production d'eau douce du prototype proposé. En raison de la complexité de contrôler simultanément la température d'entrée et la vitesse de la vapeur d'eau, des essais approfondis ont été effectués pour répondre à ce défi. Les résultats concluants de ces expériences sont résumés dans les Tableaux 4-1, 4-2 et 4-3.

Comme le montre le Tableau 4- 1, pour une température d'entrée de la vapeur d'eau d'environ 44 °C, la production d'eau douce atteint 186 ml/h à une vitesse de vapeur de 0,74 m/s. Une augmentation de cette vitesse entraîne un accroissement de la production d'eau douce, avec des rendements de 280 ml/h et 300 ml/h pour des vitesses de 0,81 m/s et 1,09 m/s, respectivement. Cette tendance est également observée dans les Tableaux 4-2 et 4-3.

Pour une température d'entrée de 46 °C, La quantité d'eau condensée atteint 400 ml/h pour une vitesse moyenne de 1,35 m/s. La production maximale d'eau douce, soit 740 ml/h, est atteinte à une température de 53 °C et une vitesse de 1,4 m/s.

Table 4-1 Production d'eau douce pour une température moyenne de vapeur d'eau de 44 °C et trois vitesses d'entrée différentes.

Average water vapor temperature (°C)	Average water vapor velocity (m/s)	Fresh water production (ml/h)
43.42	0.74	186
44.11	0.81	280
44.07	1.09	300

Table 4-2 Production d'eau douce pour une température moyenne de vapeur d'eau à l'entrée de 46 °C et trois vitesses d'entrée différentes.

Average water vapor temperature (°C)	Average water vapor velocity (m/s)	Fresh water production (ml/h)
46.34	0.58	171.42
46.45	0.9	320
46.05	1.35	400

Table 4-3 Production d'eau douce pour une température moyenne de vapeur d'eau à l'entrée de 53 °C et trois vitesses d'entrée différentes.

Average water vapor temperature (°C)	Average water vapor velocity (m/s)	Fresh water production (ml/h)
51.98	0.47	200
53.34	0.73	450.5
53.67	1.4	740

La figure 4-5 illustre la variation de la production d'eau douce par condensation, en mettant en évidence les effets combinés de la température et de la vitesse de l'air humide à l'entrée du condenseur. Le graphique révèle une relation claire entre ces paramètres et l'augmentation de la production d'eau. À mesure que la température s'élève, la production d'eau douce augmente également, ce qui montre une corrélation positive entre la température et l'efficacité de la condensation. De plus, la figure 4-5 montre qu'une vitesse plus élevée de l'air humide à l'entrée du condenseur améliore significativement la production d'eau. L'influence combinée de la température et de la vitesse de l'air met en évidence leur rôle synergique dans l'optimisation du processus de condensation pour la production d'eau douce.

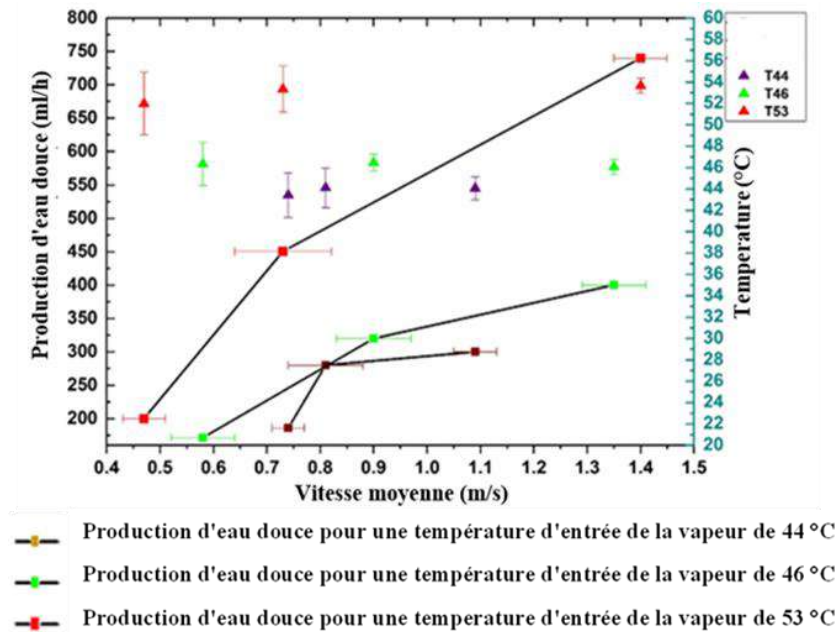


Fig. 4-5 Quantité d'eau douce produite en fonction de la température d'entrée de la vapeur d'eau et de sa vitesse

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Une analyse approfondie des données montre que l'ajustement de ces paramètres est une stratégie efficace pour maximiser l'efficacité du processus de condensation. Les tendances positives présentées dans la figure soulignent l'importance essentielle d'optimiser à la fois la température et la vitesse de l'air pour accroître la production d'eau douce. Cette observation apporte des informations précieuses pour la conception et le fonctionnement de systèmes reposant sur la condensation pour la production d'eau, offrant des orientations essentielles pour obtenir des rendements plus élevés et une efficacité améliorée.

4.3 Comparaison de la présente étude avec d'autres études expérimentales et numériques

Le Table 4-4 récapitule des études récentes sur les procédés de dessalement à énergie solaire à petite et moyenne échelle (distillateurs solaires et systèmes solaires de type humidificateur-déshumidificateur), ainsi que leurs productivités respectives et principales observations. Parmi ces systèmes, le procédé de dessalement hybride qui combine l'énergie solaire et géothermique se distingue comme une solution particulièrement prometteuse par rapport aux autres méthodes de dessalement.

Le prototype de laboratoire, doté d'une surface d'échange de condensation d'environ 0,09 m², montre une efficacité notable dans la production d'eau douce, atteignant jusqu'à 7,4 litres par jour. Avec une productivité estimée à 90 litres par mètre carré quotidiennement avec 10 heures d'ensoleillement, cette méthode semble surpasser les performances des autres techniques analysées. L'intégration de sources d'énergie solaire et géothermique renforce l'efficacité de ce procédé, soulignant son potentiel en tant que solution robuste et performante face aux défis de la pénurie d'eau.

Ces résultats préliminaires fournissent une référence de base et offrent un point de départ prometteur pour des études plus approfondies et détaillées dans ce domaine.

La production d'eau douce a été calculée comme suit :

$$P = Q / S \quad \text{Équation 4—1}$$

$$S = 2 \times 3.14 \times R \times L$$

$$S = 2 \times 3.14 \times 0.06m \times 0.22m \cong 0.08m^2$$

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Où :

P la quantité d'eau produite pendant une heure par mètre carré .

Q la quantité d'eau produite pendant une heure. (740ml/h).

S la surface de condensation ($0.08m^2$).

R le rayon de la conduite cylindrique (condenseur).

L la longueur de la conduite où la condensation se produit.

Table 4-4 Résumé des développements récents dans la recherche sur le dessalement solaire à petite et moyenne échelle

Auteur(s)/Année/Réf	Composants	Production d'eau	Remarques
Present Work . (2024) [73](Experimental)	Chauffe-eau à gaz, unité d'évaporation, condenseur (tuyau vertical), bassin de refroidissement (au lieu de souterrain), aspirateur.	90 litres par mètre carré par jour (0,74 l/h)	La production d'eau douce est influencée à la fois par la température d'entrée de la vapeur d'eau et par sa vitesse. La production maximale a été atteinte à 53 °C et 1,4 m/s.
Ali Ouar et al. (2021)[74] (Experimental)	Distillateur solaire d'eau, cheminée solaire.	6,951 litres par mètre carré par jour	Le couplage de la cheminée solaire avec un système conventionnel a augmenté la température de l'eau salée de 20 °C, entraînant une augmentation de 158 % de la production d'eau.
Kabeel et al. (2022) [75] (Experimental and Theoretical Study)	Humidificateur, déshumidificateur, chauffe-eau solaire, distillateur solaire, chauffe-air solaire.	20,61 litres par mètre carré par jour (620 litres par mois)	Il existe une relation inverse entre le paramètre exergoéconomique et les taux d'intérêt, tandis qu'une corrélation directe a été observée entre les taux d'intérêt et les coûts de l'eau. Le coût minimum de l'eau est d'environ 1,30 \$/m ³ .
Abu El-Maaty et al. (2019)[76] (Étude Expérimentale)	Collecteur solaire à tubes sous vide, pompe à brouillard, buses de brouillard, condenseur.	5,831 litres par mètre carré par jour	L'efficacité quotidienne du système variait entre 33,74 % et 38,95 %, avec des températures maximales de l'eau dans le réservoir de stockage du collecteur solaire atteignant 42,5 °C et 61 °C. Le coût par litre d'eau est de 0,035 \$.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Ranjan et al. (2022) [77](Étude Expérimentale)	Collecteur parabolique équipé d'un serpentín en cuivre, distillateur solaire.	6,1 litres par mètre carré par jour	L'ajout d'un serpentín en cuivre au collecteur solaire parabolique a augmenté la température d'entrée de l'eau dans le distillateur solaire de jusqu'à 15 °C par rapport aux distillateurs conventionnels. Cette intégration a amélioré l'efficacité du distillateur solaire.
Kumar et al. (2022) [78] (Étude Expérimentale et Théorique)	Collecteur parabolique, distillateur solaire.	4,1 litres par mètre carré par jour	Le système a été testé avec des profondeurs de saumure de 5 cm, 10 cm et 15 cm. La production maximale d'eau distillée et l'efficacité énergétique ont été obtenues à 5 cm, avec une production de 4,1 litres par mètre carré par jour et une efficacité de 16,6 %. Le coût de l'eau était de 0,01 \$/l.
Alghamdi et al. (2018)[79](Étude Expérimentale et Numérique)	Six concentrateurs paraboliques alignés en série, humidificateur, déshumidificateur.	24.31 kg/ jour	L'étude a inclus des tests, une modélisation ainsi qu'une optimisation du système HDH. Les conditions optimales de fonctionnement ont été établies pour divers débits de circulation d'huile et d'air. Le coût par litre d'eau s'élevait à 0,0125 \$.
Sharshir et al. (2016) [80] (Étude Expérimentale et Numérique)	Quatre distillateurs solaires, collecteurs solaires à tubes sous vide, humidificateur, déshumidificateur.	63.3 kg/jour	L'étude a proposé un système hybride de dessalement solaire qui associe les procédés d'humidification et de déshumidification à quatre distillateurs solaires classiques.L'eau rejetée par le processus de déshumidification était dirigée vers les distillateurs solaires. Le coût par litre était de 0,034 \$.

4.4 Conclusion

L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre a examiné deux configurations d'un prototype de laboratoire conçu pour la génération d'eau atmosphérique. La première configuration, fonctionnant sans unité d'évaporation, a révélé les limitations du système dans sa capacité à produire de l'eau douce sous des conditions de simple refroidissement. Les résultats ont montré que la capacité de refroidissement du système était insuffisante pour générer un rendement en eau significatif, en raison principalement de l'humidité initiale faible de l'air et de différences de température sous-optimales.

En revanche, l'intégration d'une unité d'évaporation dans la deuxième configuration a considérablement amélioré la production d'eau. En contrôlant la température d'entrée de la vapeur d'eau et la vitesse du flux d'air, le prototype a démontré une meilleure efficacité de condensation et une augmentation notable du rendement en eau douce. Les données ont révélé que des températures d'entrée plus élevées et des vitesses de vapeur accrues entraînaient une production d'eau supérieure, confirmant l'effet synergique de ces paramètres pour optimiser le processus de condensation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette recherche présente un nouveau système de dessalement hybride qui combine l'énergie solaire avec l'énergie géothermique peu profonde, intégrant des tuyaux verticaux enterrés et un collecteur solaire parabolique. Le système a été évalué par le développement d'un prototype à l'échelle de laboratoire, conçu pour analyser sa faisabilité et son efficacité dans la production d'eau douce.

Une caractéristique clé du système est l'inclusion d'une unité de stockage d'énergie thermique et de batteries photovoltaïques autonomes, garantissant un fonctionnement ininterrompu pendant les périodes de faible ensoleillement, comme par temps nuageux ou pendant la nuit. Les expériences, menées dans des conditions contrôlées en laboratoire, se sont concentrées sur la capacité du système à produire de l'eau douce.

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une relation claire entre la vitesse de la vapeur d'eau et la production d'eau douce, des vitesses plus élevées correspondant à une augmentation de la production. Par exemple, à une température d'entrée de la vapeur d'eau de 44 °C, la production d'eau douce était de 186 ml/h pour une vitesse de 0,74 m/s, augmentant à 280 ml/h à 0,81 m/s et 300 ml/h à 1,09 m/s. De même, à une température d'entrée de 46 °C, l'augmentation de la vitesse de 0,58 à 0,9 m/s a entraîné une hausse de 86,67 % de la production, tandis que des augmentations supplémentaires de la vitesse ont montré des rendements décroissants. La production d'eau douce la plus élevée, 740 ml/h, a été observée à une température de vapeur de 53 °C et une vitesse de 1,4 m/s. Ces résultats suggèrent une productivité journalière estimée à 90 litres par mètre carré.

La conception verticale des tuyaux du système présente des avantages en termes de maintien de l'équilibre thermique et de prévention de la saturation du sol, ce qui le rend particulièrement adapté aux zones où l'espace est limité. Ces résultats fournissent des informations essentielles qui pourraient guider les futures améliorations et l'adaptation de cette technologie à des applications de plus grande envergure.

En conclusion, ce système de dessalement hybride représente une solution prometteuse pour la production durable d'eau douce, avec un potentiel significatif pour de futurs développements. Les résultats expérimentaux soulignent l'importance d'optimiser à la fois la vitesse de la vapeur et la température pour maximiser la production d'eau. Les recherches futures devraient se pencher sur des applications à plus grande échelle, réaliser des comparaisons économiques avec les méthodes de dessalement traditionnelles et analyser la consommation énergétique ainsi que l'efficacité globale du système dans des conditions réelles afin de confirmer sa viabilité pratique et économique.

Références

Références

- [1] D.N. Chakkaravarthy, T. Balakrishnan, Water Scarcity- Challenging the Future Water Scarcity- Challenging the Future, (2020). <https://doi.org/10.30954/0974-1712.08.2019.2>.
- [2] J.J. Schmidt, Valuing water, 2019. <https://doi.org/10.4324/9780429453571-2>.
- [3] M. Ayaz, M.A. Namazi, M.A. ud Din, M.I.M. Ershath, A. Mansour, el H.M. Aggoune, Sustainable seawater desalination: Current status, environmental implications and future expectations, *Desalination* 540 (2022) 116022. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116022>.
- [4] J. Liu, H. Yang, S.N. Gosling, M. Kummu, M. Flörke, S. Pfister, N. Hanasaki, Y. Wada, X. Zhang, C. Zheng, J. Alcamo, T. Oki, Water scarcity assessments in the past, present, and future, *Earths Future* 5 (2017) 545–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>.
- [5] W. Leal Filho, E. Totin, J.A. Franke, S.M. Andrew, I.R. Abubakar, H. Azadi, P.D. Nunn, B. Ouweneel, P.A. Williams, N.P. Simpson, Understanding responses to climate-related water scarcity in Africa, *Science of the Total Environment* 806 (2022) 150420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150420>.
- [6] G. Water, S. Due, T.O. Climate, I.T.S. Conservation, *Global Water Scarcity Due To Climate Change and Its Conservation*, 22 (2022) 64–69.
- [7] World Economic Forum, *The Global Risks Report 2016 11th Edition*, (2016) 103.
- [8] V.K. Khilchevskiy, *Monitoring ' 2020 Global problems of water resources scarcity Monitoring ' 2020*, (2020).
- [9] B. a. Covitt, *Earth's freshwater, A guide for teaching freshwater*, 2012.
- [10] H.M. Ashraf, S.A. Al-Sobhi, M.H. El-Naas, Mapping the desalination journal: A systematic bibliometric study over 54 years, *Desalination* 526 (2022) 115535. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115535>.
- [11] N.P.B. Tan, P.M.L. Ucab, G.C. Dadol, L.M. Jabile, I.N. Talili, M.T.I. Cabaraban, A review of desalination technologies and its impact in the Philippines, *Desalination* 534 (2022) 115805. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115805>.

- [12] M. Ayaz, M.A. Namazi, M.A. ud Din, M.I.M. Ershath, A. Mansour, el H.M. Aggoune, Sustainable seawater desalination: Current status, environmental implications and future expectations, *Desalination* 540 (2022) 116022. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116022>.
- [13] F.E. Ahmed, R. Hashaikh, A. Diabat, N. Hilal, Mathematical and optimization modelling in desalination: State-of-the-art and future direction, *Desalination* 469 (2019) 114092. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114092>.
- [14] F. Esmailion, *Hybrid renewable energy systems for desalination*, Springer International Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1168-5>.
- [15] Y. Li, X. Chen, Y. Xu, Y. Zhuo, G. Lu, Sustainable thermal-based desalination with low-cost energy resources and low-carbon footprints, *Desalination* 520 (2021) 115371. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115371>.
- [16] J. Jairo, J. Pablo, L.C. Sandoval-herazo, F. Correa-mahecha, *Commercial Thermal Technologies for Desalination of Water from Renewable Energies : A State of the Art Review*, (2021).
- [17] M.A. Alaei Shahmirzadi, S.S. Hosseini, J. Luo, I. Ortiz, Significance, evolution and recent advances in adsorption technology, materials and processes for desalination, water softening and salt removal, *J Environ Manage* 215 (2018) 324–344. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.040>.
- [18] M.N. Soliman, F.Z. Guen, S.A. Ahmed, H. Saleem, M.J. Khalil, S.J. Zaidi, Energy consumption and environmental impact assessment of desalination plants and brine disposal strategies, *Process Safety and Environmental Protection* 147 (2021) 589–608. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.038>.
- [19] A.E. Kabeel, M.H. Hamed, Z.M. Omara, S.W. Sharshir, Water Desalination Using a Humidification-Dehumidification Technique—A Detailed Review, *Natural Resources* 04 (2013) 286–305. <https://doi.org/10.4236/nr.2013.43036>.
- [20] A. Alkaisi, R. Mossad, A. Sharifian-Barforoush, A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017: pp. 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>.
- [21] V. Okati, A. Ebrahimi-Moghadam, A. Behzadmehr, M. Farzaneh-Gord, Proposal and assessment of a novel hybrid system for water desalination using solar and geothermal energy sources, *Desalination* 467 (2019) 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.011>.
- [22] Z.M. Ghazi, S. Warisha, F. Rizvi, W.M. Shahid, A.M. Abdulhameed, H. Saleem, S.J. Zaidi, An overview of water desalination systems integrated with renewable

- energy sources, *Desalination* 542 (2022) 116063.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116063>.
- [23] D. Curto, V. Franzitta, A. Guercio, A review of the water desalination technologies, *Applied Sciences (Switzerland)* 11 (2021) 1–36.
<https://doi.org/10.3390/app11020670>.
- [24] H.J. Krishna, *Introduction to Desalination Technologies*, 2008.
<https://texaswater.tamu.edu/readings/desal/introtodesal.pdf> (accessed September 7, 2024).
- [25] Marco Rognoni, *LA DISSALAZIONE DELL'ACQUA DI MARE Descrizione, analisi e valutazione delle principali tecnologie*, 1st ed, Palermo, Italy, 2010.
www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0030.
- [26] F. Mandam, H. Ettouney, LiBr-H₂O absorption heat pump for single-effect evaporation desalination process, 2000. www.elsevier.com/locate/desal.
- [27] INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION, 30 June 2015, n.d.
- [28] M. Ibrahim, Y. Aoura, A. Arbaoui, 13^{ème} Congrès de Mécanique 11-14 Avril, in: Meknès, MAROC, 2017: pp. 1–3.
https://cmm2017.sciencesconf.org/129229/Cost_MVC.pdf (accessed September 1, 2024).
- [29] A. Al-Karaghoul, L.L. Kazmerski, Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013) 343–356.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>.
- [30] Buros OK. *The ABC of desalting*. 2nd ed. Riyadh, S.A: Produced by The SalineWater Conversion Council for the International Desalination Association, n.d. http://www.lis.edu.es/uploads/7a4ed9e0_9c34_42d9_b041_3609ef616fd0.pdf (accessed September 8, 2024).
- [31] J. MILLER, *Review of Water Resources and Desalination Technologies*, Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2003.
<https://doi.org/10.2172/809106>.
- [32] M. Shatat, M. Worall, S. Riffat, Opportunities for solar water desalination worldwide: Review, *Sustain Cities Soc* 9 (2013) 67–80.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.03.004>.
- [33] R. Enayatollahi, Winter performance of a Solar Humidification Dehumidification Desalination System, n.d. <https://www.researchgate.net/publication/267975446>.

- [34] H. Sharon, K.S. Reddy, A review of solar energy driven desalination technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015) 1080–1118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.002>.
- [35] M.S. Islam, A. Sultana, A.H.M. Saadat, M.S. Islam, M. Shammi, M.K. Uddin, Desalination Technologies for Developing Countries: A Review, *Journal of Scientific Research* 10 (2018) 77–97. <https://doi.org/10.3329/jsr.v10i1.33179>.
- [36] R. Semiat, Present and future, *Water Int* 25 (2000) 54–65. <https://doi.org/10.1080/02508060008686797>.
- [37] J.R. McCutcheon, R.L. McGinnis, M. Elimelech, Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance, *J Memb Sci* 278 (2006) 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.10.048>.
- [38] T.Y. Cath, S. Gormly, E.G. Beaudry, M.T. Flynn, V.D. Adams, A.E. Childress, Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space: Part I. Direct osmotic concentration as pretreatment for reverse osmosis, *J Memb Sci* 257 (2005) 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.08.039>.
- [39] image for forward-osmosis, (n.d.). <https://www.desalinationlab.com/forward-osmosis-fo/> (accessed September 9, 2024).
- [40] A.W. Mohammad, Y.H. Teow, W.L. Ang, Y.T. Chung, D.L. Oatley-Radcliffe, N. Hilal, Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects, *Desalination* 356 (2015) 226–254. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>.
- [41] C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, T. Melin, State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination* 216 (2007) 1–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>.
- [42] ion-exchange resin, (n.d.). <https://www.youtube.com/watch?v=ctlHNf1s6RM&list=PLvfdyaivecUGqa6QwtgjHNEvYyastmNkA> (accessed October 5, 2024).
- [43] A. Alkhudhiri, N. Darwish, N. Hilal, Membrane distillation: A comprehensive review, *Desalination* 287 (2012) 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.027>.
- [44] V.D. Alves, I.M. Coelho, Orange juice concentration by osmotic evaporation and membrane distillation: A comparative study, *J Food Eng* 74 (2006) 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.019>.
- [45] M. Tomaszewska, M. Gryta, A.W. Morawski, Study on the concentration of acids by membrane distillation, 1995.

- [46] M. Abdelgaied, M.F. Seleem, M.M. Bassuoni, Recent technological advancements in membrane distillation and solar stills: preheating techniques, heat storage materials, and nanomaterials — a detailed review, *Environmental Science and Pollution Research* 29 (2022) 38879–38898. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19625-w>.
- [47] A.S. Alsaadi, N. Ghaffour, J.D. Li, S. Gray, L. Francis, H. Maab, G.L. Amy, Modeling of air-gap membrane distillation process: A theoretical and experimental study, *J Memb Sci* 445 (2013) 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.05.049>.
- [48] I.A. Said, T. Chomiak, J. Floyd, Q. Li, Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD) for Wastewater Treatment, Concentration, and Desalination: A Comprehensive Review, 2020.
- [49] N. Ghaffour, A.S. Alsaadi, A. Alpatova, J.-G. Lee, L. Francis, Novel Vacuum Membrane Distillation Configuration for Water Vapor Flux Enhancement, 2019. <http://wdrc.kaust.edu.sa/Pages/Noreddine-Ghaffour.aspx>.
- [50] F. Diogo, A. Santos, M. Azevedo, UNIVERSIDADE DE LISBOA FACULDADE DE CIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA Renewable Energy Powered Desalination Systems: Technologies and Market Analysis, 2014. https://www.aler-renovaveis.org/contents/lerpublication/ulfc112531_tm_francisco_azevedo.pdf (accessed September 9, 2024).
- [51] S. Miller, H. Shemer, R. Semiat, Energy and environmental issues in desalination, *Desalination* 366 (2015) 2–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.034>.
- [52] E. Jones, M. Qadir, M.T.H. van Vliet, V. Smakhtin, S. mu Kang, The state of desalination and brine production: A global outlook, *Science of the Total Environment* 657 (2019) 1343–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>.
- [53] H.R. Lotfy, J. Staš, H. Roubík, Renewable energy powered membrane desalination — review of recent development, *Environmental Science and Pollution Research* 29 (2022) 46552–46568. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20480-y>.
- [54] D. Xevgenos, K. Moustakas, D. Malamis, M. Loizidou, An overview on desalination & sustainability: renewable energy-driven desalination and brine management, *Desalination Water Treat* 57 (2016) 2304–2314. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.984927>.

- [55] M. Moser, F. Trieb, T. Fichter, Potential of concentrating solar power plants for the combined production of water and electricity in MENA countries, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 1 (2013) 122–140. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2013.01.0009>.
- [56] M. Shatat, S.B. Riffat, Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources, *International Journal of Low-Carbon Technologies* 9 (2014) 1–19. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.
- [57] S.A. Kalogirou, Seawater desalination using renewable energy sources, *Prog Energy Combust Sci* 31 (2005) 242–281. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>.
- [58] I. Houcine, F. Benjema, M.-H. Chahbani, M. Maalej, Renewable energy sources for water desalting in Tunisia, 1999.
- [59] J. Leijon, Wave Power for Desalination, Uppsala, Sweden, Department of Electrical Engineering, Division of Electricity, Uppsala University, 2020. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-417998>.
- [60] A. Gustafsson, J. Lindblom, Underground Condensation of Humid Air - A Solar Driven System for Irrigation & Drinking-Water Production, Master thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2001. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1021126/FULLTEXT01.pdf> (accessed August 28, 2024).
- [61] J. Lindblom, Condensation Irrigation Simulations of Heat and Mass Transfer, Master thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2006. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999644/FULLTEXT01.pdf> (accessed August 28, 2024).
- [62] J. Lindblom, B. Nordell, Water production by underground condensation of humid air, *Desalination* 189 (2006) 248–260. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.08.002>.
- [63] V. Okati, A. Behzadmehr, S. Farsad, Analysis of a solar desalinator (humidification–dehumidification cycle) including a compound system consisting of a solar humidifier and subsurface condenser using DoE, *Desalination* 397 (2016) 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.010>.
- [64] V. Okati, S. Farsad, A. Behzadmehr, Numerical analysis of an integrated desalination unit using humidification-dehumidification and subsurface condensation processes, *Desalination* 433 (2018) 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.029>.
- [65] S.H. Hammadi, Freshwater production by combination of solar still, earth-air heat exchanger and solar chimney for natural air draft, *International Journal of*

Sustainable Engineering 14 (2021) 921–932.
<https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1941392>.

- [66] S. V. Veretennikov, S.A. Piralishvili, O.A. Evdokimov, A.I. Guryanov, M.M. Guryanova, A.A. Shaikina, Research of a vortex condenser of the atmospheric moisture, *International Journal of Engineering Research in Africa* 40 (2018) 88–100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.40.88>.
- [67] F. Al-Ajmi, D.L. Loveday, V.I. Hanby, The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Build Environ* 41 (2006) 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>.
- [68] A.T. Le, L. Wang, Y. Wang, D. Li, Measurement investigation on the feasibility of shallow geothermal energy for heating and cooling applied in agricultural greenhouses of Shouguang City: Ground temperature profiles and geothermal potential, *Information Processing in Agriculture* 8 (2021) 251–269. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.06.001>.
- [69] G. Florides, S. Kalogirou, Annual ground temperature measurements at various depths, 8th REHVA World Congress, *Clima* (2005) 1–6. <http://ktisis.cut.ac.cy/handle/10488/844>.
- [70] A. Djebli, S. Hanini, O. Badaoui, M. Boumahdi, A new approach to the thermodynamics study of drying tomatoes in mixed solar dryer, *Solar Energy* 193 (2019) 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.057>.
- [71] G. Kalaiarasi, R. Velraj, M.N. Vanjeswaran, N. Ganesh Pandian, Experimental analysis and comparison of flat plate solar air heater with and without integrated sensible heat storage, *Renew Energy* 150 (2020) 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.116>.
- [72] YUNUS A. ÇENGEL and MICHAEL A. BOLES, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th edition, Fifth Edit, McGraw Hill, New York, 2006.
- [73] Y. Sadaoui, R. Belakroum, N. Cherrad, M. Kadja, Experimental investigation of a novel hybrid solar-geothermal desalination process, *Desalination* 590 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117982>.
- [74] M.E. Ali Ouar, M.H. Sellami, S.E. Meddour, O.B. Mokrani, Experimental study of solar water distiller integrated with solar chimney, *Desalination Water Treat* 229 (2021) 1–9. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27364>.
- [75] A.E. Kabeel, M.R. Diab, M.A. Elazab, E.M.S. El-Said, Hybrid solar powered desalination system based on air humidification dehumidification integrated with

- novel distiller: Exergoeconomic analysis, *J Clean Prod* 379 (2022) 134690.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134690>.
- [76] A.E. Abu El-Maaty, M.M. Awad, G.I. Sultan, A.M. Hamed, Solar powered fog desalination system, *Desalination* 472 (2019) 114130.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114130>.
- [77] A. Ranjan, Y. Dewang, J. Raghuwanshi, V. Sharma, Experimental evaluation of solar still coupled with parabolic trough collector, *Mater Today Proc* 60 (2022) 935–938. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.075>.
- [78] A. Kumar, S. Vyas, D. Nchelatebe Nkwetta, Experimental study of single slope solar still coupled with parabolic trough collector, *Mater Sci Energy Technol* 3 (2020) 700–708. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.07.005>.
- [79] M. Alghamdi, F. Abdel-Hady, A.K. Mazher, A. Alzahrani, Integration of process modeling, design, and optimization with an experimental study of a solar-driven humidification and dehumidification desalination system, 2018.
<https://doi.org/10.3390/pr6090163>.
- [80] S.W. Sharshir, G. Peng, N. Yang, M.A. Eltawil, M.K.A. Ali, A.E. Kabeel, A hybrid desalination system using humidification-dehumidification and solar stills integrated with evacuated solar water heater, *Energy Convers Manag* 124 (2016) 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.028>.

المخلص

تقدم هذه الأطروحة نظام تحلية هجين مبتكر يعتمد على الطاقة الشمسية والطاقة الجوفية السطحية، تم تصميمه لمعالجة ندرة المياه من خلال إنتاج مياه عذبة بكفاءة. يجمع النظام بين مجمع قطع مكافئ شمسي ووحدة تكثيف عمودية تحت الأرض، مما يجعله بديلاً مستداماً لطرق التحلية التقليدية. تم تطوير نموذج أولي على مستوى المختبر لتقييم أداء النظام في بيئة خاضعة للرقابة، حيث أظهرت النتائج فعالية الجمع بين الطاقة الشمسية للتبخير والتكثيف عن طريق التبريد الجوفي السطحي للأرض. وقد أظهرت النتائج التجريبية علاقة واضحة بين سرعة بخار الماء وإنتاج المياه العذبة، حيث تم تحقيق أفضل إنتاج للمياه عند درجات حرارة وسرعات مدخل أعلى، كما يضمن دمج تخزين الطاقة الحرارية والطاقة الكهروضوئية خارج الشبكة التشغيل المستمر للنظام خلال فترات انخفاض ضوء الشمس. تقدم هذه الدراسة رؤية قيمة حول إمكانية توسيع نطاق النظام وتطبيقه في إنتاج المياه العذبة بشكل مستدام، مما يوفر حلاً واعداً للمناطق الجافة التي تعاني من ندرة المياه.

Resumé

Cette thèse présente un système hybride innovant de désalinisation basé sur l'énergie solaire et l'énergie géothermique surface, conçu pour répondre à la pénurie d'eau grâce à une production efficace d'eau douce. Le système combine un collecteur solaire parabolique avec une unité de condensation verticale souterraine, offrant une alternative durable aux méthodes de désalinisation conventionnelles. Un prototype à l'échelle de laboratoire a été développé pour évaluer les performances du système dans un environnement contrôlé, démontrant l'efficacité de la combinaison de l'énergie solaire pour l'évaporation et du refroidissement par l'énergie géothermique surface pour la condensation. Les résultats expérimentaux ont révélé une relation claire entre la vitesse de la vapeur d'eau et la production d'eau douce, avec un

rendement optimal obtenu à des températures et vitesses d'entrée plus élevées. De plus, l'intégration du stockage d'énergie thermique et de l'énergie photovoltaïque hors réseau garantit le fonctionnement continu du système pendant les périodes de faible ensoleillement. Cette étude fournit des informations précieuses sur la possibilité d'agrandir le système et son application pour une production durable d'eau douce, offrant une solution prometteuse pour les régions arides souffrant de pénurie d'eau.

Abstract

This thesis introduces an innovative hybrid desalination system based on solar and shallow geothermal energy, designed to address water scarcity through efficient freshwater production. The system combines a solar parabolic collector with an underground vertical condensation unit, offering a sustainable alternative to conventional desalination methods. A laboratory-scale prototype was developed to evaluate the system's performance in a controlled environment, demonstrating the effectiveness of combining solar energy for evaporation and shallow geothermal cooling for condensation. The experimental results revealed a clear relationship between water vapor velocity and freshwater production, with optimal water yield achieved at higher inlet temperatures and velocities. Additionally, the integration of thermal energy storage and off-grid photovoltaic energy ensures the continuous operation of the system during periods of reduced sunlight. This study provides valuable insights into the scalability of the system and its application for sustainable freshwater production, offering a promising solution for arid regions suffering from water scarcity.