

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

---

UNIVERSITÉ DE BATNA 2 – MOSTEFA BEN BOULAÏD –

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



## THÈSE



Préparée au sein du Laboratoire d'Études des Systèmes Énergétiques  
Industriels (L.E.S.E.I)

Présentée pour l'obtention du diplôme de  
DOCTORAT EN SCIENCE EN GÉNIE MÉCANIQUE

Option : Énergétique

Sous le thème :

---

# ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA PHÉNOMÉNOLOGIE DE DISTILLATION : APPLICATION À PLUSIEURS SYSTÈMES SOLAIRES

---

Présentée par :

**BAIT OMAR**

Devant le jury composé de :

Dr. Abdelhafid BRIMA	Professeur, Université de Batna 2	Président
Dr. Mohamed SI-AMEUR	Professeur, Université de Batna 2	Rapporteur
Dr. Ghazali MEBARKI	MCA, Université de Batna 2	Examineur
Dr. Mayouf SI ABDELLAH	Professeur, Université de M'sila	Examineur
Dr. Rabah ZEGADI	Professeur, Université de Sétif 1	Examineur
Dr. Mahfoudh KADJA	Professeur, Université de Constantine 1	Examineur

*À la mémoire de mes chers parents*

## Remerciements

*Ce travail n'aurait pu se dérouler dans les meilleures conditions sans l'aide précieuse et nécessaire de mon encadreur Monsieur Mohamed SI-AMEUR, Professeur au département de mécanique de l'université de Batna 2, Ex. Directeur du Laboratoire d'Études des Systèmes Énergétiques Industriels (L.E.S.E.I), qui a encadré mon travail, et qui a mis à ma disposition tous les moyens et toutes les conditions nécessaires au bon déroulement de ce travail, et qui m'a fait partager son savoir et son enthousiasme. Un énorme merci pour sa disponibilité sans bornes, sa patience et ses idées toujours constructives.*

*Je tiens à exprimer tous mes remerciements à Monsieur Abdelhafid BRIMA, Professeur à l'université de Batna 2, Monsieur Ghazali MEBARKI, Maître de conférence à l'université de Batna 2, Monsieur Mayouf SI ABDELLAH, Professeur à l'université de M'sila, Monsieur Rabah ZEGADI, Professeur à l'université Sétif 1 et Monsieur Mahfoudh KADJA, Professeur à l'université de Constantine 1, qui ont bien voulu examiner ce travail, et qu'ils soient encore ici remerciés de l'honneur qu'ils me font en faisant partie du jury.*

BAIT Omar

## Déclarations

**Déclarations des intérêts :** *Néant.*

**Support de financement :** *Cette thèse de doctorat a été préparée au sein du laboratoire **L.E.S.E.I.** En conséquent, je déclare que ce travail n'a pas reçu un support financier spécifique d'une agence publique ou commerciale.*

**Citations des données rapportées dans la thèse :** *Je déclare que les données rapportées de la littérature et mentionnées dans les chapitres I, II, III, IV et les Annexes 2 et 3 sont soigneusement référencées.*

---

## Declarations

**Declarations of interests:** *None.*

**Funding support:** *This thesis has been performed in the **L.E.S.E.I** laboratory. Therefore, I hereby declare that the research in this work did not receive any specific grant from funding agencies in the public or commercial sectors.*

**Citations of data in the thesis:** *I hereby declare that any data reported from the open literature in this work and mentioned in chapters I, II, III, IV and Annex 2 and 3 sections are appropriately cited.*

Tables des Matières .....	i
Nomenclature .....	vi
Liste des Figures .....	x
Liste des Tableaux .....	xiii
Introduction générale .....	1
• Dessalement, eau et énergie .....	1
• Organisation du présent travail .....	2
<b>Chapitre I : Généralités sur les procédés de dessalement assistés par l'énergie solaire</b> .....	<b>4</b>
I.1. Introduction .....	4
I.1.1. Problématique de l'eau dans le monde .....	4
I.1.2. Aperçu sur la situation des ressources en eau en Algérie .....	5
I.1.3. Normes de la qualité de l'eau potable .....	5
a. Qualité chimique .....	6
b. Qualité microbiologique .....	6
c. Qualités physique et gustative .....	6
I.2. Généralités sur les procédés de dessalement .....	7
I.2.1. Procédés ne nécessitant pas un changement de phase .....	8
I.2.1.1. Séparation des sels par propriétés sélectives des ions .....	8
• Échange ionique .....	8
I.2.1.2. Séparation des sels par membrane .....	8
a. Électrodialyse .....	8
b. Osmose inverse .....	9
I.2.2. Procédés nécessitant un changement de phase .....	10
I.2.2.1. Passage de l'eau liquide à l'état solide .....	10
• Congélation .....	10
I.2.2.2. Passage de l'eau liquide à l'état vapeur .....	11
a. Compression de vapeur (C.V) .....	11
b. Distillation à effets multiples (M.E.D) .....	11
c. Distillation multi flash (M.F.D) .....	12
I.3. Procédés de dessalement au moyen de l'énergie solaire .....	13

• Procédés de dessalement à base des énergies renouvelables (énergie solaire) .....	14
I.4. Impact de dessalement sur l'aspect environnemental .....	16
I.4.1. Impact positif .....	16
I.4.2. Impact négatif .....	16
I.5. Distillation solaire .....	16
<b>Chapitre II : Synthèse bibliographique</b> .....	<b>17</b>
II.1. Introduction .....	17
II.2. Mécanisme destiné au processus de dessalement solaire (Distillateur solaire) .....	17
II.2.1. Distillateur à simple effet .....	17
a. Distillateur à pente unique (simple pente) .....	17
b. Distillateur solaire à double pente .....	18
II.2.2. Distillateur à effet multiple .....	19
II.2.3. Autres types .....	19
a. Distillateur sphérique à balayage .....	19
b. Distillateur solaire incliné à cascades .....	19
c. Distillateur solaire incliné à mèche .....	19
d. Distillateur solaire à film capillaire .....	19
II.3. Travaux scientifiques .....	20
II.3.1. Distillateurs solaires fonctionnant en mode passif .....	20
II.3.2. Distillateurs solaires fonctionnant en mode actif .....	30
II.4. Influence de la nanotechnologie sur la performance des distillateurs solaires .....	33
<b>Chapitre III : Systèmes de distillation solaires : Designs &amp; modélisations</b> .....	<b>34</b>
III.1. Introduction .....	34
III.2. Systèmes de distillation solaire .....	34
III.2.1. Système de distillation en mode passif (Principaux éléments et fonctionnement)	
.....	34
III.2.1.1. La couverture (Fig. III.1, élément 1) .....	34
III.2.1.2. Le bassin (Fig. III.1, élément 2) .....	35
III.2.1.3. La gouttière (Fig. III.1, élément 4) .....	35
III.2.1.4. Éléments supplémentaires .....	35
III.2.1.5. Fonctionnement détaillé .....	36

III.2.2. Système de distillation proposé en mode actif (Éléments additifs et fonctionnement) .....	37
III.2.2.1. Choix du collecteur solaire .....	37
III.2.2.2. Principe .....	39
III.2.3. Application potentielle du système modifié .....	41
III.3. Mise en équation des échanges thermiques .....	41
III.3.1. Bilans énergétiques .....	41
III.3.1.1. Système passif .....	41
III.3.1.2. Système actif .....	44
III.3.1.3. Quantité de distillat, $P_h$ .....	46
III.3.1.4. Efficacité énergétique, $\eta_{th}$ .....	46
III.3.2. Bilan exergétique .....	47
III.3.2.1. Le concept d'exergie .....	47
III.3.2.2. Formulation théorique .....	47
III.3.2.3. Fractions thermiques énergétiques et exergétiques .....	48
III.3.2.4. Efficacité exergétique .....	49
III.3.2.5. Exergie d'entrée du système modifié .....	49
III.4. Résolution numérique et méthodologie .....	50
III.5. Présentation de la méthode de Runge–Kutta d'ordre 4 .....	50
III.6. Système de distillation solaire à étages multiples .....	51
III.6.1. Design, description et fonctionnement .....	51
III.6.1.1. Design et description .....	51
III.6.1.2. Fonctionnement .....	52
III.6.2. Bilan thermique .....	54
III.6.2.1. Effet de la surface d'évaporation .....	54
III.6.2.2. Effet d'espace entre étages (entre le 1 <sup>er</sup> et 2 <sup>ème</sup> étage) .....	57
III.7. Résolution numérique .....	59
<b>Chapitre IV : Résultats &amp; discussion</b> .....	<b>60</b>
IV.1. Introduction .....	60
IV.2. Paramètres étudiés .....	60
IV.3. Résultats et interprétation .....	61
IV.3.1. Systèmes de distillation solaire à étage simple .....	61
IV.3.1.1. Radiation solaire, température ambiante et vitesse du vent .....	61

IV.3.1.2. Distillateurs solaires passif et actif : Courbes des coefficients du transfert de chaleur et pressions .....	61
IV.3.1.3. Distillateurs solaires passif et actif : Profils de températures .....	63
IV.3.1.4. Distillateurs solaires passif et actif : Production et efficacité .....	64
• Cas de la littérature .....	67
IV.3.1.5. Distillateurs solaires passif et actif : Analyses énergétique et exergetique ...	68
IV.3.1.6. Comparaisons .....	72
IV.3.2. Système de distillation solaire à étages multiples .....	73
IV.3.2.1. Variation temporelle de la différence de température entre étages .....	73
IV.3.2.2. Variation temporelle du distillat dans chaque étage .....	75
IV.3.2.3. Variation temporelle du distillat cumulé (total) .....	76
IV.3.2.4. Effet du terme radiatif sur la température et la quantité du distillat .....	77
IV.3.2.5. Analyse variationnelle du design .....	79
IV.3.2.5.1. Effet d'augmenter la surface d'évaporation .....	79
IV.3.2.5.2. Coefficients de transfert de chaleur et comparaisons .....	81
IV.3.2.5.3. Coefficient de transfert de chaleur convectif et d'évaporation en fonction de variation de la surface d'évaporation .....	82
IV.3.2.5.4. Effet de variation de la surface d'évaporation sur les profils de températures .....	84
IV.3.2.5.5. Effet de variation du gap .....	85
<b>Conclusion générale</b>	<b>88</b>
▪ Utilisation de la modélisation 0 D (Systèmes de distillation solaire à petites échelle simples) .....	88
▪ Performance d'un système de distillation solaire à grande échelle (Distillateur solaire multi-étages) .....	88
▪ Autres paramètres affectant la productivité de ces systèmes .....	89
▪ Future recommandations .....	89
 <b>Annexes</b>	
 Annexe 1 : Corrélations des coefficients de transfert de chaleur par convection, évaporation et radiation .....	90
Annexe 2 : Applications des nanoparticules suspendues des fluides de base (eau) dans les systèmes de distillation solaire .....	91



A2.1. Introduction .....	91
A2.2. Transfert de chaleur en nanofluides .....	91
A2.3. Type de nanoparticules utilisées en distillation solaire .....	92
Références bibliographiques	<b>96</b>

## Nomenclature

### Lettres latines

### Symboles

$A$	=	surface ( $m^2$ )
$AB$	=	absorbance (-)
$cp$	=	chaleur massique (J/kg K)
$dt$	=	pas de temps (s)
$h$	=	coefficient de transfert de chaleur ( $W/m^2 K$ )
$h_{fg}$	=	enthalpie d'évaporation (J/kg)
$h_{fqi}^*$	=	chaleur latente modifiée (J/kg)
$\dot{E}x_{cw}$	=	flux convectif exergetique (W)
$\dot{E}x_{c,g-a}$	=	exergie transférée de l'eau à la couverture par convection ( $W/m^2$ )
$\dot{E}x_{ew}$	=	exergie d'évaporation (W)
$\dot{E}x_{in}$	=	exergie d'entrée ( $W/m^2$ )
$\dot{E}x_{rw}$	=	flux radiatif exergetique (W)
$\dot{E}x_{r,g-a}$	=	exergie transférée de la couverture à l'ambiance par radiation ( $W/m^2$ )
$\dot{E}x_{tw}$	=	flux exergetique total (W)
$\dot{E}x_{t,g-a}$	=	flux exergetique total associé avec la couverture et l'ambiance ( $W/m^2$ )
$\dot{E}x_w$	=	exergie utilisée pour chauffer l'eau ( $W/m^2$ )
$Fr_{en,cw}$	=	fraction énergetique par convection (-)
$Fr_{en,ew}$	=	fraction énergetique par évaporation (-)
$Fr_{en,rw}$	=	fraction énergetique par radiation (-)
$Fr_{ex,cw}$	=	fraction exergetique par convection (-)
$Fr_{ex,ew}$	=	fraction exergetique par évaporation (-)
$Fr_{ex,rw}$	=	fraction exergetique par radiation (-)
$h_b$	=	coefficient de transfert de chaleur total entre le bassin et l'ambiance ( $W/m^2 K$ )
$h_{cw}$	=	coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W/m^2 K$ )
$h_{ew}$	=	coefficient de transfert de chaleur par évaporation ( $W/m^2 K$ )
$h_{rw}$	=	coefficient de transfert de chaleur par radiation ( $W/m^2 K$ )
$h_t$	=	coefficient de transfert de chaleur total ( $W/m^2 K$ )
$h_w$	=	coefficient de transfert de chaleur par convection entre le bassin et l'eau ( $W/m^2 K$ )

$I(t)$	=	radiation solaire (W/m <sup>2</sup> )
$\dot{m}$	=	débit massique (kg/s)
$\dot{m}_{ew}$	=	distillat horaire (kg/m <sup>2</sup> )
$m_{ei}$	=	débit d'évaporation de l'eau saumâtre du $i^{\text{ème}}$ étage (kg/s)
$M_a$	=	masse molaire de l'air (g/mol)
$M_e$	=	masse molaire de l'eau (g/mol)
$P_g$	=	pression partial à la température de couverture (N/m <sup>2</sup> )
$P_w$	=	pression partial à la température de l'eau (N/m <sup>2</sup> )
$\dot{Q}_u$	=	énergie utile (W)
$\dot{Q}_{cw}$	=	flux convectif énergétique (W)
$\dot{Q}_{ew}$	=	flux d'évaporation énergétique (W)
$\dot{Q}_{rw}$	=	flux radiatif énergétique (W)
$\dot{Q}_{tw}$	=	flux total énergétique (W)
$t$	=	temps (s)
$T$	=	température (°C)
$T_a$	=	température ambiante (°C)
$T_b$	=	température du bassin (°C)
$T_{fi}$	=	température d'entrée du fluide (°C)
$T_{fo}$	=	température de sortie du fluide (°C)
$T_g$	=	température de la couverture (°C)
$T_w$	=	température de l'eau (°C)
$T_s$	=	température du soleil (K)
$T_{sky}$	=	température du ciel (°C)
$T_{ci}$	=	température de la surface de condensation du $i^{\text{ème}}$ étage (°C)
$T_{ei}$	=	température de la surface d'eau du $i^{\text{ème}}$ étage (°C)
$T_{SC-e}$	=	température d'entrée du capteur solaire (°C)
$T_{SC-s}$	=	température de sortie du capteur solaire (°C)
$U_l$	=	coefficient des pertes de chaleur global (W/m <sup>2</sup> K)
$v$	=	vitesse du vent (m/s)

## Lettres grecs

### Symboles

$\alpha_b$	=	absorptivité du bassin (-)
$\alpha_g$	=	absorptivité de la couverture (-)
$\alpha_w$	=	absorptivité de l'eau (-)
$\varepsilon$	=	émissivité (-)
$\rho_g$	=	réflectivité de la couverture (-)
$\sigma$	=	constante de Stefane Boltzmann (= $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )
$\eta_{ex}$	=	efficacité exergetique (-)
$\eta_{th}$	=	efficacité énergétique (-)

## Indices

### Symboles

$a$	=	ambient
$b$	=	bassin
$bf$	=	fluide de base
$c$	=	convection
$conv$	=	convection
$e$	=	évaporation
$en$	=	énergie
$eff$	=	effective
$evap$	=	évaporation
$ex$	=	éxergie
$g$	=	couverture
$in$	=	entrée
$m$	=	moyen
$nf$	=	nanofluide
$out$	=	sortie
$r$	=	radiation
$rad$	=	radiation
$Sky$	=	ciel
$t$	=	total
$th$	=	thermique

$w$  = eau

---

*Opérateurs mathématiques*

---

$\frac{d}{dt}$  = dérivée ordinaire

Chapitre I

**FIG. I.1.** Procédés de dessalement ..... 7  
**FIG. I.2.** Électrolyse ..... 9  
**FIG. I.3.** Procédé de l'osmose inverse ..... 10  
**FIG. I.4.** Procédé de compression de vapeur ..... 11  
**FIG. I.5.** (a) Distillation à effets multiples (b) détails ..... 12  
**FIG. I.6.** (a) Distillation à détente successive (b) détails ..... 13  
**FIG. I.7.** Procèdes de dessalement au moyen de l'énergie solaire ..... 15

Chapitre II

**FIG. II.1.** Distillateur à simple pente ..... 18  
**FIG. II.2.** Distillateur à double pente ..... 18

Chapitre III

**FIG. III.1.** Système de distillation solaire passif ..... 37  
**FIG. III.2.** Système de distillation solaire actif ..... 40  
**FIG. III.3.** Bilan énergétique ..... 41  
**FIG. III.4.** Cycle thermique ..... 44  
**FIG. III.5.** Schéma détaillé d'un système de distillation à étage multiple ..... 53  
**FIG. III.6.** Étapes résumant le fonctionnement du système solaire à étage multiple jusqu'à l'obtention du produit final (distillat) ..... 54  
**FIG. III.7.** Flux de chaleur au niveau du distillateur solaire multi-étages ..... 55  
**FIG. III.8.** Design variationnel de la surface d'évaporation suivant le système d'axes  $xOz$  .. 57  
**FIG. III.9.** Design variationnel de la surface d'évaporation suivant le système d'axe  $Oy$  ..... 58

Chapitre IV

**FIG. IV.1.** Paramètres étudiés ..... 60  
**FIG. IV.2.** Conditions climatiques ..... 61  
**FIG. IV.3.** Variation horaire des coefficients de transfert de chaleur et pressions pour les distillateurs passif et actif ..... 63  
**FIG. IV.4.** Evolution de températures et de différence de température en chaque système : a) passif et b) actif ..... 64  
**FIG. IV.5.** a,b) Variation temporaire de distillat pour systèmes passif et actif, c) Efficacité 66

<b>FIG. IV.6.</b> Coefficient de pertes de chaleur global pour les systèmes CP et CT .....	67
<b>FIG. IV.7.</b> Flux éxergétiques pour systèmes : a) passif et b) actif .....	69
<b>FIG. IV.8.</b> Fractions : a,b) énergétiques et c,d) éxergétiques des systèmes passif et actif .....	71
<b>FIG. IV.9.</b> Efficacités éxergétiques des systèmes : a) passif et b) actif .....	72
<b>FIG. IV.10.</b> Efficacité éxergétique journalière .....	73
<b>FIG. IV.11.</b> a) Variation temporelle des températures d'évaporateurs-condenseurs dans chaque étage, b) Variation temporelle de différence de température entre étages .....	75
<b>FIG. IV.12.</b> Distillat cumulé de chaque étage .....	76
<b>FIG. IV.13.</b> Distillat cumulé des quatre étages .....	77
<b>FIG. IV.14.</b> Influence du terme radiatif sur : a,b) profils de température, c) distillat cumulé .....	79
<b>FIG. IV.15.</b> Variation de la surface d'évaporation (1 <sup>er</sup> étage du système) .....	80
<b>FIG. IV.16.</b> Distillat total en fonction de la surface d'évaporation (1 <sup>er</sup> étage du système) ...	80
<b>FIG. IV.17.</b> Variation instantanée des coefficients de transfert de chaleur par : a) convection et b) évaporation (SE = 1,2 m × 0,4 m) .....	82
<b>FIG. IV.18.</b> Dépendance des coefficients de transfert de chaleur: a) convectif et b) évaporatif de la surface d'évaporation .....	83
<b>FIG. IV.19.</b> Variation horaire de la différence de température (présence de l'effet de la surface d'évaporation (1 <sup>er</sup> étage du système)) .....	84
<b>FIG. IV.20.</b> Variation de température et de différence de température en fonction de la surface d'évaporation du 1 <sup>er</sup> étage du système comme échantillon de test (système d'axes $xOz$ ) .....	85
<b>FIG. IV.21.</b> Effet de l'espace entre 1 <sup>er</sup> et 2 <sup>ème</sup> étage (système d'axes $Oy$ ) .....	86

## Liste des Tableaux

### Chapitre I

<b>TABLEAU I.1.</b> Normes de potabilité d'une eau .....	6
--	---

### Chapitre III

<b>TABLEAU III.1.</b> Travaux antécédents sur quelques types de collecteurs solaires tubulaires ..	38
--	----

<b>TABLEAU III.2.</b> Données utilisées dans le calcul numérique .....	45
--	----

<b>TABLEAU III.3.</b> Données utilisés dans la prédiction numérique .....	57
---	----

### Chapitre IV

<b>TABLEAU IV.1.</b> Coefficient de pertes de chaleur dans le cas d'un collecteur plat et circulaire .....	67
--	----

<b>TABLEAU IV.2.</b> Comparaisons avec différents travaux de la littérature .....	72
---	----

<b>TABLEAU IV.3.</b> Comparaison avec les travaux antérieurs .....	86
--	----

### Annexe 2

<b>TABLEAU A.2.1.</b> Modèles mathématiques des propriétés thermo-physiques des nanofluids ...	93
--	----

<b>TABLEAU A.2.2.</b> Données utiles sur l'application de la nanotechnologie sur les systèmes de distillation solaire .....	93
---	----



# Introduction générale

- **Dessalement, eau et énergie**

Comme chaque année, le monde entier célèbre un événement du **22 Mars**, une date symbolique représentant la Journée Mondiale de l'Eau. L'objectif derrière cette date est d'attirer l'attention de l'importance de ce sujet vital pour la vie et de promouvoir la gestion des ressources en eau douce. Encore, c'est également l'occasion de discuter, d'agir et de changer le courant de choses. D'après les statistiques disponibles, les eaux de mers et les océans qui couvrent notre planète 'la Terre' constituent près de 97 %, tandis que près de 1 % est considéré comme de l'eau potable et le reste se localise dans les calottes glaciaires. Aujourd'hui, le problème de l'indisponibilité d'une source d'eau potable représente une grande obsession notamment pour les pays en voie de développement (tiers monde), à cause des facteurs sérieux comme la croissance démographique et le développement industriel. Selon la carte géographique, les ressources en eau sont aléatoirement distribuées sur le globe terrestre. En addition, la désertification et la pauvreté qui frappent beaucoup de pays avaient un impact majeur, surtout aux prochaines décennies. Baser sur ces données, l'aboutissement à des sources en eaux potables devient de plus en plus critique.

Des recherches scientifiques pointues sur les systèmes de dessalement ont pour but d'arriver à un mécanisme présentant une efficacité énergétique considérable. Selon **Shatat et al. (2013)**, **14, 000** unités de dessalement sont distribuées autour du monde, la majorité de ces systèmes ont été adoptés par de nombreux pays, en particulier, au **Moyen-Orient** et la région **Nord d'Afrique** pour produire de l'eau douce. D'autre part, il est important de noter que ces pays où le dessalement a été largement utilisé jouissent d'une forte énergie solaire radiative.

La relation eau-énergie est une interaction forte qui relie deux éléments essentiels définissant la qualité de vie dans les pays développés et ceux qui sont en voie de développement. Cette interaction occupe une place significative parmi les préoccupations des rencontres internationaux. Sans oublier, les facteurs 'environnement, agriculture et le changement climatique' se sont d'autres agents actifs qui rentrent en jeu et qui influent considérablement sur cette relation. En effet, la production de l'énergie exige une certaine quantité d'eau pour la production industrielle, et d'autre part, la plupart des processus de traitement d'eau et purification, transportation, dessalement etc. sont alimentés grâce à

l'énergie. Cependant, l'interaction est assujettie à une contrainte dans les pays du tiers monde notamment le problème de l'insécurité pour l'obtention d'eau et le manque de planification pour accéder aux énergies propres. L'utilisation des énergies renouvelables dans les procédés de dessalement est un moyen efficace pour répondre aux besoins de l'être humain plusieurs en termes d'eau potable. Cependant, jusqu'à maintenant elle pose de problèmes réels à cause de son application irrationnelle et le manque de la main expertisée dans les pays non industriels. D'un autre côté, cette solution idéale (c.à.d. adoption des énergies renouvelables) a, en quelque sorte, remédié la pénurie de l'eau.

Par rapport aux techniques traditionnelles menées sur les procédés de dessalement à base de l'énergie solaire, une vaste documentation récente a rapportée de nouvelles méthodes appréciables. L'exigence d'un système de distillation solaire qui vérifiera simultanément un taux de distillat et efficacité thermique est un défi pour les scientifiques. Alors, le développement des mécanismes solaires avancés notamment à grande échelle restera un axe de recherche à investir intensivement, pour répondre aux exigences en eaux potables notamment pour les agglomérations éloignées.

La distillation solaire est considérée comme l'une des applications de l'énergie solaire. La conception de prototype de distillateurs solaires à petite échelle (étage unique) ou à grande échelle (à étages multiples) se compose d'enceinte (s) solide (s) (bassin (s)) dans lesquelles une certaine quantité d'eau saline l'occupe pour être distillée. La première catégorie (petite échelle) est généralement exposée directement aux rayons solaires, tandis que l'autre est connectée à une **source de chaleur externe** (utilisation des **collecteurs solaires**). Cependant, dans la littérature, il existe des systèmes multi-étages dont la structure externe est globalement fabriquée en matière transparente. Le rayonnement solaire incident passe à travers la couverture transparente et s'absorbe par le bassin (systèmes à petite échelle). L'eau s'échauffe et les vapeurs d'eau se condensent de telle sorte qu'elles se forment sur la face inférieure de la surface de condensation pour former des gouttelettes qui sont accumulées dans un collecteur de l'eau distillée.

- **Organisation du présent travail**

Le but de la présente étude est d'examiner différents concepts et de conception de plusieurs types de distillateurs solaires (petite échelle) et d'analyser un modèle mathématique gouvernant ces systèmes, ensuite sur la base de la résolution numérique, la performance des

distillateurs peut être l'aboutie. En outre, une étude paramétrique est effectuée afin de prédire la performance d'un système de distillation à étages multiples (grande échelle) en se basant sur le fait d'apparaître l'effet de la géométrie sur la production du condensat du système.

Le manuscrit est constitué de quatre grands chapitres, précédés d'une introduction générale. Des généralités sur les procédés de dessalement adoptés au monde vont aborder le premier chapitre, et puis nous présentons, en particulier, l'impact de l'utilisation des énergies propres (utilisation de l'énergie solaire) sur ces mécanismes.

Le deuxième chapitre constituera une synthèse bibliographique où l'on rappellera des travaux scientifiques menés notamment sur les **distillateurs solaires** au cours des trois dernières années.

Le chapitre suivant présentera la modélisation mathématique sur la base des analyses énergétique et exergétique d'un distillateur solaire **passif** et un autre **actif** proposé, à savoir le distillateur solaire à double pente couplé avec un collecteur solaire cylindrique. Le système passif est utilisé dans ce cas pour comparer ses performances avec celles du système actif. D'autre part, l'influence des paramètres géométriques (gap entre étages et surface d'évaporation) sur le fonctionnement d'un **distillateur solaire multi-étages** a été sous investigation.

Dans le quatrième chapitre, on présente les résultats sous forme de graphes avec leurs interprétations et parfois à l'aide de tableaux utiles pour mener des comparaisons avec la littérature.

Une synthèse de l'ensemble des résultats obtenus vont construire le contenu d'une conclusion générale. Ces quatre chapitres et la conclusion générale sont complétés par des références bibliographiques.

## Chapitre I

# Généralités sur les procédés de dessalement assistés par l'énergie solaire

### *Résumé :*

L'importance de l'obtention d'eau devient vital de nos jours une nécessité dans le monde, notamment avec la croissance de la population, l'augmentation des activités industrielles, etc. L'eau comme source de vie pour la faune et la flore, tandis que, sa potabilité est un défi pour sa concrétisation. À ce titre, ce chapitre présente en premier lieu des généralités sur les systèmes de dessalement d'eau fonctionnant à l'aide des sources d'énergie (ex. combustibles), provoquant le chauffage d'une certaine quantité d'eau contenant ces systèmes. Ensuite, et avec le progrès scientifique, ces équipements peuvent être adoptés à une source d'énergie totalement disponible et non polluante (c.à.d. *l'énergie solaire*).

## I.1. Introduction

Le dessalement de l'eau s'impose, dans un certain nombre de pays du pourtour méditerranéen en situation de stress hydrique, comme une option pour sécuriser l'alimentation en eau potable des populations des villes côtières, compte tenu de l'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'agriculture et de l'industrie.

En Algérie, comme dans les pays en voie de développement, le problème d'approvisionnement en eau potable devient de plus en plus crucial, du fait des aléas climatiques persistants, de la croissance démographique et de l'élévation du niveau de vie.

Pour subvenir à ses besoins en eau douce, l'homme a mis au point, différentes méthodes de recyclage ou de séparation de l'eau de ses impuretés. Parmi les solutions qui peuvent accroître la disponibilité de l'eau potable, on peut citer le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer ; l'utilisation du distillateur solaire est une solution parmi tant d'autres. C'est un appareil simple d'utilisation et d'entretien, de technologie rustique qui ne contient que des matériaux peu coûteux, disponibles et faciles à manipuler. Quoique souvent moins rapide et efficace, cette technologie laisse de côté la haute technologie et ses prix exorbitants pour utiliser des mécanismes simples, de faibles demandes en énergie ou de sources d'énergie gratuites et un coût de base très abordable.

### *I.1.1. Problématique de l'eau dans le monde*

L'eau est un élément vital, indispensable et irremplaçable à la survie de tous les êtres vivants qui ont tous besoin de leur ration quotidienne d'eau. Son usage s'est d'ailleurs intensifié où les volumes d'eau utilisés par l'homme ont décuplé suivant ainsi l'amélioration du niveau de vie et l'augmentation de la population mondiale. D'après les statistiques, plus de 6 milliards de personnes ont accès à des points d'eau améliorés (sans être nécessairement potable), ce qui représente près de 90 % de la population mondiale. L'accès des populations à cette substance devient un enjeu central qui commence à diminuer sous l'effet du changement climatique et de la croissance démographique. À l'égard de notre époque moderne, les problèmes liés à l'eau peuvent être résumés en chiffres comme suit : la propagation des

maladies liées à l'eau représente 3,5 millions de décès chaque année, bien plus que les accidents de la route et le sida combinés, 75 % des conflits et guerres mondiaux sont dus au manque de ressources en eau. Près de 40 % de la population est déjà confrontée à une pénurie d'eau et ce chiffre pourrait atteindre 66 % de la population mondiale en 2025, affirme le Conseil mondial de l'eau<sup>1</sup>.

### *1.1.2. Aperçu sur la situation des ressources en eau en Algérie*

Des millions de personnes dans le monde souffrent toujours d'un accès à l'eau potable. Pourtant, cette source de vie, si elle est disponible dans certaines régions, n'est malheureusement pas utilisée à bon escient. Alors que les années passent, la menace de pénurie d'eau continue d'augmenter, en raison de la croissance démographique et de consommation. Ces facteurs sont considérés comme les principaux conducteurs de diffusion de ce problème. En effet, la consommation non modérée ou excessive de l'eau, en outre, le coût de son transport, sa pollution, et des conflits sur des zones de terre et d'autres sont parmi les causes de sa pénurie. Malheureusement, la majorité des personnes touchées par ce problème vivent dans des régions isolées et souffrent de la pauvreté aiguë. Ce problème a révélé une recrudescence de différentes maladies, dont certaines sont mortelles. Cette situation exerce, d'une manière ou d'une autre, des pressions sur les autorités et les gouvernements pour qu'ils réfléchissent à des stratégies alternatives. Dans cette direction et à l'instar des pays du monde, **Ali Rahmani et Brahim (2017)** ont récemment effectué des simulations pour aborder la situation critique des ressources en eau naturelles et dresser une carte de route de l'approvisionnement en eau pour les dix prochaines années en Algérie. Les résultats de cette simulation ont été prédits à l'aide du calcul du paramètre (RNR : Resources Need Ratio). Sur la base des données obtenues, le changement climatique global devrait affecter évidemment les ressources en eau. L'approvisionnement en eau de la communauté en utilisant les technologies traditionnelles conduirait à une véritable crise d'eau. L'étude a également révélé que la mise en œuvre de procédés de dessalement et de traitement de l'eau constituait le meilleur moyen de répondre aux besoins en eau de la population.

### *1.1.3. Normes de la qualité de l'eau potable*

Une eau «*propre à la consommation humaine*» doit répondre à plus de **70** critères sanitaires ou environnementaux. Elle est dite «*potable*» lorsque ces critères sont satisfaits.

---

<sup>1</sup> [https://www.huffpostmaghreb.com/2017/03/22/journee-mondiale-de-leau-\\_n\\_15539932.html](https://www.huffpostmaghreb.com/2017/03/22/journee-mondiale-de-leau-_n_15539932.html)

a. *Qualité chimique* :

- Son **pH** doit être supérieur à 6,5 et inférieur à 9;
- Ses minéraux ne doivent pas dépasser les quantités maximum (voir **Tableau I.1** normes de potabilité d'une eau);
- Elle ne doit pas contenir de polluants chimiques, qui peuvent provoquer des intoxications et l'apparition de cancers, en cas de consommation prolongée d'une eau polluée, (Exemple : pesticides).

b. *Qualité microbiologique* : L'eau ne doit contenir aucun de ces éléments :

- Des bactéries, qui peuvent provoquer diverses maladies comme le choléra;
- Des parasites, qui peuvent être à l'origine de fièvre, diarrhée ou infections;
- Des virus.

c. *Qualités physique et gustative* :

L'eau doit être agréable à boire, claire, limpide, sans odeur et sans saveur. Ces critères n'ont certes pas de valeur sanitaire, mais c'est principalement pour ces aspects que le consommateur apprécie la qualité de l'eau. Ils peuvent être notamment mesurés par la **conductivité** et la **dureté** de l'eau, deux critères qui diffèrent en fonction des régions.

**Tableau I.1.** Normes de potabilité d'une eau<sup>2</sup>.

Paramètres	Valeurs limites (mg/l)	
Résidus sec	1500	
	Chlorures	200
	Sulfates	250
Substances présentes naturellement	Magnésium	50
	Sodium	150
	Hydrogénocarbonates	Non limité
	Nitrates	50
	Nitrites	0,1
	Ammonium	0,5
Substances indésirables	Fer	150
	Manganèse	200
	Cuivre	50
	Zinc	5

<sup>2</sup> <http://tpe-eau-lisleadam.e-monsite.com/pages/1-production/les-normes-de-potabilite-d-une-eau.html>

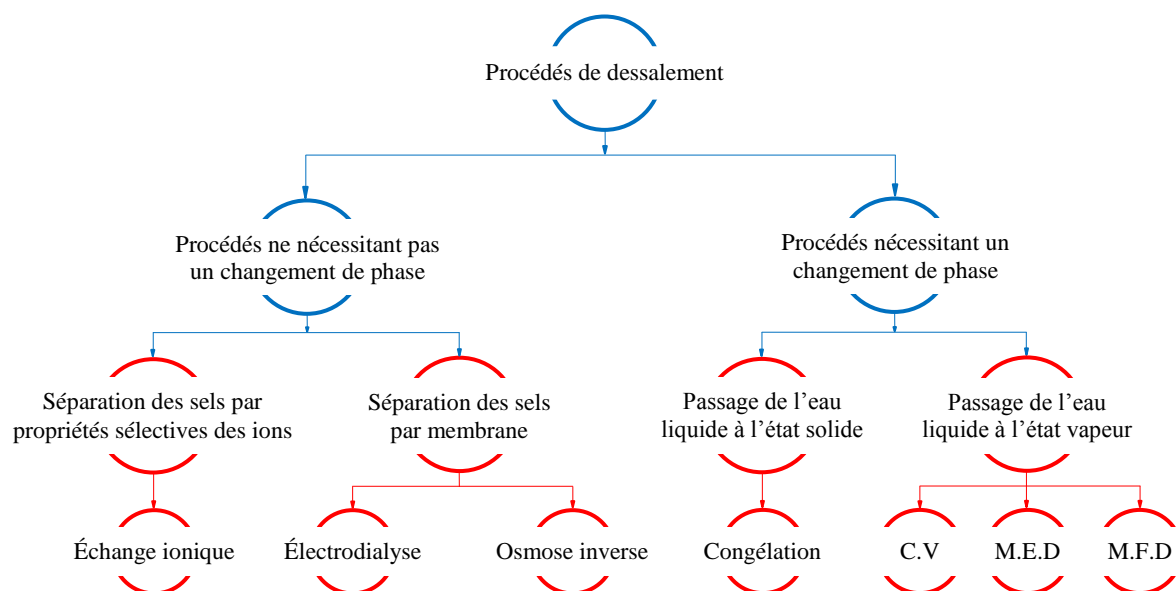


## I.2. Généralités sur les procédés de dessalement

Aujourd'hui, deux grandes techniques permettent de dessaler l'eau. La première est le dessalement thermique. Schématiquement, on fait bouillir de l'eau, on récupère la vapeur, on recondense la vapeur, et on obtient ainsi de l'eau débarrassée de ses sels. C'est une technique ancienne, qui s'est perfectionnée depuis maintenant 40–50 ans, avec notamment les techniques multiples effets type M.S.F (distillation multi flash (ou à détente successive)) ou M.E.D (distillation à effets multiples). La deuxième grande famille de techniques concerne le dessalement par membranes, de type « osmose inverse ».

Ce sont des membranes très fines, semi-perméables, au travers desquelles l'eau a naturellement tendance à passer avec un phénomène d'osmose lié à la différence de salinité. L'eau douce traverse la membrane et vient diluer la partie salée. En appliquant une pression sur la partie salée pour repousser l'eau douce de l'autre côté de la membrane, on contrarie le phénomène d'osmose naturelle en faisant de l'osmose inverse.

La **Fig. I.1** présente les principales techniques de dessalement. On citera notamment la distillation, l'osmose inverse, la congélation et l'électrodialyse. Cependant, les deux technologies utilisées actuellement, à l'échelle industrielle, sont celles basées sur la distillation et à l'osmose inverse.



**Fig. I.1.** Procédés de dessalement (Maalej et Bouguecha, 2002).

### *I.2.1. Procédés ne nécessitant pas un changement de phase*

#### *I.2.1.1. Séparation des sels par propriétés sélectives des ions*

- *Échange ionique*

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau, les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm). Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 8 et même 10 g/l.

#### *I.2.1.2. Séparation des sels par membrane*

##### *a. Électrodialyse*

Le terme « électrodialyse » désigne le transfert d'ions à travers des membranes sous l'effet d'un champ électrique. C'est un procédé à membrane très ancien puisque la première application date des années 1960. C'est pour faire face à des besoins en eau potable au Japon, en particulier, que l'électrodialyse a été développée en tant que procédé de dessalement de l'eau de mer à l'échelle industrielle. Ce procédé physique permet une réduction de l'impact environnemental par rapport aux autres procédés de production physico-chimiques, comme l'extraction liquide-liquide, la précipitation ou l'échange d'ions sur résine, plus polluants.

Les compartiments sont alimentés par une solution saline (généralement NaCl: Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>). Sous l'effet du courant, les cations de la solution saline se dirigent vers la cathode et les anions vers l'anode. Les membranes bleues sont perméables aux cations et les membranes vertes sont perméables aux anions. Dans chaque compartiment, il y aura donc augmentation (compartiment de concentration) ou diminution (compartiment de déminéralisation) de la concentration en ions. Et on obtiendra soit de l'eau douce soit de la saumure.

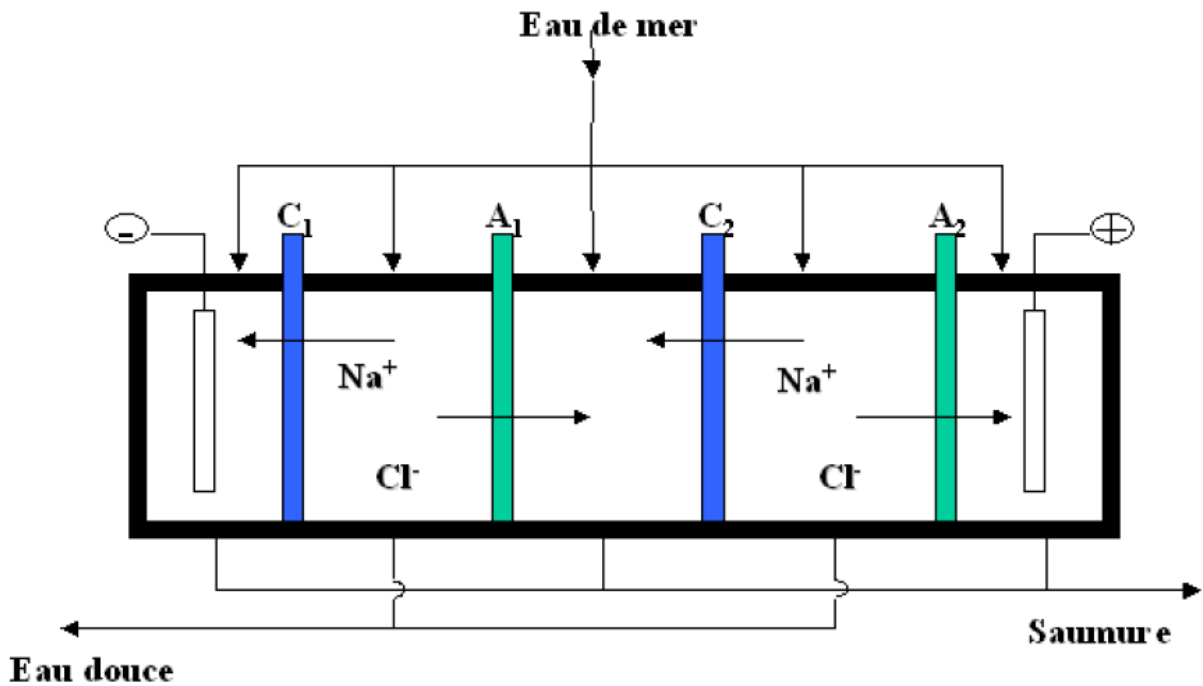


Fig. I.2. Électrodialyse (Sidem, 1997).

*b. Osmose inverse*

L'osmose inverse est un procédé de séparation membranaire à l'échelle moléculaire en phase liquide. La séparation s'opère par perméation à travers une membrane perméable sous l'action d'un gradient de pression. Elle se fait donc sur des critères physiques; il y a absence de produit chimique. Le procédé s'opère habituellement à température ambiante et est facilement automatisable et modulable : la surface de la membrane est adaptable.

L'osmose est un processus naturel : les espèces se déplacent du milieu dilué au milieu concentré (**Fig. I.3 vue de gauche**). Si une pression est appliquée au niveau du compartiment de la solution concentrée, le transfert entre les deux compartiments va diminuer jusqu'à s'annuler. **Quand le flux s'annule, la pression appliquée est appelée pression osmotique.** Si la pression appliquée devient supérieure à la pression osmotique, le flux s'inverse : les espèces se déplacent du milieu le plus concentré au milieu le moins concentré, c'est le phénomène d'**osmose inverse** (**Fig. I.3 vue de droite**).

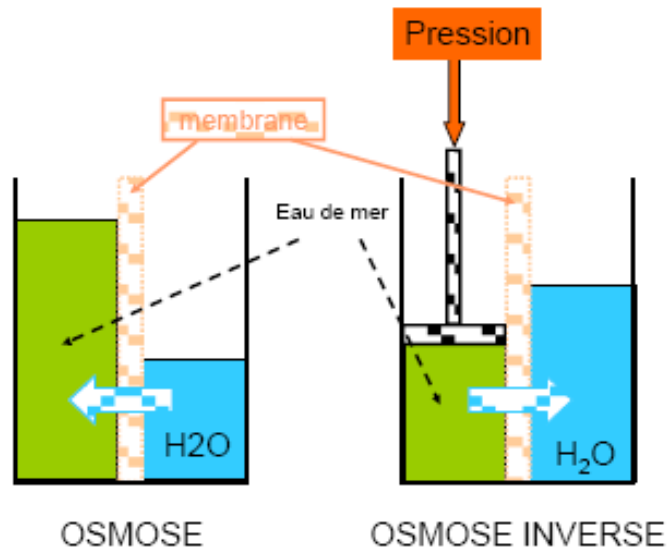


Fig. I.3. Procédé de l'osmose inverse (Henri, 2008).

## I.2.2. Procédés nécessitant un changement de phase

### I.2.2.1. Passage de l'eau liquide à l'état solide

- *Congélation*

Il est possible de dessaler l'eau par congélation. C'est un autre procédé de dessalement qui se base sur la différence entre les points de congélation de l'eau douce et de l'eau salée. Ce procédé est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau de mer est souvent inférieure à 0 °C. Lorsque la température est suffisamment basse, on remplit des bassins à des profondeurs allant de 1 à 1,5 cm. Les cristaux de glace sont séparés de la saumure, lavés du sel puis fondus (Tahri et al., 2010). Il existe trois étapes :

- ▶ La congélation partielle de l'eau à dessaler.
- ▶ La séparation des cristaux de glace et de la saumure.
- ▶ La fusion des cristaux de glace pour obtenir l'eau douce à l'état liquide.

Le dessalement peut se faire par congélation naturelle dans les régions où la température de l'air demeure suffisamment longtemps inférieure à la température de congélation de l'eau à traiter. Dans le cas échéant, une congélation artificielle est envisageable.

### 1.2.2.2. Passage de l'eau liquide à l'état vapeur

#### a. Compression de vapeur (C.V)

L'eau à traiter est vaporisée dans une enceinte isolée thermiquement et la vapeur produite est aspirée par un compresseur qui permet d'augmenter sa température jusqu'à la température de saturation. De là, la vapeur passe dans un faisceau tubulaire placé en bas de l'enceinte et se condense, provoquant l'évaporation de l'eau grâce à la chaleur de condensation. Un échangeur de chaleur à tubes concentriques permet de préchauffer l'eau salée à traiter et de refroidir la saumure et l'eau douce.

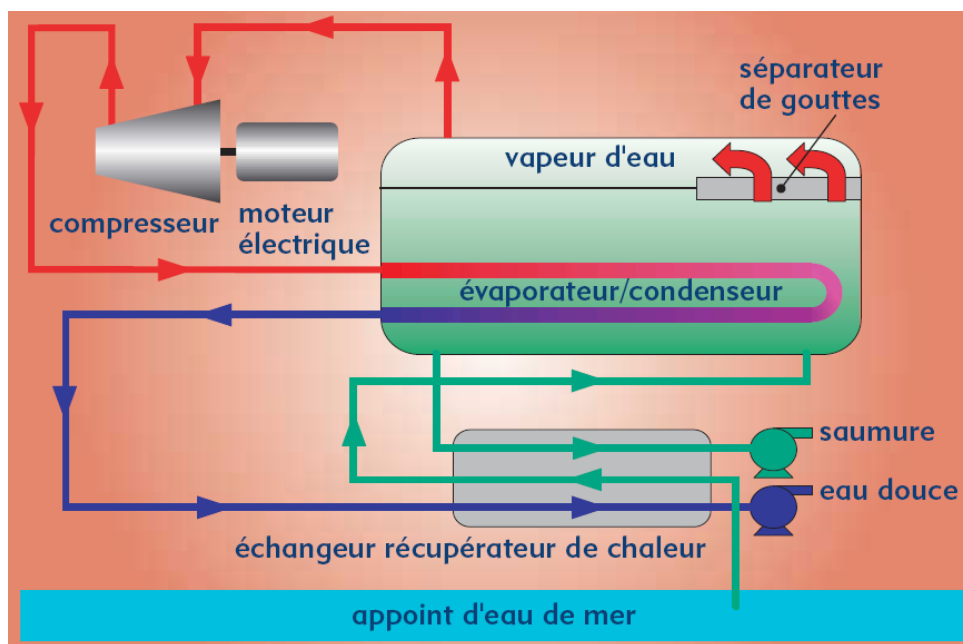


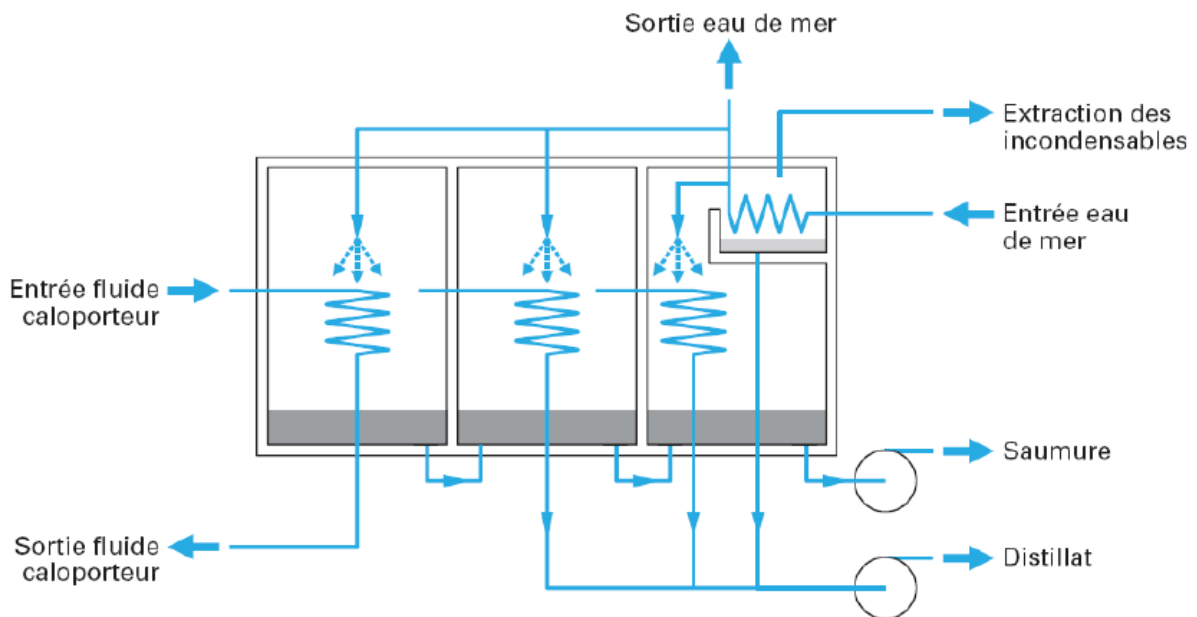
Fig. I.4. Procédé de compression de vapeur<sup>3</sup>.

#### b. Distillation à effets multiples (M.E.D)

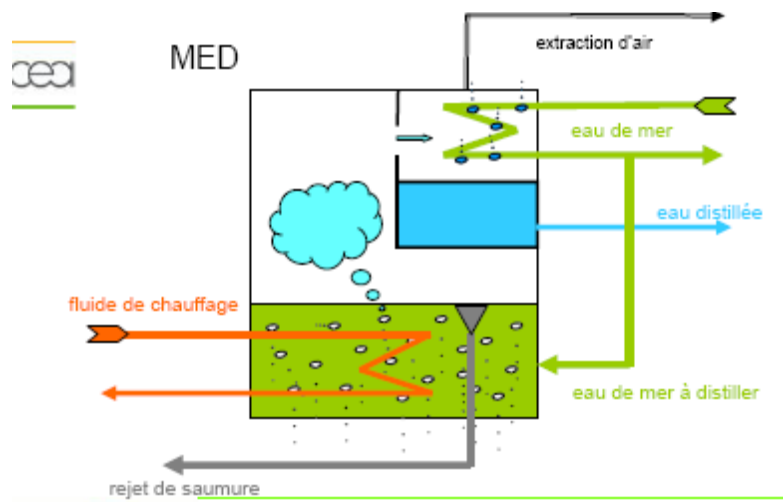
Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au procédé suivant (MSF), où elle est assurée par détente à travers les étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression

<sup>3</sup> Procédés thermiques de dessalement à haut rendement. Clefs CEA – N° 44 – Hiver 2000 – 2001

inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite (Tahri et al., 2010).



(a)



(b)

Fig. I.5. (a) Distillation à effets multiples (Danis, 2003), (b) détails (Henri, 2008).

c. Distillation multi flash (à détente successive) (M.S.F)

Ce procédé permet de diminuer les effets d'entartrage causés par la distillation à multiples effets par exemple. Voici le principe : l'eau s'échauffe dans les différents condenseurs de chaque étage avant d'être introduite dans un réchauffeur qui permet d'augmenter encore la température. L'eau chaude est conduite vers le bas du premier évaporateur où la pression est

inférieure à la pression de saturation c.à.d. vaporisation instantanée par détente appelée Flash

La vapeur produite se condense au contact du condenseur de l'étage concerné et le condensat (eau douce) est recueilli au sein de chaque étage. La température décroît depuis l'étage 1 jusqu'à n et par conséquent la pression, ceci permettant l'écoulement de l'eau entre les divers étages sans la nécessité d'utiliser des pompes.

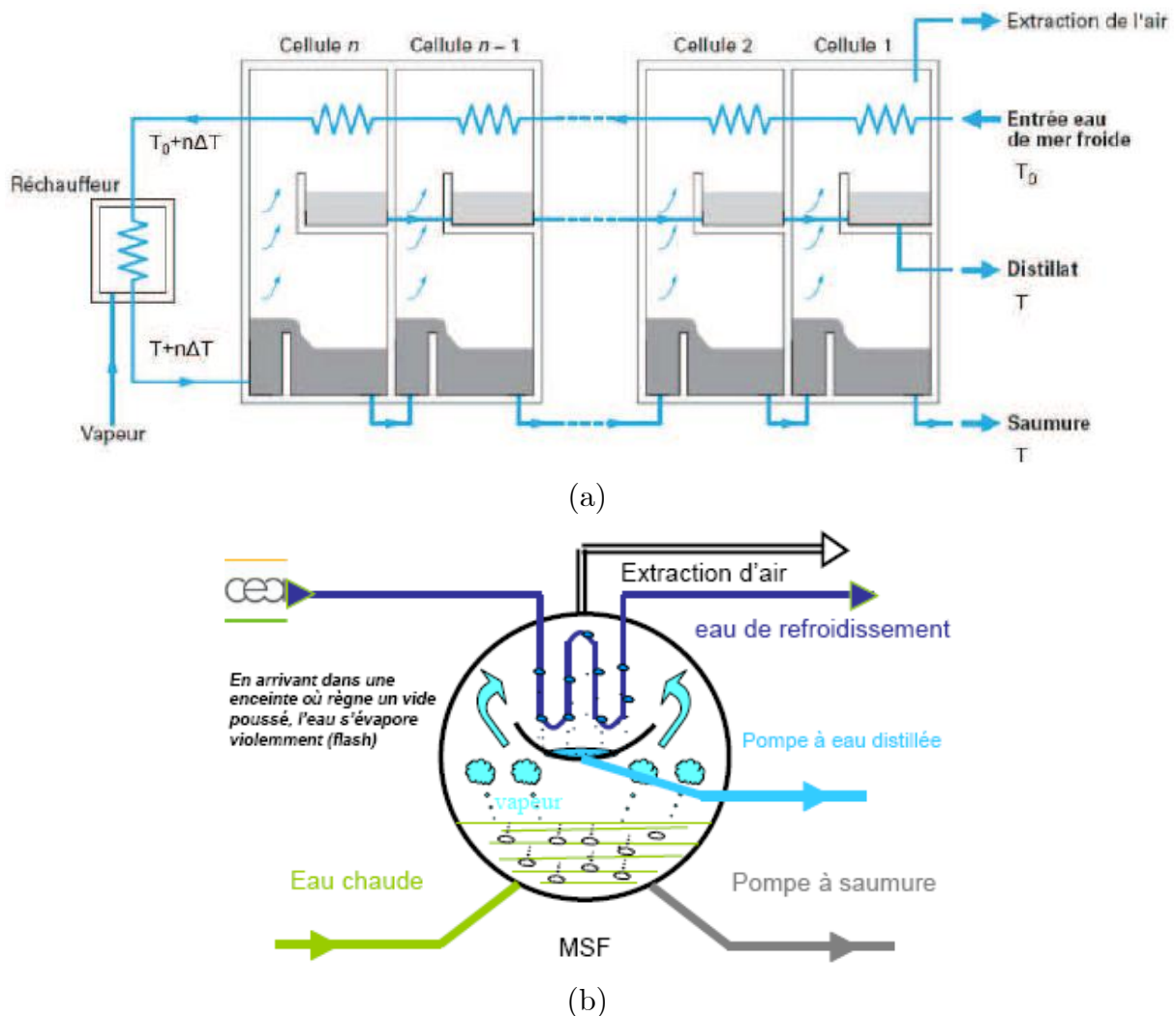


Fig. I.6. (a) Distillation à détente successive (Danis, 2003), (b) détails (Henri, 2008).

### I.3. Procédés de dessalement au moyen de l'énergie solaire

Il est remarqué que les procédés de dessalement déjà cités, notamment celles qui utilisent les méthodes de séparation des sels par membrane (procédés membranaires) et le passage de l'état liquide à l'état vapeur de l'eau ont été étudiés d'un coté où l'intégration avec une source d'énergie disponible et non polluante (c.à.d. utilisation de l'énergie solaire) faisant

l'objet de réduire la consommation gourmande d'énergie. À ce propos, des références ce sont intéressé à combiner des procédés de dessalement tels que l'osmose inverse, distillation à effets multiples et distillation à détente successive avec l'énergie solaire. Dans ce contexte, la référence récente d'**Ullah et Rasul (2018)** a exhibé une recherche bibliographique détaillée expliquant tous ces procédés. Les premières lignes de cet article ont présenté en chiffres, la situation d'accès aux ressources en eaux potables dans le monde entier basant sur des données réalistes disponibles via des sources assurées (organisations internationales) comme par exemples : UNEP, WHO et UNICEF<sup>4</sup>, puis, il continu d'exposer le rôle important joué par les procédés du dessalement dans certaines régions de ce globe notamment la région MENA<sup>5</sup> et les pays Golfs. Une partie cruciale dans cet article traite l'analyse de ce qu'on appelle l'interaction entre l'énergie et le dessalement d'eau. Dans ce dernier, il existe un impact substantiel de l'énergie associé par l'alimentation, le traitement et la distribution de l'eau. Tandis que, la production d'énergie exige une quantité substantielle d'eau. L'eau, l'énergie et le dessalement révèlent une interconnexion qui augmente avec l'inflation populaire. D'ailleurs, la variation des modes de consommation a encore potentiellement augmenté la demande des ressources en eau.

- *Procédés de dessalement à base des énergies renouvelables (énergie solaire)*

La majorité des technologies de dessalement exigeant une source d'énergie thermique ou électrique à base du solaire et donc il y avait des tendances vers les systèmes photovoltaïques et concentrateurs qui ont attiré l'intention des chercheurs autour du monde à cause de la déplétion de l'utilisation des énergies fossiles et leurs effets hasardeux sur l'environnement. Alors, les mécanismes de dessalement peuvent être résumés et classés comme suit :

- Les méthodes de distillation qui a pour but de chauffer l'eau jusqu'au point d'ébullition, de condenser la vapeur collectée et produire de l'eau pure : distillation multi flash, distillation multi effet, et à compression de vapeur.
- Les méthodes membranaires, à savoir l'osmose inverse, l'électrodialyse, l'électrodialyse inverse ont le but de faire forcer l'eau saline à travers une membrane semi-perméable qui

---

<sup>4</sup> UNEP : United Nations Environmental Programme ; WHO : World Health Organization ; UNICEF : United Nations International Children's Emergency Fund.

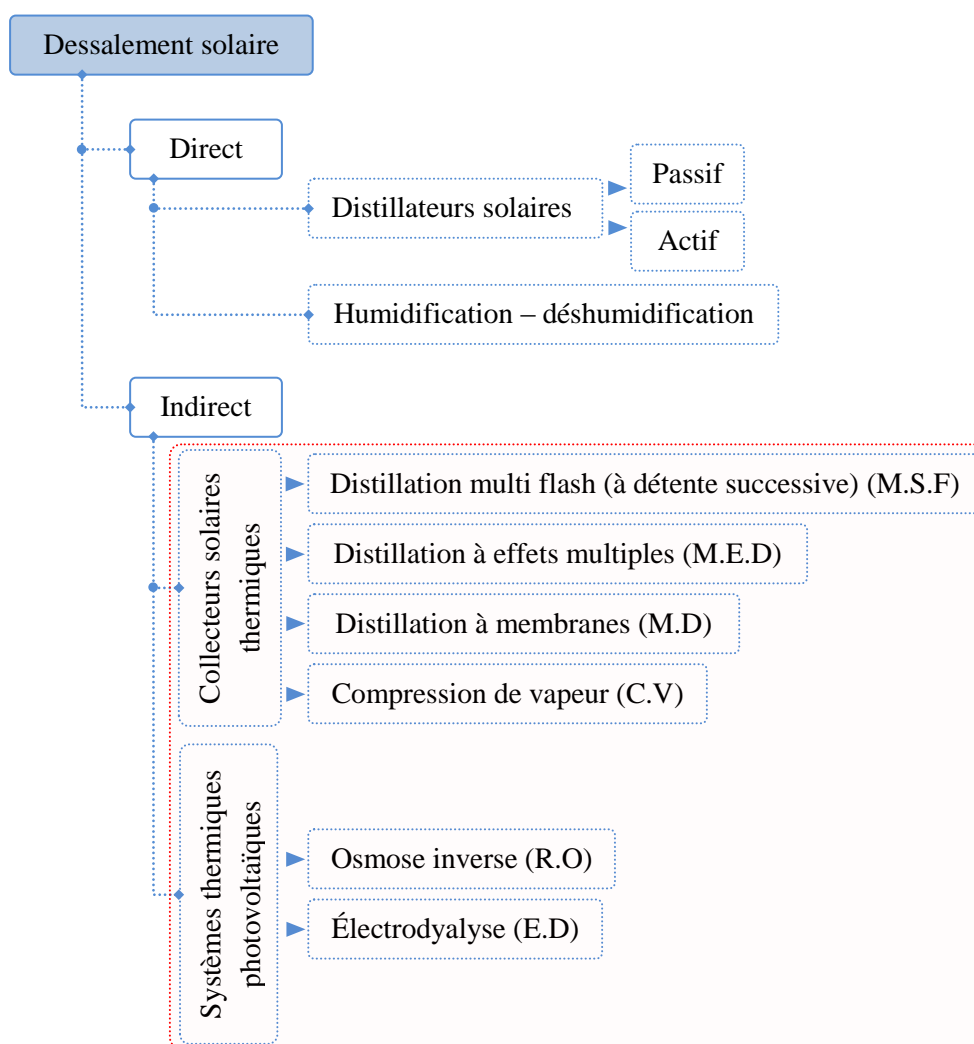
<sup>5</sup> Représente particulièrement les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord.



enlève les sels de l'eau, tout en gardant l'eau à fort sels d'une part et l'eau distillée dans l'autre part.

- D'autres méthodes alternatives, à savoir la congélation et l'échange ionique.

Les méthodes précédentes intégrées à une source d'énergie solaire ou encore appelées les *méthodes indirectes* peuvent être subdivisées en deux grandes catégories, à savoir celles qui utilisent des collecteurs solaires (distillation multi flash, distillation multi effet, compression de vapeur et distillation à membrane) comme source de chaleur, tandis que, les procédés osmose inverse et électrodialyse sont généralement couplés avec des systèmes thermiques photovoltaïques (**Fig. I.7**).



**Fig. I.7.** Procèdes de dessalement au moyen de l'énergie solaire (Ali et al., 2011).

#### **I.4. Impact de dessalement sur l'aspect environnemental**

**Lahouel et Lahouel (2015)** ont énuméré les impacts environnementaux dus à des usines de dessalement sur la base de plusieurs facteurs parmi lesquels ceux qui sont liés à la phase de construction et celle d'exploitation.

##### *I.4.1. Impact positif*

- La conservation des ressources d'eau souterraines.
- Source fiable à longue durée assurant une bonne qualité de l'eau.

*I.4.2. Impact négatif.* Dans ce cas, il est constaté que la désalinisation de l'eau de mer ou de souterrain a des impacts négatifs direct et indirect :

- Impact sur l'environnement marin (due à l'utilisation des produits chimiques aidant dans le nettoyage en prétraitement).
- Impact de bruit.
- Effet nuisible sur l'utilisation de la terre.
- Impact sur la couche aquifère.
- Impact de la caléfaction.

#### **1.5. Distillation solaire**

Le procédé de dessalement implique le mécanisme basant sur l'extraction des sels et de minéraux d'une façon effective des eaux saumâtres et salées tout en appliquant des moyens simples et disponibles. En effet, l'intégration de dessalement avec les énergies renouvelables dont le principe d'utiliser une source d'énergie solaire non polluante, représente une stratégie efficace que l'on peut investir. Son contexte principal (c.à.d. la distillation à base d'énergie solaire) est basé sur l'échauffement d'eau saline directement à l'aide du rayonnement solaire dans une enceinte solide renfermée d'une couverture transparente. L'eau se chauffe à l'intérieur de l'enceinte et la vapeur d'eau se produit après se condense (connu par le changement de phase) sur la face intérieure de la couverture. Ensuite, le condensat formé est recueilli sur des gouttières. En général, le changement de phase peut se faire par le procédé de chauffage ainsi que par réduction de pression où l'eau saline se transforme en état de vapeur et l'eau distillée est après obtenue par condensation.

---

## Chapitre II

# Synthèse bibliographique

---

*Résumé :*

**C**e chapitre rapporte d'une façon concise les nouvelles techniques et types de distillateurs solaires en se basant sur des articles récemment publiés. Une attention particulière est accordée à la présentation des principaux designs connus destinés à la distillation solaire. Suivi des dernières données de quelques nouvelles configurations. Un aperçu sur le rôle de la nanotechnologie dans ce domaine est présenté avec quelques détails dans la partie **Annexe 2**.

## II.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les connaissances générales relatives aux mécanismes destinés au processus de dessalement à énergie solaire, au point de vue conception et fonctionnement. En outre, on s'intéresse en particulier à la présentation des travaux récents en relation avec les systèmes à petite et grande échelle, fonctionnant en mode actif et passif. Selon ces travaux, on s'attache également à décrire l'influence de plusieurs paramètres sur la performance de ces applications solaires tels que la géométrie, les conditions climatiques (l'intensité du rayonnement solaire, température ambiante, ...), etc. Le rôle de la nanotechnologie dans le domaine du dessalement solaire est aussi discuté.

## II.2. Mécanismes destinés au processus du dessalement solaire (Distillateurs solaires)

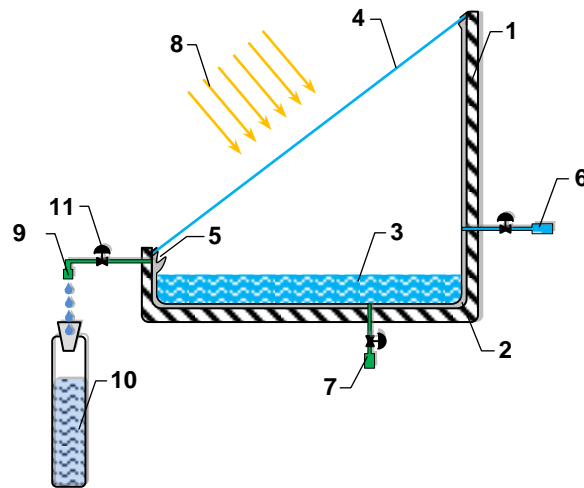
Il existe plusieurs types de distillateurs solaires. Ils peuvent être différents, en terme de conception (*forme géométrique*) et en terme de matériaux utilisés, mais ils utilisent tous le même principe et servant aux mêmes fonctions. La littérature rapporte qu'il existe deux types de distillateurs solaires essentiels, à savoir :

### II.2.1. Distillateur à simple effet

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu est le distillateur de type bassin, il existe plusieurs modèles de ce type.

#### a. Distillateur à pente unique (*simple pente*)

Dans la boîte (ou cavité) solaire (**Fig. II.1**), l'eau saline (**3**) est ajoutée manuellement (**6**) ou de manière automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire (**8**) traversant la vitre supérieure (**4**) de la boîte, chauffe l'eau (**3**) jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau produite se condense sur la vitre relativement plus froide. Celle-ci, en pente légère (inclinaison de la vitre), conduit l'eau distillée vers un canal de collection de distillat (**5**) et puis vers un récipient (ou un réservoir) de stockage (**10**).

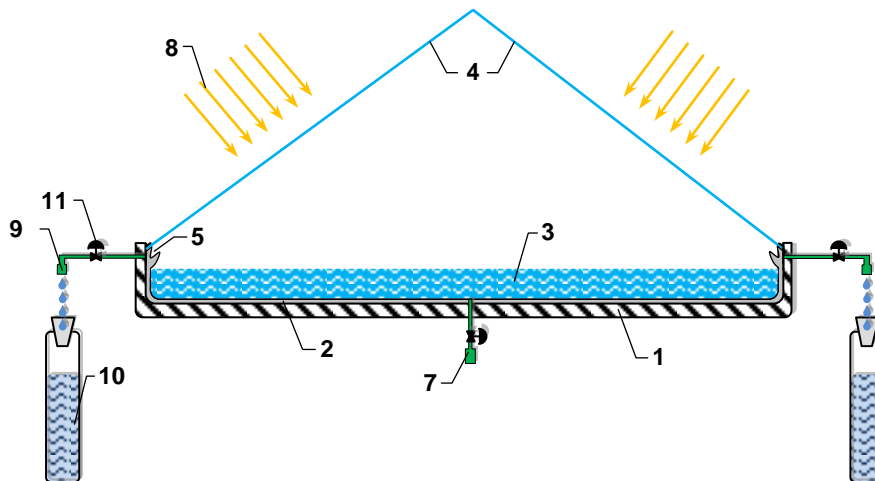


1 : Couche d'isolation, 2 : Bassin, 3 : L'eau saline, 4 : Couverture transparente, 5 : collection, 6 : Alimentation, 7 : Drainage, 8 : Radiation solaire, 9 : Conduite de collection du distillat, 10 : Réservoir, 11 : Valve.

Fig. II.1. Distillateur à simple pente.

*b. Distillateur solaire à double pente*

Le distillateur solaire à double pente (Fig. II.2) est une extension du distillateur solaire à pente unique. C'est un distillateur à double capteurs (ou double vitrage) où chacun d'eux est incliné d'un angle quelconque, son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation. Il est important de noter que les éléments constituant le distillateur solaire à double pente sont les mêmes que ceux représentés dans le cas d'un distillateur solaire à simple pente.



*N.B. : L'élément 6 n'est pas apparu dans le schéma à cause de la coupe imaginaire. L'élément 6 représente la conduite d'alimentation du système en eau saline.*

Fig. II.2. Distillateur solaire à double pente.

### *II.2.2. Distillateur à effet multiple*

Contrairement au distillateur simple (à simple ou à double vitrage) décrit précédemment, le système de distillation à étages multiples se compose de deux unités essentielles : la source de chaleur alimentant le système (un capteur solaire ou autre source) et l'unité de distillation. Le distillateur est basé sur la construction d'un bâti constitué de plusieurs bassins contenant de l'eau saline, superposés les uns sur les autres et qu'on qualifie d'étages (les détails sur la composition et le fonctionnement de ce type de systèmes sont fournis dans le **Chapitre III**).

### *II.2.3. Autres types*

#### *a. Distillateurs sphérique, hémisphérique et semi sphérique*

La couverture constituant ces types de distillateurs peut prendre la forme sphérique, hémisphérique ou semi sphérique d'un matériau plastique transparent ou autre. Le principe de construction de ces systèmes est le même que celui des autres systèmes de distillation prismatiques. Tandis que, le système en forme sphérique peut avoir un système mécanique de récupération du condensat en utilisant un essuie-glace par l'intermédiaire d'un moteur électrique.

#### *b. Distillateur solaire incliné à cascades*

Ce système représente la même forme que celle d'un distillateur solaire à simple pente, tandis que le bassin est un peu modifié en insérant plusieurs bassins cascades.

#### *c. Distillateur solaire incliné à mèche*

Ce modèle de distillateurs à mèche est plus efficace que les distillateurs à bassin et quelques conceptions sont prétendues coûter moins qu'un distillateur à bassin de même rendement. L'appareil incliné à mèche permet de maintenir à peu près constante l'épaisseur de la lame d'eau.

#### *d. Distillateur solaire à film capillaire*

Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de la même paroi.

### II.3. Travaux scientifiques

De nombreux nouveaux modèles (configurations) de distillation solaire ont été menés récemment. L'objectif des sous-sections II.3.1 et II.3.2 est d'illustrer quelques données utiles sur des types de distillateurs solaires à petite et à grande échelles fonctionnant en mode passif et actif.

#### *II.3.1. Système de distillation solaire à petite échelle en modes passif et actif*

L'étude paramétrique de **Pal et Rahul (2018)** a pour but d'analyser la performance d'un distillateur solaire à simple pente expérimentalement. Le système consiste d'un bassin de  $1 \text{ m}^2$  avec des surfaces transparentes (c.à.d. la surface frontale et ainsi que les deux autres cotés, tandis que la surface en arrière étant opaque). La hauteur du côté frontal est de 0,12 m tandis que la hauteur de l'arrière plan est de 0,587 m. La surface transparente (ou surface de condensation) ayant  $0,103 \text{ m} \times 0,103 \text{ m}$  avec une épaisseur de 0,004 m et inclinée de  $20^\circ$  suivant latitude. Les modifications introduites sur ce système (c.à.d. seules les surfaces frontale et ainsi que les deux autres cotés sont transparentes) rapportent une augmentation de la performance. Les résultats indiquent que le système fabriqué peut produire  $3200 \text{ ml/m}^2/\text{j}$  et  $2756 \text{ ml/m}^2/\text{j}$  à des profondeurs d'eau de 1 et 2 cm, respectivement c.à.d. 14 % d'augmentation en distillat.

**Bani-Hani et al. (2017)** ont amélioré la performance d'un système de dessalement solaire en introduisant des modifications, à savoir un dispositif de refroidissement et un autre de préchauffage. Le dispositif de refroidissement est un ventilateur qui refroidi la surface de condensation externe de l'unité de distillation a pour améliorer le taux de condensation des vapeurs, tandis que l'autre est un collecteur solaire plat couplé à un échangeur de chaleur dans lequel l'huile se circule. Il fallait mentionner que le ventilateur est alimenté à l'aide d'un petit système photovoltaïque externe. Les mesures expérimentales rapportent les données de températures dans différentes zones du système et autres concernant les données climatiques. Les auteurs ont observé que le système actif produit 3, 10 et 50 % du distillat par application du moyen de refroidissement, huile préchauffée et par combinaison des deux procédures précédentes, respectivement.

Une investigation expérimentale menée par **Narayana et Raju (2018)** dont le but est de comparer la capacité de production du condensat de deux systèmes de distillation solaires similaires en conception et en forme (distillateurs solaires ayant une seule pente). En

revanche, le deuxième système a été combiné avec un collecteur solaire plat. Les expériences ont été menées à l'air libre sous les conditions climatiques côtières de Kakinada ( $16^{\circ}93'N$ ,  $83^{\circ}33'E$ ), Andhra Pradesh, en Inde. Le système sous test est constitué d'une vitre inclinée de  $30^{\circ}$  et d'un bassin de  $1\text{ m}^2$ . Le collecteur solaire est de  $2\text{ m}^2$  de surface effective. Les résultats révèlent que  $0,04\text{ m}$  de couche d'eau dans le bassin représente la valeur optimale. En outre, il est observé que le débit d'eau et la variation du coefficient de transfert de chaleur intérieur ont un effet clair sur la productivité du système. Le système actif montre une production maximale à  $0,04\text{ m}$  et  $1,5\text{ l/mn}$  de profondeur d'eau et de débit, respectivement c.à.d.  $57,55\%$  d'amélioration constatée.

**Munisamy et al. (2017)** ont expérimentalement étudié un distillateur solaire de forme mèche incliné de  $30^{\circ}$ . Les dimensions du système sont  $1,25 \times 0,8 \times 0,125\text{ m}^3$  et d'une épaisseur de  $3\text{ mm}$ . La cavité solaire est fermée par une couverture transparente de  $5\text{ mm}$  épaisseur. Les essais ont été faits à Coimbatore ( $11,1018^{\circ}N$ ,  $76,9664^{\circ}E$ ), Tamil Nadu, en Inde, durant la période de Janvier–Février 2016. L'effet des matériaux utilisés sur la surface absorbante du système a été analysé. Couvrant le bassin du système par un tissu en fourrure augmente la production jusqu'au  $3,63\text{ l/j}$  avec une réduction de la salinité d'eau. En addition, l'étude recommande que les fuites sur les cotés de la surface transparente et son nettoyage jouent un rôle vital dans l'amélioration de la performance du système.

Le groupe **Belyayev et al. (2018)** a étudié numériquement un système de distillation solaire actif composé d'une cavité solaire solide couplé avec une pompe à chaleur. Pour cet objectif, l'unité de distillation est une cavité de  $1\text{ m}^2$  de bassin et sous lequel une couche d'un matériau de stockage d'énergie thermique a été incorporée avec le bassin. La pompe utilisée absorbe la chaleur latente cédée durant la condensation de la vapeur d'eau à l'aide l'évaporation du réfrigérant R134a dans les tubes évaporateurs. Le rôle général du mécanisme de la pompe est d'augmenter la température de l'eau dans le distillateur. L'autre mécanisme de stockage d'énergie thermique a pour but de maintenir la température d'eau élevée même durant les heures du couché de soleil. Les simulations numériques ont été faites sous les conditions climatiques d'un village de Fort Sherchenko, Kazakhstan. L'étude a conclu que le système peut produire une quantité importante d'eau pure durant les mois d'été. En addition, la combinaison du distillateur solaire avec la pompe et le mécanisme de stockage d'énergie a amélioré significativement son efficacité.



L'effet de refroidissement de la surface de condensation d'un système de distillation incliné sous les conditions climatiques de Riyadh, l'Arabie Saoudite a été étudié numériquement et expérimentalement par **Agboola et Al-Mutaz (2017)**. Le système fabriqué est constitué d'un bassin de dimensions  $1,1 \text{ m} \times 0,9 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ . Le bassin d'épaisseur  $0,04 \text{ m}$  est placé dans une cavité en bois considérée comme le cadre extérieur de  $30 \text{ mm}$  d'épaisseur a pour but de réduire les pertes thermiques vers l'extérieur. Une couche de glass couvre le système est de  $6 \text{ mm}$  et l'ensemble est incliné de  $24^\circ$  suivant la latitude de Riyadh. Pour augmenter la performance du système en addition à la technique précédente, une autre technique a été considérée comme la couverture transparente partiellement ombrée. La production du design s'augmente de  $10,77 \%$  en utilisant la couverture transparente partiellement ombrée.

**Zarzoum et al. (2017)** ont étudié un nouveau système de distillation actif sous les conditions climatiques de Sfax, Tunisie. Le design expérimental suggestionné consiste d'une unité de distillation solaire couplée avec un condenseur, un chauffe-eau solaire et un humidificateur pour améliorer la production de l'eau fraîche. L'étude consiste à l'application de l'outil numérique en comparant les résultats obtenus avec les expérimentations.

**Ghazy et Fath (2016)** ont combiné un distillateur solaire à une seule pente avec un système humidificateur-déshumidificateur. Le distillateur solaire est une cavité constituée d'un bassin de  $1 \text{ m}^2$  de surface et isolée à l'aide d'une couche en glass de  $5 \text{ mm}$  d'épaisseur et refermé d'une couverture en glass de  $3 \text{ mm}$  d'épaisseur et inclinée de  $30^\circ$ . Le but essentiel de cette investigation est la récupération de l'énergie perdue vers l'ambiance, entre temps l'augmentation de la performance du système. L'influence des paramètres climatiques a été examinée. L'étude a conclu que le système modifié montre que son efficacité et sa production sont estimés de  $1,5$  fois plus grand qu'un distillateur solaire simple.

L'objectif de l'étude expérimentale d'**Issa et Chang (2017)** est de comparer les performances d'un distillateur solaire à une seule pente avec celui couplé avec un collecteur solaire tubulaire de type évacué sous les conditions climatique de l'Ouest de Texas. L'ensemble est constitué d'un bassin de  $0,85 \times 0,85 \text{ m}$  de surface et d'une couverture inclinée de  $30^\circ$  en plexiglas. Basant sur la valeur d'inclinaison de la couverture, la réception d'un optimum de radiation solaire a été estimée de  $70 \%$ . Les résultats obtenus montrent que la production journalière maximale des systèmes passif et actif est de  $1,4$  et  $3,6 \text{ kg/m}^2$ , respectivement. En outre, la température de l'eau est augmentée de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  après les modifications.

**Joy et al. (2017)** ont étudié la performance d'un distillateur solaire couplé avec un souffleur d'air. L'idée de ce travail expérimental consiste à la création d'un effet de bulles d'air à l'intérieur du système qui à son tour aide à augmenter le taux d'évaporation. Les vapeurs se condensent sur la face intérieure de la surface transparente inclinée et tombent via des collecteurs de condensat. Il est conclu que l'intégration de l'unité de distillation avec un souffleur d'air permet d'augmenter son efficacité énergétique (65 %) et sa production (de 5 à 7 litres d'eau pure).

**Hidouri et al. (2017)** ont évalué et comparé les performances d'un distillateur solaire ayant une seule pente intégré à une pompe à chaleur, à un simple distillateur, sur la base des prédictions numériques et expérimentales. La simulation numérique a permis de comparer les résultats des modèles théoriques. Selon l'étude, les modèles théoriques n'étaient pas en concordance aux résultats expérimentaux, à l'exception de model de Lewis. Les résultats montrent aussi que le système actif a une production plus grande que celle atteinte par le système passif.

Le système proposé par **Manchanda et al. (2018)** est une unité de distillation multifonctions. Elle est destinée à la production de distillat et en même temps au séchage des produits végétaux (Gingembre). À ce propos, les auteurs ont construit un distillateur solaire composé d'un bassin de dimensions  $0,7 \times 0,35 \times 0,15 \text{ m}^3$  (les même dimensions que l'unité de séchage). Pour éviter les pertes de chaleur de système, une couche d'isolation de 5 mm a entouré la base et les cotés du boîtier. En effet, le boîtier est partagé entre l'unité de distillation et celle de séchage au moyen d'une plaque de 5 mm d'épaisseur. À un débit de 50 ml/mn, l'unité peut produire une quantité moyenne de distillat de  $2,36 \text{ l/m}^2$ . L'efficacité énergétique et exergétique étaient de 19 et 0,9 %, respectivement.

**Nasri et al. (2018)** ont utilisé des matériaux locaux dans la construction d'un système de dessalement solaire. Le système proposé est une cavité trapézoïdale de  $0,25 \text{ m}^2$  de couverture transparente et inclinée de  $10^\circ$  et orienté vers le sud pour une grande réception de la radiation solaire. Une couche d'isolation de 4 cm est utilisée pour éviter les déperditions thermiques du système. Les expériences ont été faites à Adrar (sud-ouest) ( $27^\circ 53' \text{N}$ ,  $0^\circ 16' \text{W}$ ), Algérie. La production constatée est 4,04 et 4,48  $\text{l/m}^2$ .

L'utilisation de tissu comme matériau additionnel pour améliorer la production d'un système de distillation solaire était le but principal de l'investigation expérimentale de **Suneesh et al. (2017)**. Le système construit est une cavité ayant une forme de 'V' avec une

base de surface totale égale à  $1,5 \text{ m}^2$ . Les cotés et la base du système sont en noir pour augmenter l'absorption de la radiation solaire. La couverture est inclinée de  $18^\circ$ . Le système est ainsi équipé des appareils de mesures comme le pyranomètre et thermocouples pour mesurer la radiation solaire et les températures dans différentes zones de l'unité. L'effet de l'inclinaison de la base du système recouverte complètement/partiellement par un tissu est analysé. Il est conclu que le recouvrement partiel de la base inclinée de  $25^\circ$  (cas optimal) du système révèle une bonne performance ( $3,640 \text{ ml/m}^2$  de distillat plus grande que la base complètement recouverte).

**Murugesan et al. (2017)** ont fabriqué et testé un distillateur solaire incliné ayant un bassin de  $0,423 \text{ m}^2$  de surface égale à celle de la surface transparente. Le bassin est muni des plaques métalliques positionnées alternativement sur ses cotés. Ces plaques permettent d'augmenter la surface d'échange et par conséquent une augmentation considérable de la température de l'eau. Les tests ont été faits en mois d'été à Chennai, en Inde. À  $0,0833 \text{ kg/mn}$ , le système peut produire une quantité journalière de distillat de  $3,50 \text{ kg/m}^2$ .

Une étude numérique proposée par **Abu-Arabi et al. (2018)** a pour but d'examiner l'effet de l'ajout d'un milieu de stockage d'énergie et un collecteur solaire plat. Le système choisi est un distillateur solaire à une seule pente couplé avec un collecteur solaire plat de  $2,5 \text{ m}^2$ . Le milieu de stockage d'énergie de forme de tubes a été placé sous le bassin d'eau. Un échangeur de chaleur serpentin est placé dans l'eau de bassin pour augmenter sa température. Aussi, le système est muni de réservoir destiné à la collection des condensats et une caméra pour contrôler la quantité de distillat produite. L'étude est entièrement basée sur une investigation théorique c.à.d. présentation des bilans énergétiques de l'unité sous forme de flux de chaleur et de masse. Il est abouti que l'incorporation d'une grande masse du milieu de stockage d'énergie a les effets suivants : (1) l'augmentation de sa masse réduit significativement la productivité du système. (2) l'augmentation de sa masse augmente la température de l'eau sur une longue durée. La réduction du coefficient du transfert de chaleur par convection augmente la production par plus de 100 %. L'effet du refroidissement de la surface de condensation est l'autre a été étudié. Il est conclu que l'augmentation de débit d'eau de  $0,01$  à  $0,1 \text{ kg/s}$  refroidissant la surface de condensation inclinée, enregistre un pourcentage de 37 % d'accroissement en distillat. En plus, des résultats expérimentaux de la même investigation ont été menés par **Al-harahsheh et al. (2018)**.

**Cheng et al. (2018)** ont réalisé un système de distillation de forme pyramide dont les dimensions sont  $60 \times 60 \times 10 \text{ cm}^3$  et d'épaisseur de 1 mm de bassin. La couverture pyramidale est de 3 mm d'épaisseur et inclinée de  $32^\circ$ . Un autre système similaire au premier est incorporé avec un milieu de stockage d'énergie dont le but est de comparer leur performance. Les deux systèmes sont alimentés en eau saline jusqu'à une profondeur de 2 cm. L'étude a aussi fourni un outil théorique pour plus de compréhension. Les résultats expérimentaux ont démontré que le système modifié a une capacité de production de  $3,41 \text{ kg/m}^2$  plus grande que le système simple. La conductivité thermique du milieu de stockage d'énergie joue un rôle important, de sorte qu'augmenter sa conductivité de 0,2 à  $4 \text{ W/m K}$  améliore la production de 42 à 53 %.

**Dhindsa et Mittal (2018)** ont développé un système de distillation solaire vertical à effet multiple couplé à un bassin solaire trapézoïdal muni d'un échangeur de chaleur et des miroirs de réflexion. Le distillateur solaire est composé d'un bassin et fermé de doubles couches transparentes. Le fait d'adopter cette méthode (c.à.d. double couverture) est de réduire les pertes d'énergie de sorte que la plupart de l'énergie thermique du bassin est transférée vers la section de dessalement multi-effet dont le but est le recyclage d'énergie pour plus de production de distillat. Dans la section verticale où se trouve l'arrangement multi-effet, la distance entre chaque plaque verticale est mesurée de 10 mm. La performance du système modifié est comparée avec un système simple sous les mêmes conditions climatiques. L'efficacité énergétique des systèmes modifié et conventionnel atteint 80,29 et 59,6 %, respectivement.

**Bouzaid et al. (2019)** ont proposé un système de distillation solaire de type cascade ayant une nouvelle configuration. Le mécanisme possède un bassin cascadié, chaque sous bassin prend alternativement une position inclinée ou horizontale et aussi muni des rainures. La couverture transparente du système est inclinée de  $30^\circ$ , cependant les bassins sont inclinés de  $35^\circ$ . Selon l'étude, l'effet des rainures sur les plateaux réside dans la minimisation de la vitesse de l'eau dans le bassin. Les calculs numériques ont été menés sous les conditions de Rabat ( $34^\circ 01' \text{N}$ ,  $6^\circ 49' \text{W}$ ), Maroc. Les résultats obtenus montrent que la production maximale du système proposé est de  $1,6 \text{ kg/m}^2$  correspondante à une intensité radiative de  $900 \text{ W/m}^2$ .

Une nouvelle configuration d'un distillateur solaire tubulaire vertical a fait l'objet de l'investigation expérimentale de **Hou et al. (2018)**. Cette conception est basée sur deux cylindres concentriques dont l'espace annulaire entre eux est de 0,03 m. Le cylindre extérieur

mesure 0,98 m de longueur et 0,16 m de diamètre, tandis que le deuxième cylindre est de 0,97 m de longueur et de diamètre de 0,10 m. Les surfaces d'évaporation et de condensation sont respectivement 0,295 et 0,478 m<sup>2</sup>. Les résultats de cette investigation démontrent que la production du système est de 23,9 % quand la pression dans la chambre de distillation est diminuée de 25 kPa. En addition, un autre facteur a aidé dans l'amélioration de la performance de l'unité de dessalement quand la vitesse d'air ambiant est doublée et qui révèle une augmentation de ~ 17 %.

L'étude expérimentale menée par **Jamil et Akhtar (2017)** consiste à l'évaluation de la production d'un distillateur solaire à simple pente en jouant sur son design. Pour cet objectif, le système a un bassin en plaque galvanisée de 1 m<sup>2</sup>. Les pertes thermiques ont été minimisées tout en protégeant le système par une couche d'isolation disponible dans le marché. La couverture transparente est de 5 mm renfermant le côté supérieur de la cavité solaire et inclinée de 28° (à peu près latitude du lieu d'Aligarh Muslim University, Aligarh (27,89°N, 78,08°E), en Inde). Comme déjà cité, l'étude paramétrique consiste à la variation de la valeur de la hauteur spécifique de système c.à.d.  $H_s = (H_r + H_l)/2$  où le  $H_r$  et  $H_l$  sont les hauteurs longitudinaux frontal et arrière du système. Il est conclu qu'une augmentation de la production de 1,341 à 4,186 l/m<sup>2</sup> tout en diminuant le  $H_s$ . Similairement, l'efficacité du système a été augmentée de 11,25 à 39,59 %, en considérant le même cas étudié de la hauteur  $H_s$ .

**Muftah et al. (2018)** ont amélioré le fonctionnement d'un distillateur solaire à bassin cascadié à l'aide de la création d'un compartiment (condenseur) à l'un des ses côtés destiné pour plus de condensation de vapeurs. Ce compartiment a été aussi testé sous l'effet d'ombrage. En outre, parmi les modifications introduites sur système, des réflecteurs sont placés sur son côté le plus haut et chaque bassin en cascade possède des ailettes. Le bâti du système conventionnel se compose d'un bassin de forme étagé de 1 m<sup>2</sup> de superficie, chaque sous bassin (nombre de sous bassin : 5) est de 0,1 m × 2 m × 120 mm. La couverture utilisée pour fermer le haut du bassin est de 3 mm d'épaisseur. Le système est isolé en utilisant une couche d'isolation de 4 cm. L'étude réalisée est purement théorique basant sur des bilans énergétiques de chaque partie de systèmes proposés. Le model théorique traite plusieurs paramètres pour aboutir à l'interprétation des différences de capacités entre ces systèmes. Les résultats montrent qu'après les modifications, la production du système est augmentée de 6,9 à 8,9 kg/m<sup>2</sup>, ce qui implique une augmentation de 29 %.

L'approche expérimentale de **Hansen et Murugavel (2017)** consiste à l'intégration des distillateurs solaires dont l'objectif est d'augmenter la production en eau pure. Deux systèmes de distillation solaire complètement différents, à savoir un distillateur solaire à simple pente et un autre incliné ont été combinés. Le 1<sup>er</sup> système est une cavité trapézoïdale dont le bassin est de forme plat et fabriqué de l'acier doux de dimensions  $0,6 \times 0,5 \times 0,15$  m. Une couverture transparente a été mise sur la surface ouverte du système dont la superficie est de  $0,3 \text{ m}^2$ . Concernant le 2<sup>ème</sup> système, est une cavité cubique dont les dimensions sont  $1 \times 1 \times 0,15 \text{ m}^3$ . Son bassin est de même nature que celui du précédent, cependant, trois configurations ont été choisies, à savoir de forme plate, rainurée et ailetée. La couverture de ce système est de  $1 \text{ m}^2$ . L'alimentation est contrôlée à l'aide de valves manuelles. Les tests expérimentaux ont été faits sous des conditions climatiques actuelles. Le distillateur solaire incliné a montré une augmentation de productivité de  $25,75 \%$  avec un bassin à surface ailetée, cependant, quand il est couplé avec le distillateur solaire conventionnel,  $74,5 \%$  d'augmentation est atteinte. En addition, les systèmes intégrés possédant des bassins à surface ailetée découvrent une production totale journalière de distillat de 5210 ml.

**Huang et Chang (2017)** ont proposé de traiter théoriquement et numériquement la fonction d'inclinaison optimale d'un réflecteur externe couplé à un distillateur solaire, à une seule pente, pour obtention d'une production maximale de distillat. Pour ce faire, quatre designs ont été testés : (1) la forme fonctionnelle est supposée constante, (2) elle est supposée une fonction échelonnée pendant chaque heure, (3) elle est supposée trigonométrique et (4) elle est supposée être une fonction B-spline. Les recommandations révèlent que le 1<sup>er</sup> cas montre une production de distillat de  $27,8 \%$  plus grand qu'un système muni d'un réflecteur vertical de 2,38 fois plus grande qu'un système sans réflecteur en hiver. Cependant, le 2<sup>ème</sup> cas a montré une production de  $1,72 \%$  plus grand que dans le 1<sup>er</sup> cas en hiver. Finalement, les auteurs ont recommandé le 2<sup>ème</sup> cas pour une meilleure performance.

**Elashmawy (2017)** ont couplé un distillateur tubulaire solaire à un système de poursuite solaire parabolique. Dans un premier test expérimental, le système destiné au processus de distillation est composé d'un tube transparent de 0,54 m de longueur et de diamètres intérieur et extérieur de  $0,10 - 0,11$  m, respectivement. Le bassin en aluminium est de forme rectangulaire et de dimensions  $0,53 \times 0,085 \times 0,015 \text{ m}^3$ . Dans un deuxième test expérimental, les mêmes dimensions ont été gardées à l'exception de nouvelle la forme choisie du bassin est un demi cylindre de longueur 0,53 m et de diamètre 0,08 m. Dans le troisième test expérimental, les mêmes dimensions sont fixées et le système de poursuite solaire a été

introduit. Les expériences ont été faites sous les conditions climatiques de Hail (27,5°N, 41,7°E), l'Arabie Saoudite. Selon les trois tests expérimentaux, la productivité des systèmes étaient 0,28, 0,214 et 1,66 l/j pour une superficie de 0,059 m<sup>2</sup> du système. La production de distillat augmente de 676 % avec une réduction du prix d'eau pure de 45,5 %.

**Zhang et al. (2018)** ont étudié l'influence d'intégration d'un distillateur solaire à double pente avec un humidificateur-déshumidificateur utilisant un matériau de stockage d'énergie intermédiaire. Le système proposé fonctionnant en mode actif et passif peut produire simultanément de l'eau douce. Exploitant l'utilisation du matériau de stockage d'énergie, la chaleur latente de condensation de vapeur d'eau libérée de la circulation active d'air durant le processus de déshumidification est récupérée pour alimenter la partie passive. Le système réalisé montre une simple structure, moins d'investissement et caractérisé par un simple fonctionnement et contrôle. En outre, la récupération et utilisation de la plupart de l'air mouillé, la production de distillat est observée significative. Le pourcentage d'amélioration en distillat était de 84,4 %.

**Danish et al. (2019)** ont proposé de d'alimenté un distillateur solaire à simple pente en fournissant une pompe d'évacuation et une source d'énergie géothermique. Le mécanisme de distillation est une cavité fabriquée en acier galvanisé de 3 mm d'épaisseur et de dimensions 1 × 1 × 1 m<sup>3</sup> de volume. La plaque absorbante et la couverture transparente inclinée de 24,4° (latitude de Riyadh, l'Arabie Saoudite) sont 0,04 m et 6 mm d'épaisseur, respectivement. Le système est couplé à un échangeur de chaleur de 0,85 m<sup>2</sup> de surface et de 17,3 m<sup>3</sup>/h de débit. Les résultats des tests ont été comparés avec un distillateur conventionnel. Les modifications montrent 305 % de la performance améliorée, tandis qu'il y a un effet indésirable dans l'augmentation de la vitesse d'air ambiant.

L'étude expérimentale de **Guo et al. (2018)** consiste à la réalisation d'un système de distillation solaire évacué intégré à un concentrateur photovoltaïque. Le système est destiné simultanément à la production de l'eau pure et d'électricité. Les tests expérimentaux ont été faits en Pékin, (N38°52'32,75'', E115°29'56,14''), Chine. Les résultats obtenus indiquent que le système proposé peut produire une quantité considérable de l'eau pure atteint 15,26 l, alors que son efficacité électrique et énergie produite est de 12,5 % et 516,3 W, respectivement.

**Kusumadewi et al. (2018)** ont utilisé l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau de mer. L'étude s'est menée sur la base de la manipulation de plusieurs paramètres tels que la variation de la pression d'évacuation, le nombre d'étages d'un évaporateur et le type

d'alimentation en eau. Les tests considèrent les mesures des paramètres environnementaux et l'efficacité du système. Il est abouti à conclure que le système peut produire de l'eau pure de 7595 à 11146 ml/j. En addition, son efficacité peut atteindre 37,77 % à - 0,3 bar de pression. Tenant compte du nombre d'étages dans l'évaporateur, l'efficacité maximale de ce mécanisme a aussi atteint 37,77 % quand le nombre d'étage est maximal (5 étages).

**Al-Abbasi (2019)** a proposé d'étudier numériquement un cycle d'humidification-déshumidification utilisant une source renouvelable (énergie solaire) pour un processus de dessalement d'eau sous les conditions climatiques de Bahreïn. Le cycle est basé sur un système de chauffage solaire d'air, un humidificateur solaire d'air et un condenseur. L'air entrant est chauffé dans le système de chauffage solaire d'air dont le but d'augmenter sa température et relativement diminuer son humidité. Après cela, le courant d'air entre un humidificateur solaire pour être humidifié, dont le but est d'atteindre les conditions de saturation. Les vapeurs transportées à l'aide du courant d'air vont être condensées. L'étude a abouti à de deux paramètres essentiels qui ont affecté la production d'eau pure, notamment l'air d'humidificateur, et les hauteurs des canaux d'eau. En outre, la production d'eau est inversement proportionnelle à la hauteur du canal d'air. Les résultats obtenus montrent que la production d'eau peut être maximale dans le cas de 0,5 et 3 m d hauteurs des canaux d'air et d'eau, respectivement.

L'analyse de la performance d'un distillateur solaire pyramide fonctionnant en mode actif a été menée par **Iqbal et al. (2018)**. La phase de construction a exigé les ingrédients suivants : un bassin rectangulaire à une grande absorptivité de la radiation solaire ou moins de transmittivité et moins de réflectivité. La couverture transparente de forme pyramidale de 2 mm d'épaisseur. Le mécanisme a été couplé à un collecteur solaire à tubes au moyen d'un fil tubulaire. Les tests expérimentaux ont été effectués durant une journée commençant de 10 : 00 h du matin jusqu'à 17 : 00 h du soir et sous les conditions climatiques du mois d'été de Chennai, en Inde. Il a été constaté que la radiation solaire est intense durant la période de 12 : 00 h à 14 : 00 h. La radiation solaire avait un effet clair sur la productivité du distillateur. Les prédictions expérimentales indiquent que le système actif peut produire une quantité de condensat de 3,5 l.

**Xie et al. (2018)** ont développé un modèle mathématique suivi d'une vérification expérimentale pour un distillateur solaire tubulaire fonctionnant en mode d'évacuation. Le système fabriqué est une cavité cylindrique fermée contenant un bassin semi cylindrique



occupant l'espace annulaire du cylindre externe qui contient de l'eau saline. Ce bassin a été intégré à un échangeur de chaleur pour chauffer l'eau saline à l'aide d'un collecteur solaire. L'investigation est basée sur l'effet de la concentration de la vapeur autour de la surface de condensation et celle du bassin contenant l'eau saline. Les auteurs ont vérifié que le processus d'évacuation augmente la concentration de la vapeur autour ces deux zones. Les résultats montrent que le processus d'évacuation améliore l'efficacité du système de plus de 80 % que dans le cas du système fonctionnant sous des conditions naturelles.

### *II.3.2. Distillateurs solaires à grande échelle (ou multi-étages)*

Dans cette partie, les données disponibles sur les systèmes de distillation solaires à grande échelle (multi-étages) représentent un manque remarquable notamment ces dernières années.

**Reddy et Sharon (2016)** ont proposé à modéliser un distillateur solaire à effets multiples empilés verticalement. Cette unité de dessalement est constituée de chambres (étages) de forme verticale. Ces étages ont été entourés d'un bâti pour empêcher les fuites de vapeurs. D'un autre côté, chaque étage joue le rôle d'un évaporateur et en même temps un condenseur pour l'étage qui suit. Le système est équipé d'un réservoir en eau saline pour entamer le processus de distillation dans l'unité. Un collecteur solaire plat externe est assemblé avec l'unité de distillation dont le but est de chauffer l'eau contenant le réservoir de stockage. L'unité de dessalement proposée se caractérise par : longueur, largeur et épaisseur d'un seul étage vertical sont de 1 m, 1 m et 0,001 m, respectivement. Le nombre d'étages dans le système est de 5. La modélisation mathématique est basée sur des bilans énergétiques pour obtenir la variation de la température et la quantité de distillat fournie par chaque étage. La prédiction annuelle et l'analyse environnementale ont aussi été menées. Il est abouti de conclure que : le nombre optimal des étages (effets), le débit massique et la distance entre les étages sont 5, 7,20 kg/h et 0,05 m, respectivement. La quantité de distillat annuelle moyenne a été obtenue de 6,78 et 21.29 kg/m<sup>2</sup>/j pour une unité de dessalement optimisée (nombre d'étages, débit massique et distance entre étages) sous un mode de fonctionnement normal et à basse pression. En outre, au moins 81,81 tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> pourraient être atténuées par l'unité de distillation au cours de sa vie de 20 ans de fonctionnement.

Une analyse de la performance et techno-économique d'un système de distillation solaire multi-étagés a été menée par **Younas et al. (2016)**. L'unité solaire thermique de dessalement est constituée de deux parties essentielles, à savoir le système de dessalement multi-effet et une autre unité servant comme source d'alimentation (collecteur solaire de type Fresnel). La

base de l'unité de distillation est fabriquée en acier galvanisé de 3 mm d'épaisseur pour éviter le problème de la corrosion à cause de présence de l'eau saline. Une plaque inclinée de 50 degrés a été mise dans le côté frontale du système pour recevoir de l'énergie solaire. Le dernier étage du tour de dessalement solaire est fermé par une couverture transparente inclinée. Enfin, l'ensemble possède 3 étages empilés les uns sur les autres. Le système Fresnel ayant une surface effective de  $1,37 \text{ m}^2$ , une longueur focale de 1200 mm et son efficacité de transmission est de 0,85. L'étude menée est basée sur un modèle mathématique disponible dans la littérature. La déviation entre les mesures expérimentales et les calculs numériques est de 5 %. Le système proposé peut produire une quantité de distillat journalière de  $10 \text{ kg/m}^2$  au mois de Mai et Juin, tandis qu'il a enregistré une diminution de  $4,8 \text{ kg/m}^2$  au mois de Décembre. Le **Tableau IV.4** élucide plus de résultats.

**Reddy et Sharon (2017)** ont mené une investigation numérique sur un système de distillation solaire à étages multiples. L'analyse énergétique, environnementale et économique était l'objectif principal de cette étude. L'unité de dessalement proposée par les auteurs est composée de cinq étages empilés en série et couplée avec un collecteur solaire de type évacué. Les étages sont inclinés de  $10^\circ$  pour avoir un écoulement lisible d'eau saline du réservoir de stockage vers chaque étage. La longueur de la chambre de distillation est de 1 m, la largeur et l'épaisseur caractérisant chaque étage incliné sont 1 et 0,001 m, respectivement. Le bâti est isolé à l'aide d'une couche de 0,03 m. Les principaux paramètres énergétiques étudiés sont : la variation de la température dans chaque étage, la quantité de distillat produite par chaque compartiment et le distillat total. L'effet des paramètres environnementaux, à savoir les émissions des gaz de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$  et  $\text{SO}_2$  a été examiné, tandis que le prix de distillat produit est ainsi analysé. Résultats : **(1)** la performance du système est considérée meilleure quand il est composé de cinq étages, connecté en parallèle avec deux collecteurs solaires et un débit d'eau de 135 à 75 kg/j dans l'été et l'hiver, respectivement. **(2)** L'accroissement de la concentration des sels dans l'eau de 0 à 10 % en poids joue un rôle important dans la diminution de la productivité de 48,80 kg/j à 38,90 kg/j. D'un autre part, **(3)** l'augmentation de la quantité des sels dans l'eau diminue les émissions des gaz. **(4)** L'unité peut atténuer près de 221,80 tonnes d'émissions de  $\text{CO}_2$ , 1594,73 kg d'émissions de  $\text{SO}_2$  et 651,37 kg d'émissions de  $\text{NO}$  (20 années de vie, 250 jours de fonctionnement). **(5)** Le prix de vente de l'eau distillée est estimé de 0,06 \$/l.

Le but de l'investigation expérimentale d'**Abed (2018)** est la fabrication d'un système de distillation multi-étages alimenté en énergie solaire dédié à la production d'eau distillée. L'unité de dessalement solaire à étages multiples est composée de trois (03) chambres de forme rectangulaire. L'étage de bas est connecté à un concentrateur solaire parabolique. Chaque étage de l'unité est équipé d'un petit réservoir destiné à la collection du condensat produit. Durant le fonctionnement du système, l'huile est utilisée comme fluide caloporteur circulant dans un concentrateur solaire et qui a pour objectif de chauffer l'eau contenant le 1<sup>er</sup> compartiment du système, à travers un échangeur de chaleur émergé comme élément intermédiaire. L'eau chauffée dans l'étage va, à son tour, chauffer l'étage suivant et ainsi de suite. Les résultats ont montré que ce design du système contribuait dans la réduction de taille et peut produire une quantité d'eau pure de 22 l/m<sup>2</sup>.

L'effet du design des étages d'un distillateur solaire à grande échelle a été étudié expérimentalement par **Abdessemed et al. (2019)**. Le système proposé est alimenté en utilisant trois types de source de chaleur, à savoir un collecteur solaire de type cylindro parabolique, une résistance électrique et déchets végétaux. L'unité de dessalement solaire est testée sous les conditions climatiques de Batna, Algérie. Les résultats expérimentaux révèlent que la forme 'V' du plateau contenant l'eau saline montre une amélioration de la performance et économiquement raisonnable au lieu d'utiliser la forme '^'. En addition, la consommation d'électricité est affectée essentiellement par les déperditions thermiques du système et le type d'étages.

Un système de distillation solaire de forme tubulaire a été proposé, fabriqué et testé par **Yan et al. (2019)**. Le mécanisme consiste à une structure tubulaire fonctionnant sous des conditions d'évacuations. Le système ayant deux cavités cylindriques concentriques (c.à.d. un distillateur à double effet) connecté à une source de chaleur externe à l'aide d'un échangeur de chaleur de forme 'U' qui garantit le réchauffement de l'eau à l'intérieur de la première cavité interne. L'eau chauffée dans la cavité interne va évidemment chauffer à son tour l'eau contenant la deuxième cavité. Il est montré expérimentalement que le processus d'évacuation augmente la production du système et son efficacité simultanément. En outre, le système à effet multiple sous le fonctionnement du processus d'évacuation est plus économique qu'un système à un seul effet simple. Une extension de cette étude montre qu'un distillateur ayant cinq effets peut atteindre un ratio de performance de 3,79 sous une pression de 60 kPa et une température de fonctionnement de 70 °C.

#### II.4. Influence de la nanotechnologie sur la performance des distillateurs solaires

Vue que le progrès remarquable de la technologie moderne, l'arrivée du 'nano' a clairement impacté la performance de plusieurs systèmes industriels. Les systèmes de distillation fonctionnant que ce soit en mode actif ou passif ont été contaminés par cette technologie nouvelle et cela a déjà été rapporté à travers des articles scientifiques et autres au cours de réalisation. Selon la littérature, l'intégration des particules de petites tailles avec les mécanismes de dessalement solaire a été rapportée dans la contribution de **Madani et Zaki (1995)**. Les auteurs précédents ont introduit des microparticules du Carbone (40 – 50  $\mu\text{m}$ ) suspendues le fluide de base (eau) dans un distillateur solaire ayant un bassin poreux pour distiller l'eau saline. Avec le développement scientifique, des travaux de recherche sur la distillation solaire à base de nanoparticules ont récemment été publiés. Dans la partie **Annexe 2 : Applications des nanoparticules suspendues des fluides de base (eau) dans les systèmes de distillation solaire**, quelques données utiles démontrant l'effet significatif de l'intégration de cette technologie avancée à l'une des applications des énergies renouvelables.

# Chapitre III

## Systèmes de distillation solaire : Design & modélisation

### *Résumé :*

Ce chapitre est consacré à explorer un nouveau système de distillation solaire à double pente fonctionnant en mode actif proposé pour la purification d'eau saline. La conception générale du système, son fonctionnement et sa modélisation mathématique à l'issue d'un bilan thermique sont présentés, à la fois en mode actif et passif (système fonctionne sans aucune source de chaleur supplémentaire (système passif sans collecteur solaire) et avec source de chaleur). L'aspect exergetique qui est un outil d'analyse et d'évaluation des performances de ces systèmes. En addition, une autre configuration concernant un système de dessalement solaire multi-étages a été étudiée en faisant apparaître l'effet du terme radiatif et du design (c.à.d. effet du gap entre étages et l'effet de variation de la surface d'évaporation) sur sa performance.

### III.1. Introduction

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température et cela quelque soit le milieu, (même le vide), qui les sépare. De ce fait, les transferts thermiques ont aussi bien dans le domaine des sciences pures, que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel. Ce rôle devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, utilisation de l'énergie solaire, ...).

L'opération d'un distillateur solaire est régie par divers modes de transferts thermiques, il s'ensuit qu'une compréhension appropriée est crucial en concevant un distillateur. La convection et le rayonnement sont les modes prédominants de transfert de chaleur dans un distillateur solaire. Il est plus commode d'étudier les modes de transfert thermique dans le distillateur (transfert interne) et entre l'environnement et le distillateur (transfert externe) séparément. La convection thermique est le processus par lequel le transfert thermique a lieu entre une surface et un fluide (liquide ou gazeux). La densité de flux de chaleur échangé est décrite par l'équation suivante :  $q = h \times \Delta T$ , où  $q$  : est la densité de flux de chaleur en  $W/m^2$  et  $h$  : est le coefficient de transfert de chaleur en  $W/m^2 K$ . Cependant, la complexité du problème se situe en évaluant le coefficient  $h$  de transfert thermique, qui est fonction de la géométrie de la surface, des caractéristiques d'écoulement, et des propriétés thermo-physiques du fluide. Dans la plupart des cas pratiques, les coefficients de transfert thermique sont évalués à partir des expériences qui sont traduits en termes de lois de corrélations faisant intervenir des grandeurs adimensionnelles.

### III.2. Systèmes de distillation solaire

#### III.2.1. Système de distillation en mode passif (Principaux éléments et fonctionnement)

##### III.2.1.1. La couverture (**Fig. III.1, élément 1**)

Dans la plupart des systèmes solaires destinés au processus de distillation, la couverture est réalisée soit en verre soit en plastique. Elle a deux rôles importants : d'une part c'est un *filtre sélectif de rayonnement solaire* (le rayonnement solaire la traverse, le rayonnement

réemis par l'intérieure du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une *surface de condensation de la vapeur d'eau*. Une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. L'emploi du verre permet de satisfaire ces exigences, le seul inconvénient étant son prix relativement élevé.

#### *III.2.1.2. Le bassin (Fig. III.1, élément 2)*

Le bassin est réalisé soit en béton dans le cas de grands distillateurs, soit en métal (aluminium) ou en polyester stratifié dans le cas des petits distillateurs. L'isolation thermique entre l'eau et le terrain d'assise peut être réalisée soit par un revêtement intérieur au bassin, soit dans la « masse » par l'emploi de ciment d'amiante.

L'étanchéité du fond du bassin est réalisée par un tapis de revêtement en caoutchouc synthétique ou en toile de verre bitumée. Ce même revêtement de couleur sombre absorbe le rayonnement solaire. Eventuellement, l'utilisation de l'énergie absorbée peut être améliorée par la mise en place dans l'eau du bassin d'une mèche noire flottante. D'une façon générale, les réalisations pratiques se sont orientées dans deux voies différentes :

- Celle des distillateurs de petites dimensions appelés à répondre aux besoins en eau potable d'individus isolés ou de petites communautés et même à des besoins plus importants par juxtaposition d'une grande quantité de petits appareils construits en série.
- Celle des distillateurs solaires de plusieurs centaines de  $m^2$  dont la construction s'appuie sur des méthodes de génie civil.

#### *III.2.1.3. La gouttière (Fig. III.1, élément 3)*

Le distillateur est assimilé à une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieure de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre d'une certaine épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière.

#### *III.2.1.4. Éléments supplémentaires*

Les éléments complétant le design du distillateur solaire, peuvent être présentés comme suit : le drainage (5) et supports métalliques (7).

### *III.2.1.5. Fonctionnement détaillé*

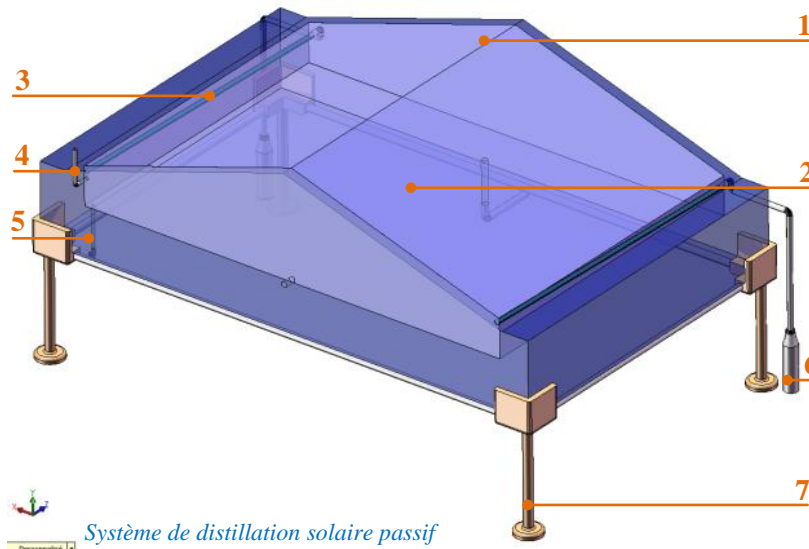
Le distillateur solaire présenté dans la **Fig. III.1** est un bassin étanche (a pour but de réduire les pertes de chaleur vers le milieu externe) qui contient une eau salée ou non pure (c.à.d. l'eau d'alimentation a travers la conduite (4)). Il est fermé d'une couverture supérieure transparente (1), qui laisse transmettre le rayonnement solaire incident. La surface interne du bassin (2) est généralement recouverte d'une peinture noire pour augmenter l'efficacité du système en absorbant davantage le rayonnement solaire incident.

L'eau d'alimentation contenant la cavité chauffe, puis commence à s'évaporer et se condense ensuite à l'intérieur de la couverture supérieure, qui est à une température plus basse car elle est en contact avec l'air ambiant. L'eau condensée (c.à.d. le distillat) s'égoutte et collectée dans un canal intérieur (3) puis stockée dans un réservoir séparé (6). Ce système est également appelé distillateur solaire passif, car il fonctionne uniquement à l'aide du rayonnement solaire.

Ce qui se passe ensuite à l'intérieur du distillateur est le suivant : la partie du rayonnement solaire qui n'est ni réfléchi ni absorbée par la couverture est transmise à l'intérieur de système, où elle est ensuite réfléchi et absorbée par la masse d'eau. L'énergie restante atteint finalement le revêtement de bassin noirci, où elle est principalement absorbée et convertie en énergie thermique. Une partie de cette énergie peut être perdue en raison d'une mauvaise isolation des côtés et du fond.

À ce stade, l'eau se réchauffe, ce qui entraîne une augmentation de la différence de température entre la couverture et l'eau elle-même. Le transfert de chaleur prend alors la forme de rayonnement, de convection et d'évaporation de la surface de l'eau vers la partie interne de la couverture. L'eau évaporée se condense et libère de la chaleur latente. Ce dernier est ensuite perdu à travers convection et rayonnement ainsi que la chaleur convective et radiative restante.





(1) Couverture (2) Bassin (3) Canal de collection du distillat (ou gouttière) (4) Conduit d'alimentation en eau saline (5) Drainage (6) Réservoir (7) Support pour distillateur.

**Fig. III.1.** Système de distillation solaire passif.

### *III.2.2. Système de distillation proposé en mode actif (Éléments additifs et fonctionnement)*

Après avoir définie les éléments principaux constituant un distillateur solaire simple et son fonctionnement dans la sous sections précédente à l'aide de la **Fig. III.1**. Dans ce qui suit, le choix du collecteur solaire couplé avec l'unité de distillation et son mode d'opération feront l'objet des sous sections suivantes III.2.2.1 et III.2.2.2.

#### *III.2.2.1. Choix du collecteur solaire*

Le mécanisme de préchauffage (**Fig. III.2**) est un collecteur de forme cylindrique -1"- fabriqué d'un matériau de bonne qualité (c.à.d. de bons paramètres optique (**Al-Madani, 2006 ; Goudarzi et al., 2014**) pour recevoir et transmettre un flux solaire maximal (grande transmittivité) et empêcher sa réflexion (réflectivité faible). Le capteur tubulaire transparent renferme à son tour un tube hélicoïdal peint noir -2"- pour améliorer l'absorption du rayonnement solaire. La position pivotante du tube interne à l'intérieur de l'espace annulaire du verre est garantie par des plaques circulaires isolées et percées permettant au tube enroulé de pénétrer à travers lesquelles. Les extrémités de la chambre circulaire ont été équipées d'isolants pour empêcher l'air d'entrer à l'intérieur après l'opération d'évacuation d'air. Le système actuel a été choisi pour servir à améliorer la performance thermique du distillateur pendant son processus de distillation. Caractérisé par sa forme, le collecteur cylindrique n'a pas besoin d'être incliné sur l'horizontale en raison de sa conception simple et du nombre

réduit de composants contrairement aux capteurs solaires plans. En outre, il présente de faibles pertes de chaleur considérables à l'environnement, de faibles coûts de fabrication et de maintenance. Le **Tableau III.1** ci-dessous illustre les résultats de quelques travaux antécédents sur ce type de collecteurs solaires.

**Tableau III.1.** Travaux antécédents sur quelques types de collecteurs solaires tubulaires.

Auteur (s)	Caractéristiques et résultats
<b>Saroja et al. (1997)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un collecteur solaire cylindrique à double tubes (en verre) concentriques a été étudié théoriquement et expérimentalement.</li> <li>▪ Les auteurs ont énuméré les bienfaits de ce système sur la base des critères suivants : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple à la réalisation.</li> <li>- Réduction des pertes de chaleur par conduction et rayonnement.</li> </ul> </li> </ul>
	<p>Il est conclu que (1) le nombre de Prandtl a un effet sur les températures de surfaces et le fluide caloporteur, (2) les résultats numériques montrent une concordance avec l'expérimental.</p>
<b>Al-Madani (2006)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le système proposé par l'auteur a été décrit dans la section III.2.2.1 ci-dessus.</li> <li>▪ L'auteur a rapporté en premier lieu que les collecteurs solaires plats ont des inconvénients concernant leurs faibles performances dans les mois d'hiver et pertes de chaleur importantes.</li> <li>▪ Le système construit de type évacué a été testé sous les conditions climatiques de Bahreïn.</li> <li>▪ L'efficacité du système a atteint une valeur de 41,8 %.</li> <li>▪ Le coût de fabrication du système est inférieur en comparaison avec un collecteur plat.</li> </ul>
<b>Ogueke et al. (2009)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le système rapporté dans l'investigation expérimentale d'<b>Ogueke et al. (2009)</b> est fabriqué sur la base d'un collecteur cylindrique transparent (type PVC) et un tube spirale en cuivre placé dans l'espace annulaire du collecteur.</li> <li>▪ La surface externe de ce tube est en noir pour une meilleure absorption du rayonnement solaire.</li> <li>▪ Le système est fermé en utilisant des plaques cylindriques externe et à travers lesquelles le tube spiral passe en assurant son positionnement à l'intérieur du collecteur.</li> <li>▪ Les tests ont été faits sous les conditions climatiques d'Owerri, Nigeria.</li> <li>▪ L'efficacité maximale du système pour les débits massiques 3,6, 7,2 et 10,8 kg/h est de 57,09 %, 53,99 % et 56,21 %, respectivement.</li> </ul>
<b>Rasekh et Farzaneh-Gord (2012)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le même système proposé par <b>Al-Madani (2006)</b> a été étudié théoriquement basant sur l'approche exergetique. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les résultats obtenus montrent que l'efficacité énergétique du système est plus de 50 %, tandis que l'efficacité exergetique est de 2 %.</li> </ul> </li> </ul>

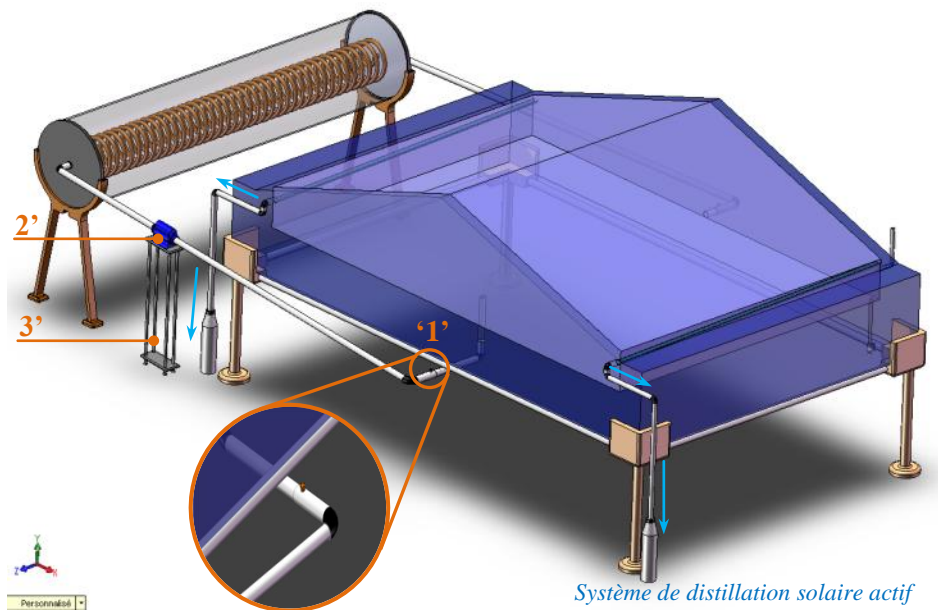
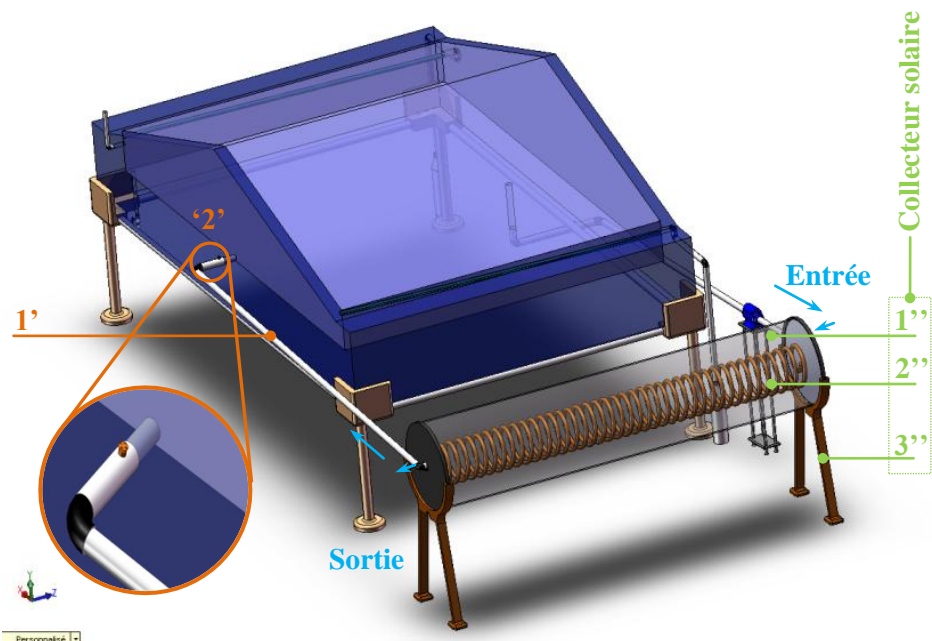
### III.2.2.2. Principe

Comme indiqué précédemment, le capteur solaire peut être placé sur des supports métalliques en tant que source d'énergie thermique supplémentaire pour chauffer l'eau contenant l'unité de distillation. En détail, les organes des couples (système de distillation – réchauffeur solaire cylindrique) sont clairement conçus et énumérés dans la **Fig. III.2**. Dans la même figure, l'ensemble du système a été représenté de l'avant et de l'arrière, montrant le capteur solaire monté avec distillateur solaire au moyen de conduits isolés et de vannes d'arrêt '1' et '2' permettant l'entrée/la sortie d'eau saline entre les systèmes. La surface en verre à double pente (1) couvre un bassin rectangulaire (2) d'eau noircie et à l'intérieur, des gouttières (3) ont été montées pour collecter des gouttelettes (condensat). L'eau entrant dans le bassin est à l'aide d'une conduite d'alimentation extérieur (4). Le système est ainsi équipé d'un canal de drainage (5) pour évacuer l'eau stagnante au sein du bassin après chaque processus de distillation. L'ensemble du dispositif repose sur des pieds métalliques (7).

Un réservoir externe (6) est dédié à la collection du produit final (eau distillée). Le cycle fermé de l'eau était garanti par des conduits (1') placés sur les côtés de l'unité. En premier lieu, le système est orienté plein sud pour une meilleure réception des rayons solaires. Cependant, un dispositif de chauffe-eau solaire se distingue du fait qu'il n'est ni incliné ni orienté, contrairement aux capteurs plans, en raison de sa cylindricité. Une fois le distillateur est rempli d'eau saline, les vannes '1' et '2' des deux côtés sont initialement fermées. L'eau du bassin est libérée lorsque la vanne '1' est ouverte afin de démarrer le processus dessalement. En effet, il est conseillé de bien isoler les conduits incorporés avec le système.

L'eau circule à travers les conduites jusqu'à ce qu'elle entre le tube hélicoïdal à l'intérieur de l'espace annulaire du collecteur solaire cylindrique. L'eau dans le bassin solaire acquies une énergie thermique plus remarquable lorsqu'elle transmet le système de chauffage solaire. Pendant la circulation va et viens entre le distillateur et le chauffe-eau solaire tubulaire, dans cette situation l'eau du bassin s'évapore. En raison de l'enceinte solaire fermée, les vapeurs emprisonnées se condensent sur la face interne de la couverture transparente. Les gouttelettes de distillat glissent et descendent dans des bacs inclinées placées à l'intérieur des parois latérales du système de distillation. Le distillateur solaire est équipé d'un réservoir pour stocker l'eau distillée. Il convient de mentionner qu'un système de pompage (2') (placé sur le

support (3')) intermédiaire entre l'unité de dessalement et le chauffe-eau solaire garantit une circulation adéquate de l'eau.



(1') Conduite isolée (2') Pompe (3') Support pour pompe

● '1' – '2' valves de contrôle.

**Collecteur solaire :**

(1'') Collecteur (2'') Absorbteur spiral (3'') Support.

**Fig. III.2.** Système de distillation solaire actif.

### III.2.3. Application potentielle du système modifié

Les systèmes de distillation solaires sont des mécanismes qui aident à produire de l'eau pure à partir des eaux salées. Généralement, ces applications peuvent être utilisées dans des lieux isolés où l'obtention de l'eau potable est difficile à atteindre. La potentialité des distillateurs simples couplés avec d'autre source de chaleur supplémentaire (ou distillateur solaire actif) comme un moyen d'améliorer leur performance, a été rapportée à travers beaucoup de travaux scientifiques. Le présent système actif peut être désigné à la production de l'eau potable pour accomplir les besoins en eau pour des communautés isolées et un nombre moyen d'individus dans une simple famille.

## III.3. Mise en équation des échanges thermiques

### III.3.1. Bilan énergétique

#### III.3.1.1. Système passif

Avant d'écrire le bilan thermique du système *passif*, on doit tenir compte aux hypothèses simplificatrices suivantes : la couverture est bien nettoyée ; la condensation se fait uniquement sur la couverture (pas de condensation sur les parois latérales) ; le bassin est étanche ; la condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité) ; la concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure. Le bilan énergétique de la couverture, l'eau saline et le bassin d'un distillateur solaire simple a été déjà mené par **Rajaseenivasan et Murugavel (2013)**. En se basant sur la **Fig. III.3** détaillant l'ensemble des flux de chaleur, le bilan est d'abord écrit pour la couverture selon l'équation **(III.1)** suivante :

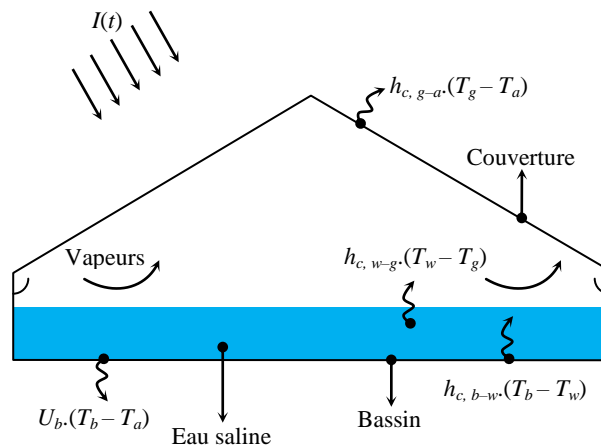


Fig. III.3. Bilan énergétique.

$$A_g AB_g H_t + Q_{c,w-g} + Q_{r,w-g} + Q_{e,w-g} = m_g cp_g \frac{dT_g}{dt} + Q_{r,g-sky} + Q_{c,g-sky} \quad (\text{III.1})$$

Pour le bassin, son équation est thermodynamiquement exprimée par :

$$A_b AB_b H_t = m_b cp_b \frac{dT_b}{dt} + Q_{c,b-w} + Q_{loss} \quad (\text{III.2})$$

Pour l'eau de bassin :

$$A_w AB_w H_t + Q_{c,b-w} = m_w cp_w \frac{dT_w}{dt} + Q_{c,w-g} + Q_{r,w-g} + Q_{e,w-g} \quad (\text{III.3})$$

On fait expliciter les expressions des flux de chaleur qui sont en fonction des coefficients du transfert de chaleur par convection, évaporation et rayonnement. Leurs expressions, c.à.d. coefficients du transfert de chaleur, sont donnés en partie **Annexe 1**. On obtient pour les tris éléments précédents (c.à.d. la couverture, le bassin et l'eau en bassin, respectivement), la forme finale comme suit (équations **(III.4)**, **(III.5)** et **(III.6)**) :

$$A_g AB_g H_t + h_{c,w-g} A_w (T_w - T_g) + h_{r,w-g} A_w (T_w - T_g) + h_{e,w-g} A_w (T_w - T_g) = m_g cp_g \frac{dT_g}{dt} + \sigma \varepsilon_g A_g \left[ (T_g + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] + h_{c,g-sky} A_g (T_g - T_{sky}) \quad (\text{III.4})$$

$$A_b AB_b H_t = m_b cp_b \frac{dT_b}{dt} + h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) + U_b A_b (T_b - T_a) \quad (\text{III.5})$$

$$A_w AB_w H_t + h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) = m_w cp_w \frac{dT_w}{dt} + h_{c,w-g} A_w (T_w - T_g) + h_{r,w-g} A_w (T_w - T_g) + h_{e,w-g} A_w (T_w - T_g) \quad (\text{III.6})$$

Donc, l'équation **(III.1)** ci-dessus peut prendre la forme suivante :

$$\frac{dT_g}{dt} = a_1 \cdot T_g + b_1 + f_1(t) \quad (\text{III.7})$$

Après l'arrangement des termes de l'équation **(III.7)**, les coefficients  $a_1$ ,  $b_1$  et la fonction  $f_1$  sont apparus :

$$a_1 = - \frac{A_w}{m_g cp_g} \left\{ h_{c,w-g} + h_{r,w-g} + h_{e,w-g} + h_{c,g-sky} \frac{A_g}{A_w} \right\}$$

$$b_1 = \frac{1}{m_g c p_g} \left\{ A_w \left( h_{c,w-g} + h_{r,w-g} + h_{e,w-g} \right) T_w + A_g \left\{ h_{c,g-sky} T_{sky} - \sigma \varepsilon_g \left[ \left( T_g + 273 \right)^4 - \left( T_a + 273 \right)^4 \right] \right\} \right\}$$

$$f_1(t) = \frac{A_g A B_g H_t}{m_g c p_g}$$

En introduisant l'absorbance de la couverture, la fonction  $f_1(t)$  est définie ci-dessous :

$$f_1(t) = \frac{A_g H_t}{m_g c p_g} \{1 - \rho_g\} \alpha_g$$

Pour le bassin du système, son équation transitoire en forme compact est :

$$\frac{dT_b}{dt} = a_2 \cdot T_b + b_2 + f_2(t) \quad (\text{III.8})$$

$$a_2 = -\frac{A_b}{m_b c p_b} \left( h_{c,b-w} + U_b \right)$$

$$b_2 = \frac{A_b}{m_b c p_b} \left( h_{c,b-w} T_w + U_b T_a \right)$$

$$f_2(t) = \frac{A_b A B_b H_t}{m_b c p_b}$$

$f_3(t)$  peut prendre sa forme finale comme suit :

$$f_2(t) = \frac{A_b H_t}{m_b c p_b} \left\{ 1 - \rho_g - \alpha_g + \rho_g \alpha_g - \alpha_w + \rho_g \alpha_w + \alpha_g \alpha_w - \rho_g \alpha_g \alpha_w \right\} \alpha_b$$

L'équation qui modélise l'eau en bassin est donnée par :

$$\frac{dT_w}{dt} = a_3 \cdot T_w + b_3 + f_3(t) \quad (\text{III.9})$$

$$a_3 = -\frac{A_w}{m_w c p_w} \left\{ h_{c,b-w} \frac{A_b}{A_w} + h_{c,w-g} + h_{r,w-g} + h_{e,w-g} \right\}$$

$$b_3 = \frac{A_w}{m_w c p_w} \left\{ h_{c,b-w} \frac{A_b}{A_w} T_b + \left( h_{c,w-g} + h_{r,w-g} + h_{e,w-g} \right) T_g \right\}$$

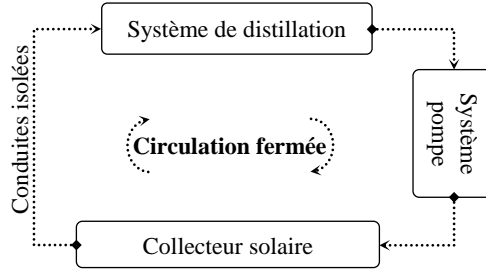
$$f_3(t) = \frac{A_w AB_w H_t}{m_w cp_w}$$

La forme développée de  $f_3(t)$  est :

$$f_3(t) = \frac{A_w H_t}{m_w cp_w} \left\{ 1 - \rho_g - \alpha_g + \rho_g \alpha_g \right\} \alpha_w$$

### III.3.1.2. Système actif

Dans le cas du distillateur solaire fonctionnant en mode *actif* (**Fig. III.4**) (distillateur solaire couplé avec le collecteur solaire), l'équation transitoire (**III.3**) sera un peu modifiée en introduisant le terme  $Q_u$ . Donc, sa nouvelle forme s'écrit comme suit (équation (**III.10**)) :



**Fig. III.4.** Cycle thermique.

$$A_w AB_w H_t + Q_{c,b-w} + Q_u = m_w cp_w \frac{dT_w}{dt} + Q_{c,w-g} + Q_{r,w-g} + Q_{e,w-g} \quad (\text{III.10})$$

Les termes des flux de chaleur vont être explicités en faisant apparaître les coefficients du transfert de chaleur par convection, évaporation et rayonnement. L'équation (**III.10**) s'écrit donc :

$$A_w AB_w H_t + h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) + \dot{m} cp (T_{fo} - T_{fi}) = m_w cp_w \frac{dT_w}{dt} + h_{c,w-g} A_w (T_w - T_g) + h_{r,w-g} A_w (T_w - T_g) + h_{e,w-g} A_w (T_w - T_g) \quad (\text{III.10a})$$

Le terme  $Q_u$  dans (**III.10a**) peut être donné par **Rasekh et Farzaneh-Gord (2012)** comme suit :

$$Q_u = \dot{m} cp (T_{fo} - T_{fi}) \quad (\text{III.11})$$

L'équation (**10a**) peut être se réduit à la forme suivante :



$$\frac{dT_w}{dt} = a_4 \cdot T_w + b_4 + f_4(t) \quad (\text{III.12})$$

$$a_4 = -\frac{A_w}{m_w cp_w} \left\{ \frac{A_b}{A_w} h_{c,b-w} + h_{c,w-g} + h_{r,w-g} + h_{e,w-g} \right\}$$

$$b_4 = \frac{1}{m_w cp_w} \left\{ h_{c,b-w} A_b T_b + (h_{c,w-g} + h_{r,w-g} + h_{e,w-g}) A_w T_g + mc_p (T_{fo} - T_{fi}) \right\}$$

La forme complète de  $f_4(t)$  en fonction de  $AB_w$  est :

$$f_4(t) = \frac{1}{m_w cp_w} \left\{ A_w \left\{ 1 - \rho_g - \alpha_g + \rho_g \alpha_g \right\} \alpha_w H_t \right\}$$

Les expressions de  $AB_b$ ,  $AB_g$  et  $AB_w$  sont données ci-dessous comme suit :

---


$$AB_b = (1 - \rho_g - AB_g - AB_w) \alpha_b$$

$$AB_g = (1 - \rho_g) \alpha_g$$

$$AB_w = (1 - \rho_g - AB_g) \alpha_w$$


---

Le **Tableau III.2** représente les données utilisées pour la mise en marche du calcul numérique.

**Tableau III.2.** Données utilisées dans le calcul numérique.

Paramètres	Valeurs (avec l'unité)
<i>(i) Données météorologique</i>	
Latitude	35°33'N
Longitude	6°11'E
Albedo	0,25
<i>(ii) Système de distillation (Rajaseenivasan et Murugavel, 2013)</i>	
$A_b$	0,63 m <sup>2</sup>
$A_g$	0,728 m <sup>2</sup>
$Cp_b$	473 J/kg °C
$Cp_g$	800 J/kg °C
$Cp_w$	4187 J/kg °C
$m_b$	8,2 kg
$U_b$	14 W/m <sup>2</sup> °C
$\alpha_b$	0,95
$\alpha_g$	0,0475

$\alpha_w$	0,05
$\rho_g$	0,0735
<i>(iii) collecteur circulaire (Al-Madani, 2006)</i>	
- Collecteur	
$D_o$	0,14 m
$L$	0,8 m
$\delta_c$	6 mm
- Tube spiral (Boonchom et al., 2007)	
$D_i$	0,008 m
$D_o$	0,012 m
$\alpha$	0,94

---

### III.3.1.3. Quantité de distillat, $P_h$

La forme analytique donnant la quantité du distillat est donnée par la réf. d'**El-Sebaï et al. (2008)** :

$$P_h = 3600 \cdot \frac{h_{e,w-g} \cdot (T_w - T_g)}{h_{fg}} \quad (\text{III.13})$$

Sachant que l'expression de la chaleur latente apparue dans l'équation (III.13) ci-dessus est donnée par :

$$h_{fg} = 1000 \cdot (2530,3 - 2,398 \cdot T) \quad (\text{III.13a})$$

### III.3.1.4. Efficacité énergétique, $\eta_{th}$

L'efficacité énergétique dans le cas d'un distillateur solaire simple est donnée par l'équation (III.14) (**El-Sebaï et al., 2008**) :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{ew} \cdot h_{fg}}{A_b \cdot I(t)} \quad (\text{III.14})$$

Cependant, elle est exprimée dans le cas des systèmes couples (distillateur solaire actif) par l'équation (III.15) (**Tiwari et al., 1996**) :

$$\eta_{th} = \frac{h_{ew} \cdot (T_w - T_g)}{(A_b + N \cdot A_c) \cdot I(t)} \quad (\text{III.15})$$

### III.3.2. Bilan éxergétique

#### III.3.2.1. Le concept d'éxergie

L'analyse des systèmes de distillation solaire utilisant le concept énergétique peut être insuffisante pour mieux comprendre l'énergie utilisée dans ces mécanismes. L'introduction d'un nouveau concept 'éxergie' qui est sans aucun doute une plateforme qui examinera un tel système thermodynamique plus précisément notamment dans le cas d'identifier les améliorations potentielles. La détermination des sources d'irréversibilités peut aider à comprendre comment le système se comporte. En outre, c'est une indication des zones des pertes éxergétiques pour agir dans le sens d'aboutir à l'étape d'optimisation et d'amélioration du système énergétique.

#### III.3.2.2. Formulation théorique

Le transfert de chaleur d'un tell système solaire de distillation, à partir de l'eau en bassin jusqu'à la surface de condensation (couverture transparente), est gouverné par les trois modes de convection, évaporation et radiation. Le flux d'évaporation  $\dot{Q}_{ew}$  qui contribue dans l'évaporation du l'eau saline est donné par (Shanmugan et al., 2012) :

$$\dot{Q}_{ew} = h_{ew} \cdot A_b \cdot (T_w - T_g) \quad (\text{III.16})$$

Similairement, le flux d'évaporation éxergétique est donné par :

$$\dot{Ex}_{ew} = h_{ew} \cdot A_b \cdot (T_w - T_g) \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_w}\right) \quad (\text{III.17})$$

Dans les équations (III.18) et (III.19), les flux énergétiques par convection et radiation sont :

$$\dot{Q}_{cw} = h_{cw} \cdot A_b \cdot (T_w - T_g) \quad (\text{III.18})$$

$$\dot{Q}_{rw} = h_{rw} \cdot A_b \cdot (T_w - T_g) \quad (\text{III.19})$$

Tandis que, les flux éxergétiques par convection et radiation peuvent être calculés à l'aide des équations (III.20) and (III.21) :

$$\dot{Ex}_{cw} = h_{cw} \cdot A_b \cdot (T_w - T_g) \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_w}\right) \quad (\text{III.20})$$

$$\dot{E}x_{rw} = h_{rw} \cdot A_b \cdot (T_w - T_g) \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{T_a}{T_w} \right)^4 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{T_a}{T_w} \right) \right\} \quad (\text{III.21})$$

Les flux thermique énergétique et exergetique sont obtenus comme suit (**Shanmugan et al., 2012**) :

$$\dot{Q}_t = h_t \cdot A_b \cdot (T_w - T_g) \quad (\text{III.22})$$

$$\dot{E}x_t = \dot{E}x_{ew} + \dot{E}x_{cw} + \dot{E}x_{rw} \quad (\text{III.23})$$

Où  $h_t = h_{cw} + h_{ew} + h_{rw}$  est le coefficient de transfert de chaleur total. Dans l'analyse théorique, les températures de l'eau saline ( $T_w$ ) et de la couverture transparente ( $T_g$ ) apparues dans équations ci-dessus sont des variables inconnues et qui doivent être déterminées dont l'objectif est de calculer les différentes quantités thermique énergétique et exergetique.

En addition, le flux exergetique de la radiation solaire qui tombe sur la surface transparente du distillateur est donné par (**Petela, 2010**) :

$$\dot{E}x_{Sun} = I(t) \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{T_a}{T_s} \right) \right\} \quad (\text{III.24})$$

### III.3.2.3. Fractions thermiques énergétiques et exergetiques

Les fractions énergétiques par convection ( $Fr_{en,cw}$ ), évaporation ( $Fr_{en,ew}$ ) et radiation ( $Fr_{en,rw}$ ) sont (**Shanmugan et al., 2012**) :

$$Fr_{en,cw} = \frac{\dot{Q}_{cw}}{\dot{Q}_{ew} + \dot{Q}_{cw} + \dot{Q}_{rw}} \quad (\text{III.25})$$

$$Fr_{en,ew} = \frac{\dot{Q}_{ew}}{\dot{Q}_{ew} + \dot{Q}_{cw} + \dot{Q}_{rw}} \quad (\text{III.26})$$

$$Fr_{en,rw} = \frac{\dot{Q}_{rw}}{\dot{Q}_{ew} + \dot{Q}_{cw} + \dot{Q}_{rw}} \quad (\text{III.27})$$

De même, les fractions exergetiques par convection ( $Fr_{ex,cw}$ ), évaporation ( $Fr_{ex,ew}$ ) et radiation ( $Fr_{ex,rw}$ ) sont :

$$Fr_{ex,cw} = \frac{\dot{E}x_{cw}}{\dot{E}x_{ew} + \dot{E}x_{cw} + \dot{E}x_{rw}} \quad (\text{III.28})$$

$$Fr_{ex,ew} = \frac{\dot{E}x_{ew}}{\dot{E}x_{ew} + \dot{E}x_{cw} + \dot{E}x_{rw}} \quad (\text{III.29})$$

$$Fr_{ex,rw} = \frac{\dot{E}x_{rw}}{\dot{E}x_{ew} + \dot{E}x_{cw} + \dot{E}x_{rw}} \quad (\text{III.30})$$

### III.3.2.4. Efficacité exergetique, $\eta_{ex}$

L'efficacité exergetique ( $\eta_{ex}$ ) de n'importe quel système solaire peut être définie par la fraction entre l'exergie de sortie  $\dot{E}x_{out}$  et l'exergie d'entrée  $\dot{E}x_{in}$ . Dans la présente situation, l'efficacité exergetique du distillateur solaire est donnée par **Ranjan et al. (2016)** :

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergie de sortie}}{\text{Exergie d'entrée}} \Big|_{\text{du système}} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} = \frac{\dot{E}x_{Evaporation}}{\dot{E}x_{in}} \quad (\text{III.31})$$

Où,  $\dot{E}x_{Evaporation}$  et  $\dot{E}x_{in}$  sont respectivement l'énergie d'évaporation et de la radiation solaire (cette dernière a été déjà exprimée dans l'équation **III.24**).

Donc, la variation temporelle de l'efficacité exergetique du distillateur solaire est :

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{e,w-g}}{\dot{E}x_{Sun}} = \frac{\dot{q}_{e,w-g} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_w}\right)}{\dot{E}x_{Sun}} \quad (\text{III.32})$$

### III.3.2.5. Exergie d'entrée du système modifié

Dans le cas du système solaire actif présenté dans la **Fig. III.2**, l'exergie d'entrée  $\dot{E}x_{in}$  peut être évaluée en utilisant l'équation (**III.33**). Cette dernière reflète la somme des termes de la radiation solaire exergetique sur le distillateur,  $\dot{E}x_{in}(SS)$ ,  $CT$  (Collecteur Tubulaire),  $\dot{E}x_{in}(CT)$  et de la pompe,  $\dot{E}x_p$  (**Kumar et Tiwari, 2008 ; Tiwari et al., 2015**).

$$\dot{E}x_{in}(SM) = \dot{E}x_{in}(SS) + \dot{E}x_{in}(CT) + \dot{E}x_p \quad (\text{III.33})$$

Selon **Tiwari et al. (2015)**, l'exergie du présent collecteur tubulaire peut être écrite en terme de  $Q_u$ , la température ambiante et la température de l'eau saline :

$$\dot{E}x_{in}(CT) = \dot{E}x_{in}(CT) = Q_u \cdot \left(1 - \frac{T_u}{T_w}\right) \quad (\text{III.34})$$

Donc, en se basant sur ce qui précède, on peut aboutir au calcul de l'efficacité exergetique du système modifié (*SM*) comme suit (équation (III.35)) :

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}_{ew} \cdot \dot{E}x_{ew}}{\dot{E}x_{in}(SM)} = \frac{\dot{m}_{ew} \cdot \dot{E}x_{ew}}{\dot{E}x_{sun}(SS) + \dot{E}x_{in}(CT) + \dot{E}x_p} \quad (\text{III.35})$$

Où  $\dot{m}_{ew}$  est la quantité horaire du distillat,  $\dot{E}x_{ew}$  est l'exergie du taux d'évaporation déjà définie dans l'équation (III.2) et  $\dot{E}x_{in}(SM)$  est décrit en équation (III.33).

#### III.4. Résolution numérique et méthodologie

Le model thermique ci-dessus décrivant les systèmes géométriques de distillation solaire passif et actif et les paramètres d'entrée sont implémentés sous forme d'un programme de calcul utilisant le compilateur **Fortran**. L'ensemble des investigations numériques a été effectué pour un emplacement de la ville de Batna, Algérie. Dans un premier temps, les données météorologiques du site, température initiales des composants bassin, eau et couverture, temps maximal pour la mise en marche de la boucle du temps). Les paramètres dépendant de la température sont : les pressions partielles, la capacité thermique, la chaleur latente et le reste des coefficients de transfert de chaleur par convection, évaporation et radiation. Les paramètres déjà cités sont recalculés après chaque calcul de températures des éléments précédents. Le programme de calcul inclus ainsi que la prédiction de la quantité de distillat pour les différents mécanismes. Le corps du programme est constitué d'une séquence de subroutines et fonctions dont l'objectif est faire appel au calcul du rayonnement et les coefficients  $k_i$ , en appliquant l'approche Rung-Kutta du quatrième ordre. Le processus de calcul s'arrête quand les indices de la boucle de temps atteignant un temps maximal. Après avoir eu une idée sur la prédiction des paramètres énergétiques (évolution de température, distillat horaire, et l'efficacité thermique), le programme est enrichi et étendu en considérant le comportement exergetique par implémentation des équations illustrées dans la sous-section ci-dessus.

#### III.5. Présentation de la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4

La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 est l'une des méthodes numériques d'approximation de solutions d'équations différentielles. Cette méthode repose sur le principe

de l'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation, avec plus de précision.

Cette méthode repose sur le principe suivant :

On calcule les  $k_j$  tel que  $j$  allant de 1 jusqu'à 4 de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 k_1 &= f(t_j, y_j) \\
 k_2 &= f\left(t_j + \frac{dt}{2}, y_j + \frac{dt}{2} \cdot k_1\right) \\
 k_3 &= f\left(t_j + \frac{dt}{2}, y_j + \frac{dt}{2} \cdot k_2\right) \\
 k_4 &= f(t_j + dt, y_j + dt \cdot k_3)
 \end{aligned}
 \tag{III.36}$$

et ensuite, on calcule la suite dont la forme :

$$y_{j+1} = y_j + \frac{dt}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4)
 \tag{III.37}$$

### III.6. Système de distillation solaire à étages multiples

#### III.6.1. Design, description et fonctionnement

##### III.6.1.1. Design et description

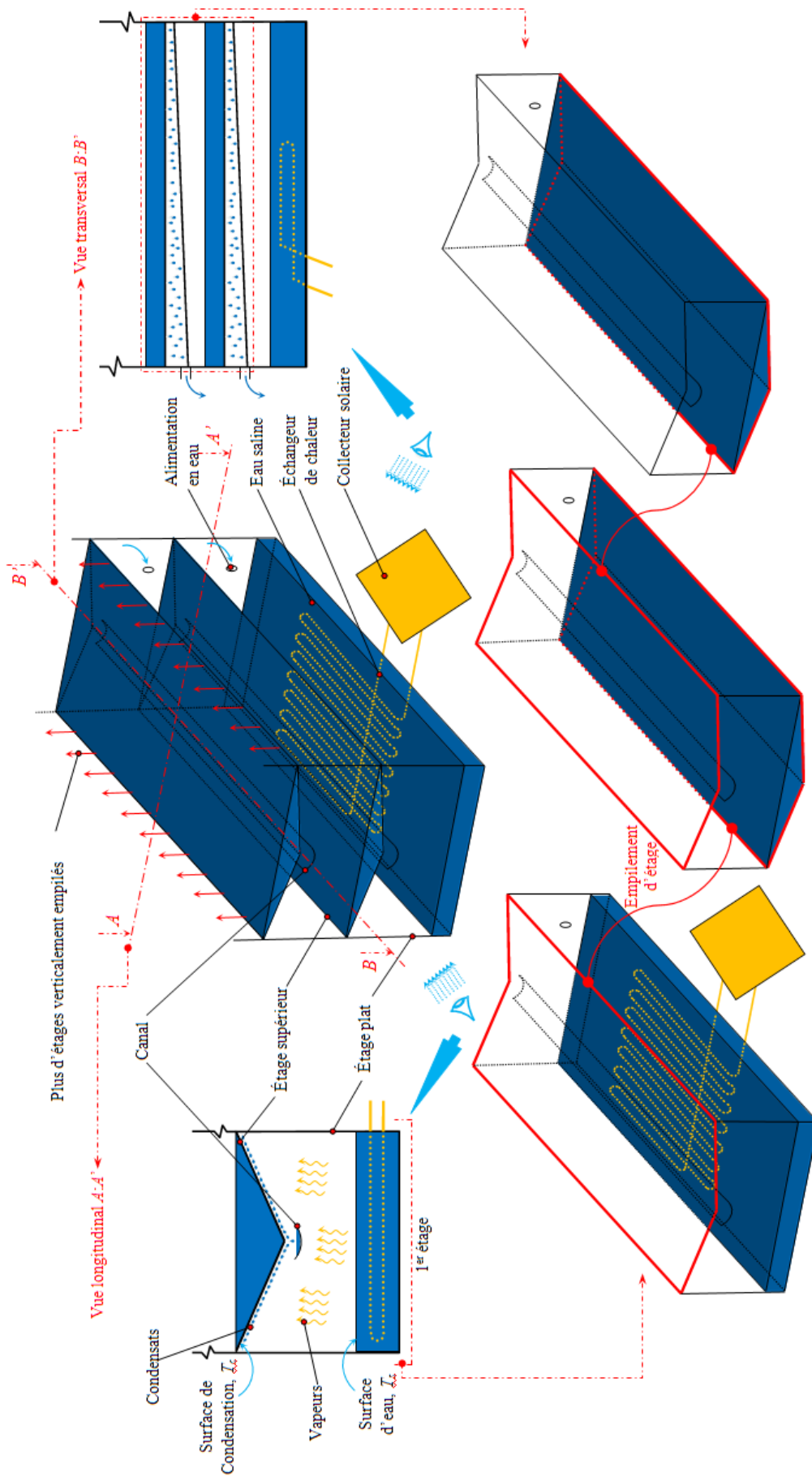
La **Fig. III.5** donne une vue entièrement schématisée en 3D montrant des coupes transversale et latérale de l'unité de distillation, qui consiste principalement d'un distillateur solaire à plusieurs étages relié directement à un capteur solaire en tant que source d'énergie d'alimentation afin de former donc un distillateur solaire actif. Le compartiment de la tour de distillation couvre les éléments internes afin de résister aux conditions climatiques externes telles que la corrosion ou d'autres causes pouvant infecter la nature de l'eau à l'intérieur de l'unité. Le système proposé contient principalement quatre condenseurs adjacents en forme de «V» et empilés verticalement de bas vers le haut. Tous les étages empilés ont une forme identique et rectangulaire, à moins que celui du bas (étage 1) ait un compartiment dont le fond est plat et recouvert par l'étage suivant. Quatre trous perçant le côté latéral de l'unité de distillation pour alimenter chaque étage en eau saline provenant d'un réservoir situé au sommet et à l'intérieur du dispositif de distillation. Dans l'unité de distillation, chaque plateau est équipé d'un système de drainage monté longitudinalement et incliné d'un certain angle pour permettre à l'eau distillée de glisser vers les bacs. Trois perspectives ont été

dessinées afin de permettre une bonne compréhension de la conception dans son ensemble et du processus de fonctionnement. La coupe transversale a également été proposée pour plus de détails sur la forme intérieure du plateau inclinée. Un échangeur de chaleur serpentin est intégré au bassin bas du système et connecté directement à un capteur solaire en tant que source de chaleur. Le conduit d'alimentation de chaque étage relié avec un réservoir rempli en eau salée est équipé de plusieurs vannes afin de contrôler le niveau d'eau saline dans les plateaux métalliques. La collection du distillat cumulé provenant du mécanisme de drainage est finalement assurée en reliant un conduit derrière le système de distillation avec chaque unité évaporateur–condenseur et le réservoir de stockage.

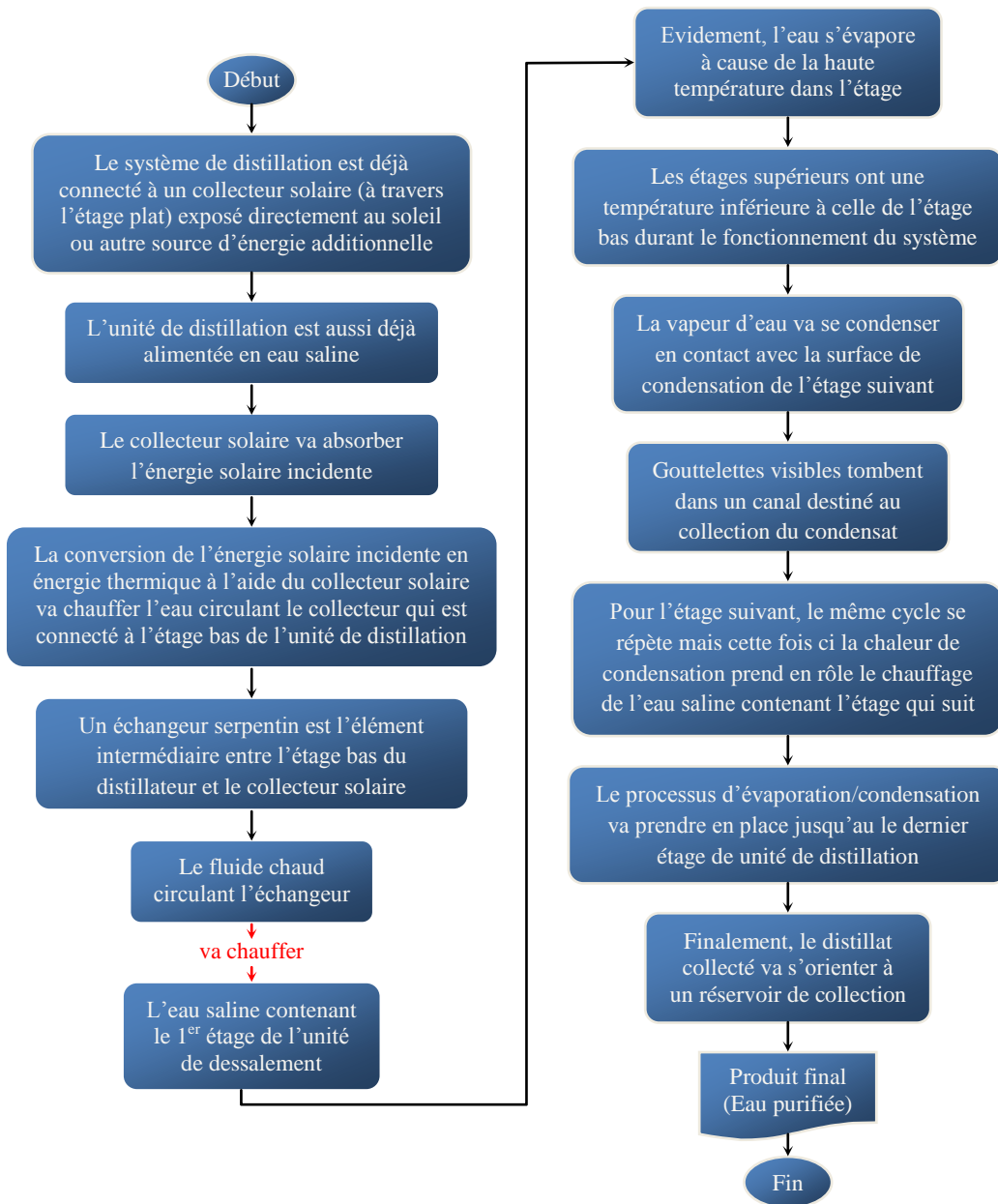
### *III.6.1.2. Fonctionnement*

La tour à plusieurs étages est couplée à un capteur solaire qui agit comme un système de distillation solaire actif. Le capteur solaire plan est incliné selon latitude du lieu et orienté vers le sud pour obtenir de bonnes performances. Les étages à double pente agissent comme des surfaces évaporateurs et en même condenseurs c.à.d. la face externe de l'étage en forme angulaire fonctionne comme une surface de condensation, tandis que la face interne peut contenir de l'eau saline. Une fois que le système est alimenté en eau saline, celle-ci vient recouvrir un échangeur serpentin installé sur la chambre plate en bas (étage 1) et connecté à un capteur solaire. Premièrement, l'énergie absorbée par le collecteur est utilisée pour chauffer progressivement le fluide contenant l'échangeur à cycle fermé. Dans cette situation, la quantité importante de chaleur générée par ce cycle est automatiquement transférée à l'eau saline qui couvre l'échangeur serpentin. La température élevée de l'eau qui contient le plateau inférieur provoque donc son évaporation. L'eau évaporée se condense au contact de la surface en pente refroidie de l'étage ci-dessus en raison de la différence de température entre les étages. En fait, la température de l'eau dans la partie supérieure est basse à celle de la partie inférieure. Après le phénomène de condensation, la formation de gouttelettes glissant sur la surface inférieure des plateaux inclinés. Les gouttes d'eau formées glissent et tombent pour se collecter dans le réservoir de stockage. Il faut mentionner que les phénomènes d'évaporation–condensation se répètent tout en montant vers haut. En effet, lors de la condensation de la vapeur d'eau, une enthalpie d'évaporation est libérée et est utilisée pour augmenter la température de l'eau dans le plateau supérieur. Le fonctionnement du système a été clairement résumé et schématisé dans la **Fig. III.6**.





**Fig. III.5.** Schéma détaillé d'un système de distillation à étages multiples



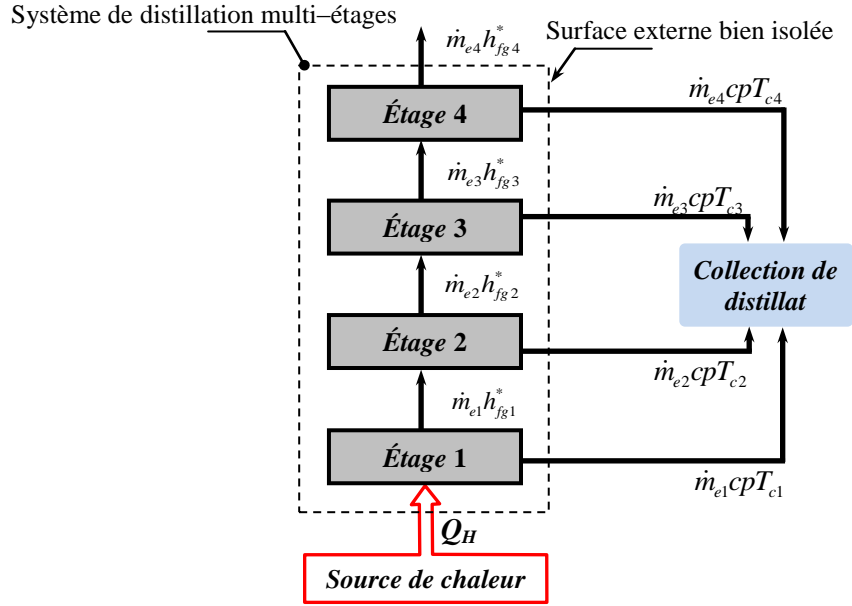
**Fig. III.6.** Étapes résumant le fonctionnement du système solaire à étages multiples jusqu'à l'obtention du produit final (distillat).

### III.6.2. Bilan thermique

#### III.6.2.1. Effet de la surface d'évaporation

Avant d'analyser l'effet de la surface d'évaporation sur la performance du système, les hypothèses suivantes ont été considérées : le système fonctionne à la pression atmosphérique ; l'effet des gaz incondensables entre étages est négligeable ; la condensation sur les parois des plateaux, se fait uniquement sous forme de film homogène et continu ; les fuites de vapeur entre l'étage et le bâti à l'intérieur du distillateur sont négligeables ; les étages sont bien placés (c.à.d. meilleure étanchéité entre chaque étage).

Selon la référence de **Shatat et Mahkamov (2010)**, le bilan énergétique du premier étage (**Fig. III.7**), peut être s'écrit comme suit :



**Fig. III.7.** Flux de chaleur au niveau du distillateur solaire multi-étages.

$$Q_H - \dot{m}_{e1} (h_{fg1}^* + cpT_{c1}) = M_{s1} cp \frac{dT_{s1}}{dt} \quad (\text{III.38})$$

Où,  $Q_H$  est la source de chaleur alimentant le système de dessalement. Cette source peut être due à un collecteur solaire ou autre, etc.

Dans l'équation (**III.38**), la source d'énergie externe peut être exprimée par la relation suivante :

$$Q_H = \dot{m}_{SC} cp (T_{SC-e} - T_{SC-s}) \quad (\text{III.39})$$

Dans notre cas, un collecteur solaire de type plat a été employé. Pour les étages de dessus c.à.d. les  $n-1$  étages restant, l'équation pour  $i$  étage est donnée par :

$$\dot{m}_{e(i-1)} h_{fg(i-1)}^* - \dot{m}_{ei} (h_{fgi}^* + cpT_{ci}) = M_{si} cp \frac{dT_{si}}{dt} \quad (\text{III.40})$$

Où, l'indice  $i = 2$  à  $n$ ,  $n$  représente le nombre d'étage dans l'unité de distillation et  $T_s$ ,  $T_c$  sont respectivement la température de l'eau saline et de la surface de condensation pour chaque étage.

La conservation de la masse dans chaque étage peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{dM_{ei}}{dt} = -\dot{m}_{ei} \quad (\text{III.41})$$

Le taux de distillat dans chaque étage peut être fourni par :

$$m_{ei} = \frac{16,273 \cdot 10^{-3} h_{sci} \cdot (P_{si} - P_{ci}) A_{si}}{h_{fji}} \quad (\text{III.42})$$

Les paramètres essentiels qui rentrent dans le calcul de  $m_{ei}$  (équation (III.42)) comme : le coefficient de transfert de chaleur par convection,  $h_{sci}$  et la chaleur latente de vaporisation de l'eau,  $h_{fji}$  et l'expression modifiée de la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la surface de condensation,  $h_{fji}^*$  sont déterminés respectivement comme proposé dans la référence de **Shatat et Mahkamov (2010)** :

$$h_{sci} = 0,884 \cdot \left( T_{si} - T_{ci} + \frac{(P_{si} - P_{ci}) \cdot (T_{si} + 273)}{268,9 \cdot 10^3 - P_{si}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{III.43})$$

$$h_{fji}(T) = 1000 \cdot (3161,5 - 2,4074 \cdot (T + 273)) \quad (\text{III.44})$$

$$h_{fji}^*(T) = h_{fji} + 0,68 \cdot cp_i \cdot (T_{ei} - T_{ci}) \quad (\text{III.45})$$

La capacité thermique de l'eau est définie comme une fonction de température de chaque étage :

$$cp_i = 1000 \cdot (4,2101 - 0,0022 \cdot T_{ei} + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{ei}^2 - 3 \cdot 10^{-7} \cdot T_{ei}^3) \quad (\text{III.46})$$

En outre, le coefficient  $h_{sci}$  dépend des pressions partielles qui sont données par les formes suivantes :

$$P_{(s,c)i} = \exp \left( 25,317 - \frac{5144}{T_{(s,c)i} + 273} \right) \quad (\text{III.47})$$

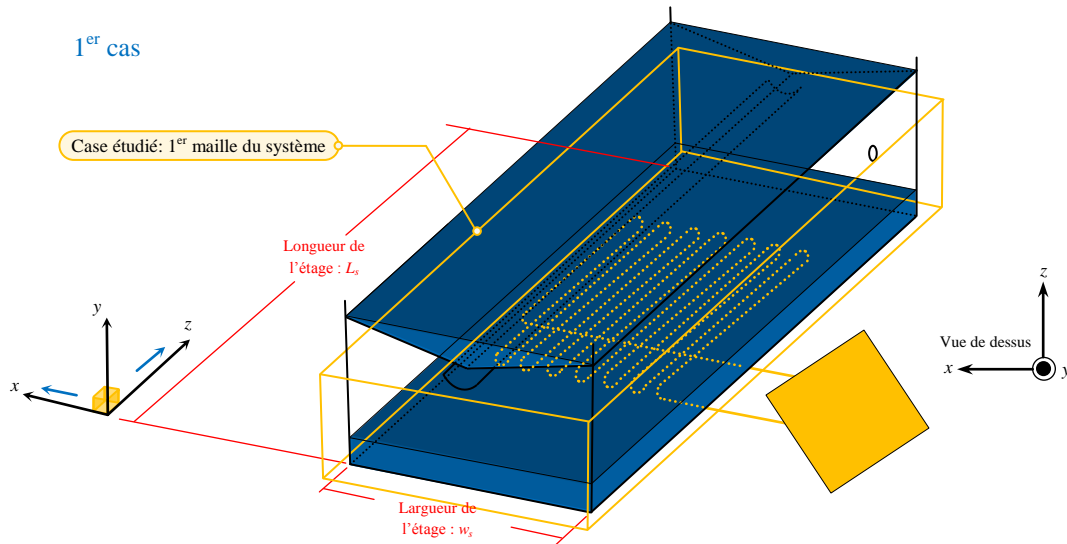
Le coefficient du transfert de chaleur d'évaporation,  $h_{ewi}$  est défini par :

$$h_{ewi} = 16,273 \cdot 10^{-3} h_{sci} \cdot \left( \frac{P_{si} - P_{ci}}{T_{si} - T_{ci}} \right) \quad (\text{III.48})$$

L'équation (III.42) donnant la quantité du distillat en chaque étage, peut être explicitée en faisant apparaître la longueur,  $L_s$  et la largeur,  $w_s$  de l'étage. Alors, cela nous donne :

$$\dot{m}_{ei} = \frac{16,273 \cdot 10^{-3} h_{sci} \cdot (P_{si} - P_{ci}) \cdot (L_{si} \cdot w_{si})}{h_{fji}} \quad (\text{III.49})$$

L'effet des paramètres dimensionnels (c.à.d.  $L_s$  et  $w_s$ ) selon les directions  $x$  et  $z$ , est schématiquement présenté dans la **Fig. III.8**. Les données des paramètres requises dans le calcul numérique sont fournies dans un tableau utile (**Tableau III.2**).



**Fig. III.8.** Design variationnel de la surface d'évaporation suivant le système d'axes  $xOz$ .

**Tableau III.3.** Données utilisées dans la prédiction numérique (Shatat et Mahkamov, 2010).

Propriétés utilisées	Valeur
Débit massique de l'eau	5,8 L/min
Chaleur massique de l'eau	4187 J/kg °C
Masse molaire de l'air	28,96 g/mol
Masse molaire de l'eau	18,02 g/mol
Surface du collecteur	1,2 m <sup>2</sup>

### III.6.2.2. Effet d'espace entre étages (entre le 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> étage)

Dans la **Fig. III.9** ci-dessous, un autre paramètre de conception peut influencer sur les capacités de l'unité solaire en ce qui concerne la lame d'air entre la surface du lit d'eau et la face de condensation supérieure. Cette distance  $x_1$  a été mentionnée dans une perspective démonstrative en prenant le premier et deuxième plateau comme un échantillon sous analyse. Pour étudier ce paramètre, il convient de mentionner que **Hongfei et al. (2002)** ont rapporté des corrélations empiriques calculant le taux d'évaporation et le transfert de chaleur par convection libre, similaires à celles présentées précédemment, tout en faisant apparaître l'influence de la distance moyenne  $x_1$ .

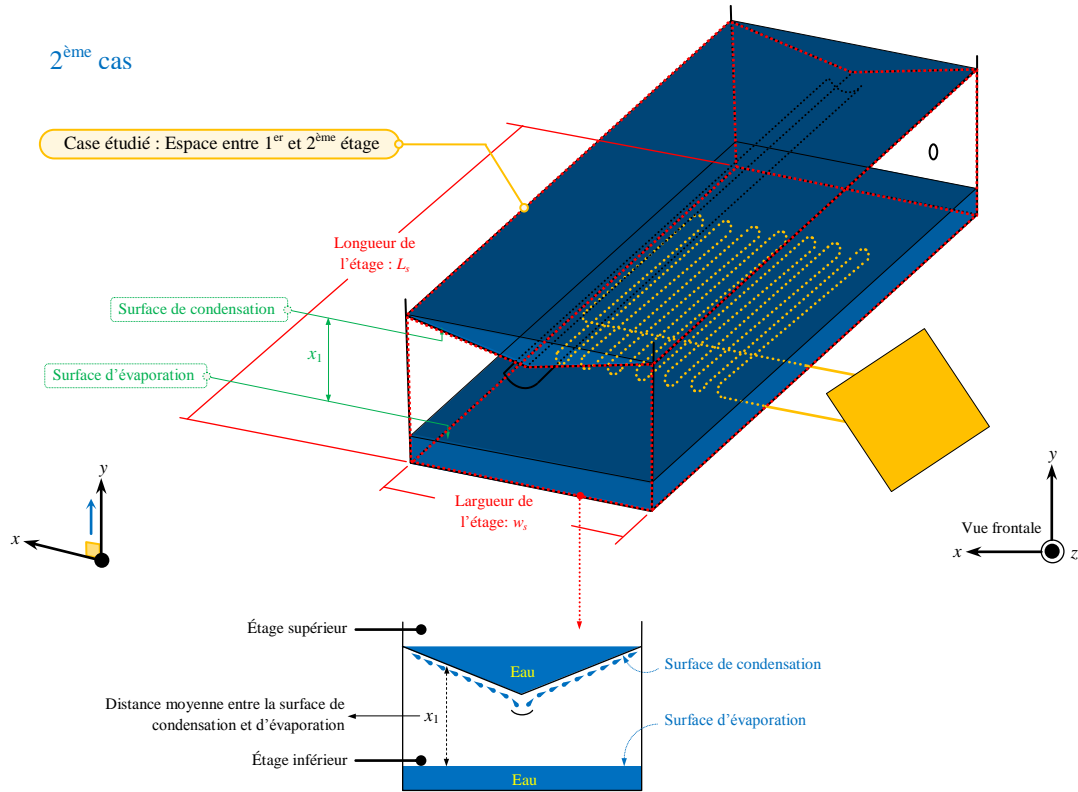


Fig. III.9. Design variationnel de la surface d'évaporation suivant le système d'axe  $Oy$ .

Donc, le taux d'évaporation, selon **Hongfei et al. (2002)**, peut être écrit sous la forme suivante :

$$m_e = \alpha \cdot (\Delta T')^n \cdot (P_w - P_g) \quad (\text{III.50})$$

Où,  $w$  et  $g$  sont des indices qui dénotent respectivement les surfaces d'évaporation et de condensation, et  $n$  peut être déterminé selon les conditions suivantes :

$$n = \frac{1}{4} \quad 10^4 < Gr < 2,51 \times 10^5$$

$$n = \frac{1}{3} \quad 2,51 \times 10^5 < Gr < 10^7$$

Selon **Hongfei et al. (2002)**, la détermination du coefficient du transfert de chaleur par convection,  $h_c$  est basée sur le calcul du nombre du Nusselt  $Nu$ . Alors :

$$Nu = 0,2 Ra^{0,26} \quad 3,5 \times 10^3 < Ra < 10^6 \quad (\text{III.51})$$

Ecrivant le nombre du Nusselt en fonction de  $h_c$ , cela donne :

$$h_c = 0,2 \cdot Ra^{0,26} \frac{k_f}{x_1} \quad (\text{III.52})$$

Dans l'équation (III.52), la distance caractéristique moyenne verticale séparant les étages entre eux,  $x_1$  est apparue en pour illustrer son effet sur la performance du système. Cependant, **Hongfei et al. (2002)** ont proposé la forme de calcul du nombre de Rayleigh comme suit (équation (III.53)) :

$$Ra' = \frac{x_1^3 \cdot \rho_f \cdot g \cdot \beta}{\mu_f \cdot \alpha_f} \cdot \Delta T' \quad (\text{III.53})$$

Or, la différence de température,  $\Delta T'$  (apparue dans les équations (III.50) et (III.53)) est exprimée par :

$$\Delta T' = (T_w - T_g) + \left( \frac{(P_w - P_g)}{\frac{M_a P_T}{M_a - M_w} - P_w} \right) T_w \quad (\text{III.54})$$

Combinant toutes les équations précédentes, on abouti à la forme finale du taux d'évaporation présenté dans l'équation (III.55) par :

$$m_e = \frac{h_c}{\rho_f \cdot C_{pf} \cdot Le^{(1-n)}} \frac{M_w}{R} \cdot \left( \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right) \quad (\text{III.55})$$

Où,  $Le$ ,  $M_w$  et  $R$  sont respectivement le nombre adimensionnel de *Lewis*, la masse molaire de l'eau et la constant universelle des gaz.

### III.7. Résolution numérique

La résolution numérique consiste au préalable à transformer les équations (III.38) et (III.40) sous la forme  $\frac{d\phi}{dt} = a \cdot \phi + b + f(t)$  où  $a$  et  $b$  sont des paramètres de l'équation différentielle dépendant de différents coefficients du transfert de chaleur et  $f(t)$  est une fonction qui dépend du temps  $t$ . Après avoir injecté la quantité  $Q_H$  (équation (III.39)), la transformation des équations précédentes est exigée pour pouvoir appliquer l'approche de R-K d'ordre 4. La structure du programme de calcul ensuite exige la saisie des valeurs d'entrées (c.à.d. les données météorologiques du lieu, les valeurs des paramètres thermo-physiques, le temps maximal, ...) pour la phase d'exécution. Durant cette dernière, les coefficients de transfert de chaleur par convection et évaporation, la quantité de distillat, et la différence de température se calculent avec ou sans l'effet du terme radiatif  $\sigma A_s \varepsilon (T_s^4 - T_c^4)$ .

# Chapitre IV

## Résultats & discussion

### *Résumé :*

L'ensemble des résultats obtenus et leurs interprétations et des comparaisons avec des travaux antérieurs vont constituer ce dernier chapitre. L'évolution de températures, la production d'eau distillée, les différentes efficacités thermiques et l'effet de design (effet de la surface d'évaporation et gap entre étages) seront exposés selon la modélisation 0 D dans le cas des systèmes solaires, à savoir le distillateur solaire à double pente passif, actif et multi-étages. En outre, une attention particulière sera accordée à l'analyse énergétique et exergétique.

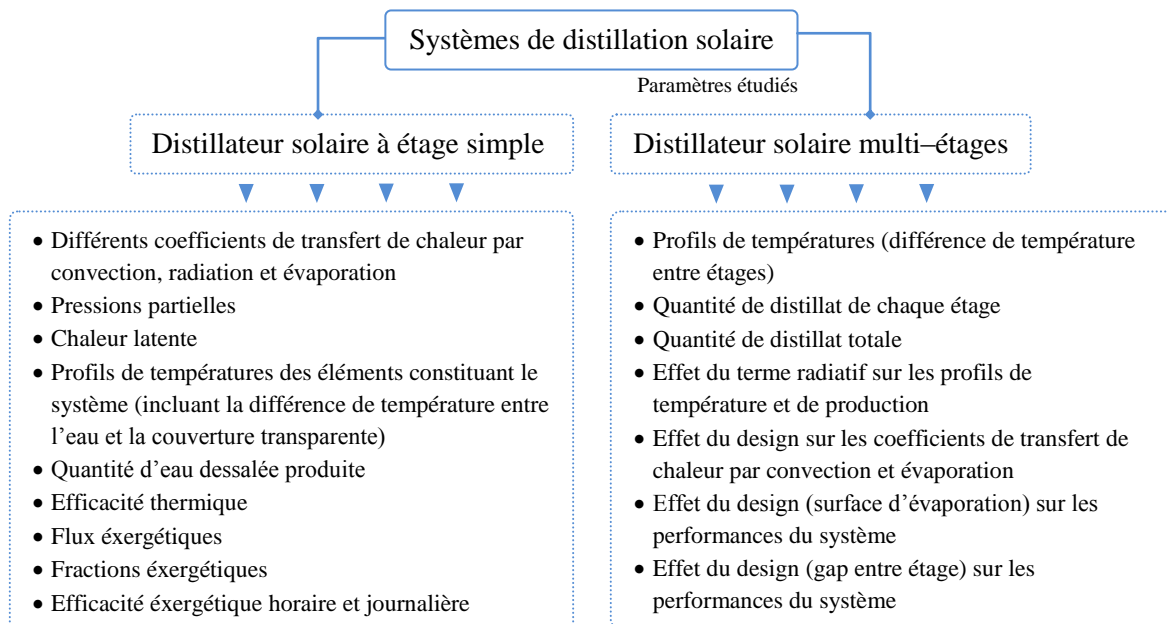


### IV.1. Introduction

Dans le présent chapitre, les résultats obtenus pour une variété de systèmes de distillation solaires, à savoir le distillateur solaire à double pente fonctionnant en mode passif et un autre actif basant sur l'approche **0 D** ont été analysés. Une deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des résultats numériques pour le cas d'un distillateur solaire multi-étages. Les résultats des évolutions de température et la production de masse d'eau distillée de chaque étage et enfin, la production totale du système sont discutés. Toujours, il est important d'indiquer que l'objectif essentiel prévu de ces systèmes est de produire de l'eau potable à l'aide d'une source d'énergie disponible et non polluante (c.à.d. *l'énergie solaire*).

### IV.2. Paramètres étudiés

Dans cette partie de ce travail, l'analyse des présents systèmes solaires (simple ou multiples étages) peut être faite sur la base de l'investigation de plusieurs paramètres brièvement schématisés dans la figure ci-dessous (**Fig. IV.1**).



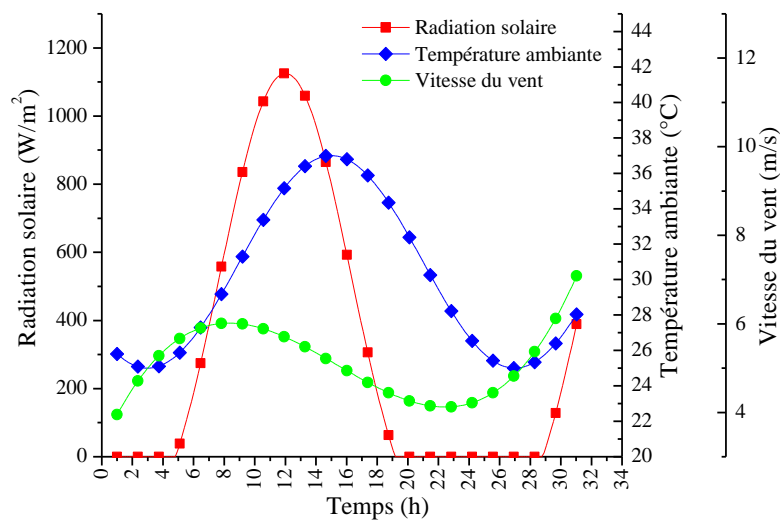
**Fig. IV.1.** Paramètres étudiés pour systèmes simples et multi-étages.

### IV.3. Résultats et interprétation

#### IV.3.1. Systèmes de distillation solaire à étage simple

##### IV.3.1.1. Radiation solaire, température ambiante et vitesse du vent

La **Fig. IV.2** illustre la variation instantanée de la vitesse du vent, la température ambiante et du rayonnement solaire sous les conditions météorologiques à Batna (35°33'N, 6°11'E) pendant une journée à ciel clair du mois d'été. Le rayonnement solaire devrait être plus intense entre 12 : 00 et 13 : 00 et il a atteint environ 1100 W/m<sup>2</sup>, cependant, la température ambiante a atteint un maximum ~ 36 °C entre 14 : 00 et 15 : 00 et la vitesse du vent varie dans l'intervalle entre ~ 4 et ~ 7 m/s.

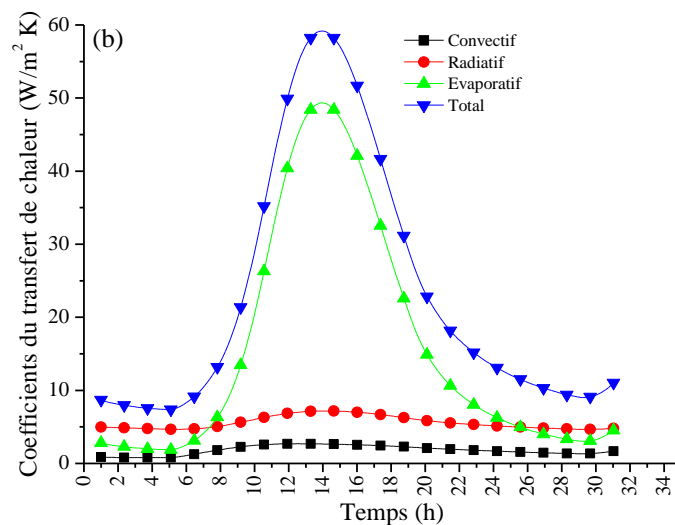
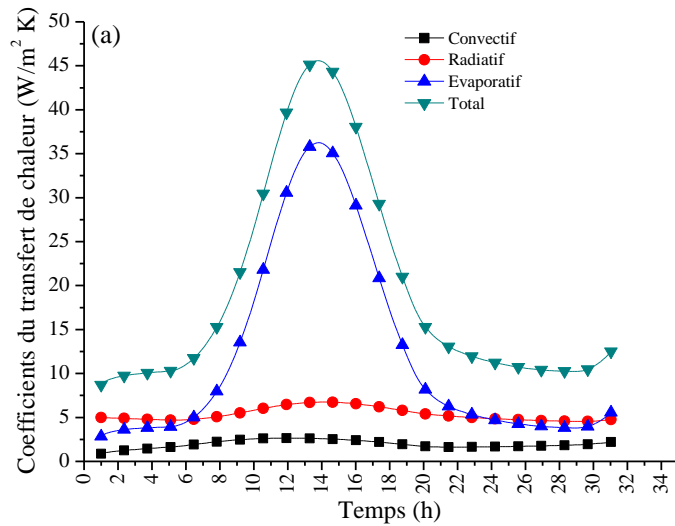


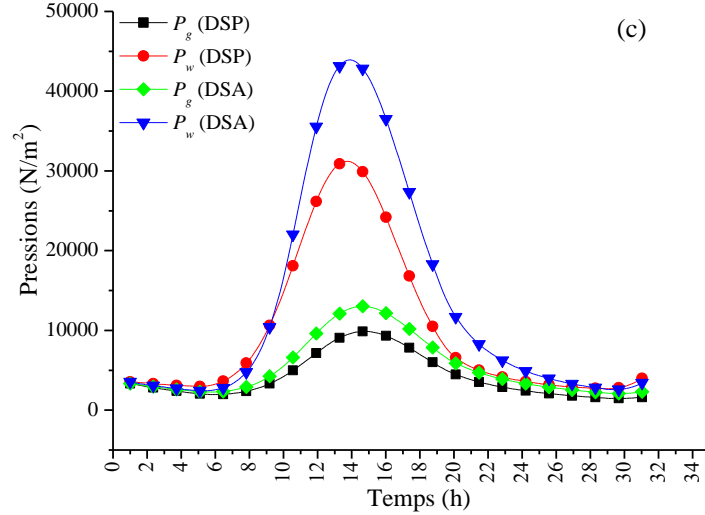
**Fig. IV.2.** Conditions climatiques.

##### IV.3.1.2. Distillateurs solaires passif et actif : Courbes des coefficients du transfert de chaleur et pressions

Les courbes des coefficients de transfert de chaleur (par convection,  $h_{c,w-g}$ , rayonnement,  $h_{r,w-g}$ , évaporation,  $h_{e,w-g}$  et transfert de chaleur total,  $h_t$ ), pressions pour différents modes de systèmes (distillateurs passif et actif) ont été présentées graphiquement dans l'ordre suivant : **Fig. IV.3a**, **3b** et **3c**. Les **Fig. IV.3a**, **3b** représentent les coefficients de transfert de chaleur pour les distillateurs solaires simple et modifié. De plus, les corrélations des coefficients de transfert de chaleur dans l'**Annexe 2** sont données par **Vaithilingam et Esakkimuthu (2014)**. D'après la **Fig. IV.3a**, les valeurs du coefficient de transfert de chaleur par convection varient entre environ 0,88 à 2,64 W/m<sup>2</sup> K tout au long de la journée. Où, il est clair que, pour les coefficients de radiation et d'évaporation, augmentent de 4,70 à 6,74 W/m<sup>2</sup> K et de 2,83 à

36,34 W/m<sup>2</sup> K, respectivement. Le coefficient de transfert de chaleur total,  $h_t$  est compris entre 8,70 et 47,58 W/m<sup>2</sup> K. Par contre, les coefficients thermiques calculés pour système couplé sont entre 0,88 et 2,69 W/m<sup>2</sup> K, entre 4,65 et 7,18 W/m<sup>2</sup> K, 2,00 – 47,33 W/m<sup>2</sup> K et 7,00 – 59,18 W/m<sup>2</sup> K, à la fois pour le coefficients de chaleur convective, de rayonnement, d'évaporation et total, comme indiqué dans la **Fig. IV.3b**. De plus, les pressions partielles de l'eau et de la couverture ont également été illustrées à l'aide de la **Fig. IV.3c**. D'après cette figure, les valeurs de pression partielle d'eau sont significativement importantes par rapport aux valeurs obtenues en cas de la pression partielle de couverture. Les couples suivants de pressions maximales prévues pour le système actif (~ 43927, ~ 13010 N/m<sup>2</sup>) et ceux pour le système passif (~ 312089, ~ 9867 N/m<sup>2</sup>) qui correspond l'après midi (14 : 00).



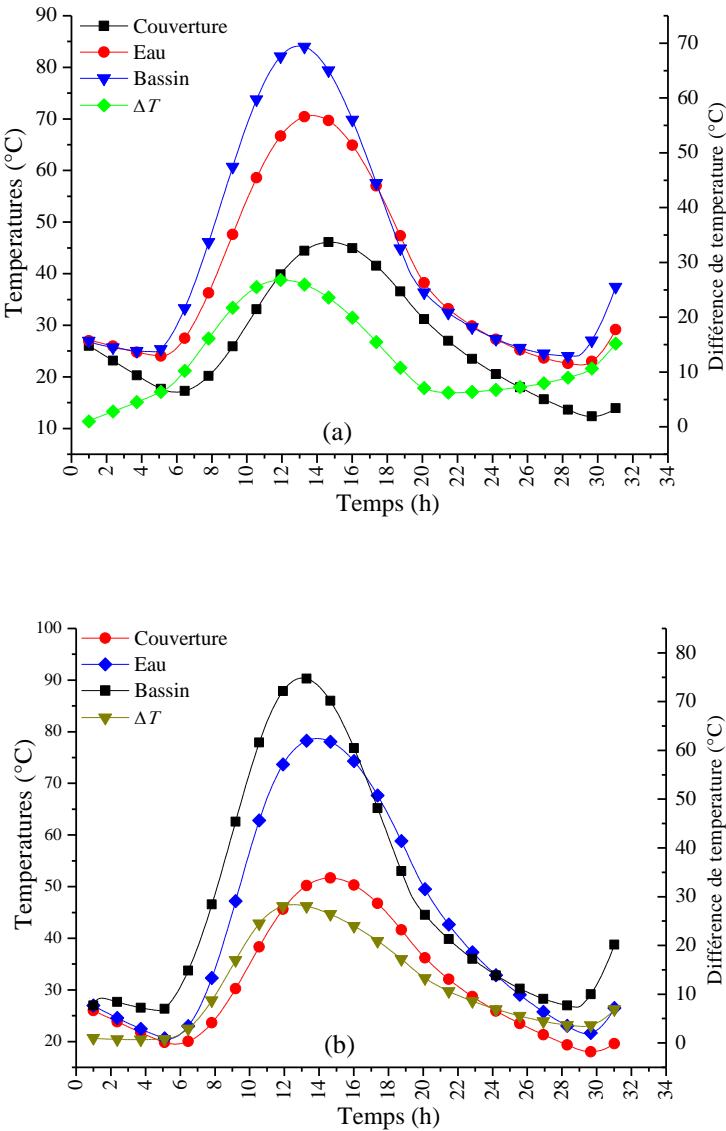


**Fig. IV.3.** Variation horaire des coefficients de transfert de chaleur et pressions pour les distillateurs passif et actif.

#### IV.3.1.3. Distillateurs solaires passif et actif : Profils de températures

Comme indiqué précédemment, les températures de chaque élément des conceptions destinés à la de distillation sont actualisées après chaque pas de calcul. Les valeurs de température d'entrée du bassin, de l'eau et de la couverture de verre utilisées pour démarrer le processus de calcul sont respectivement 27 °C, 27 °C et 26 °C. Il est à noter que la donnée initiale de la température de la couverture est inférieure à celle du bassin et de l'eau afin d'éviter le cas indéterminé. L'équation qui prédit le gain d'énergie utile (**Équation III.11**) du capteur solaire a été utilisée pour modéliser le distillateur solaire actif. L'amélioration des performances du système solaire passif (distillateur sans source de chaleur supplémentaire) est due à deux raisons importantes, telles que l'intégration du capteur solaire à l'installation de purification et les bonnes caractéristiques optiques du bassin d'eau (absorptivité) et de la couverture (bonne transmissivité du rayonnement solaire, faible réflectivité dans l'ambiance). Tous ces facteurs permettent de juger le bon fonctionnement du système actuel. La **Fig. IV.4** décrit la variation instantanée de la température de différents éléments, à savoir le bassin ( $T_b$ ), l'eau ( $T_w$ ), le verre ( $T_g$ ) et la différence de température ( $T_w - T_g$ ) pour les différents systèmes solaires. Les variables temporelles ont été simulées pour une journée chaude du mois d'été. Les profils instantanés de chaque élément ayant la même tendance. La température de chaque composant atteinte sa valeur maximale entre 13 : 00 et 14 : 00. Les performances thermiques de l'unité de distillation active (**Fig. IV.4b**) ont également été comparées à celles d'un système conventionnel. Par exemple, on observe que la température atteigne ~ 83 °C (**Fig. IV.4a**) du bassin dans le cas du système simple et sa température d'eau atteinte est de

~ 70 °C. La température maximale atteinte par la vitre est d'environ 45 °C dans le cas du système conventionnel et augmente dans le cas du système intégré. Le système modifié a montré une augmentation significative de la température du bassin et de l'eau qui atteint environ 90 °C et 80 °C, respectivement. Les résultats obtenus de l'évolution des coefficients de transfert de chaleur sont en accord avec **Singh et al. (2013)** et **Al-Sulttani et al. (2017)**.



**Fig. IV.4.** Evolution de températures et de différence de température en chaque système : a) passif et b) actif.

*IV.3.1.4. Distillateurs solaires passif et actif : Production et efficacité*

La variation horaire de la performance, à savoir la quantité totale de distillat et de l'efficacité énergétique de dispositifs de dessalement solaire intégré et non intégré a été représentée graphiquement dans les **Figs. IV.5a** et **5b**. Comme indiqué ci-dessus, le collecteur tubulaire a un effet significatif sur l'augmentation de la température de l'eau à l'intérieur du

distillateur solaire et, par conséquent, la force motrice s'améliore pour obtenir un rendement considérable et cela peut être reflétée par les courbes de distillat ci-dessous. La production de distillat est plus élevée pour le système solaire combiné qu'un système simple. À la fin du processus de distillation, la **Fig. IV.5b** indique une productivité quotidienne totale de la conception actuelle pouvant atteindre  $\sim 4 \text{ kg/m}^2$ , mais elle est inférieure à celle du système conventionnel atteignant environ  $2,77 \text{ kg/m}^2$  (**Fig. IV.5a**). Cependant, la production horaire maximale est d'environ  $0,80 \text{ kg/m}^2$  et de  $0,54 \text{ kg/m}^2$  pour le système amélioré et non amélioré, respectivement. Par conséquent, la production d'eau distillée a été améliorée d'environ  $44,40 \%$ . Une tendance similaire de la production horaire dans les deux cas a été observée, comme indiqué dans l'investigation expérimentale de **Dwivedi et Tiwari (2010a)**. L'efficacité instantanée pour les deux configurations a également été illustrée sur la **Fig. IV.5c**. On peut constater que l'efficacité du système modifié augmente jusqu'à  $\sim 80 \%$  et ceci en raison de la température de l'eau élevée, tandis qu'elle est inférieure pour le dispositif conventionnel qui atteint  $\sim 40 \%$ . La tendance de l'efficacité temporelle atteinte est similaire à celle obtenue par **Singh et al. (2013)**.

Concernant la source de chaleur supplémentaire (CT), la détermination du coefficient de transfert de chaleur par convection sur sa surface externe dont l'équation est donnée par  $h_{vent} = (4,22 - 0,00257 \cdot T_m) \cdot \frac{V_{vent}^{0,633}}{D_o^{0,637}}$  a été adoptée par **Ogueke et al. (2009)**, où elle est donnée sous forme d'équation linéaire pour le cas d'un collecteur plat par **Duffie et Beckman (2013)**. La **Fig. IV.6** montre la non linéarité du coefficient de transfert de chaleur par convection dans le cas du CT à cause de la forme d'équation précédente. Il est peut être constaté que ce coefficient s'augmente plus rapidement que celui pour le CP. Ainsi, le **Tableau III.1** démonstratif présente des comparaisons entre le coefficient global de pertes de chaleur d'un collecteur plat (CP) et tubulaire (CT) calculés dans un intervalle de vitesse du vent variant entre  $1$  à  $5 \text{ m/s}$ . La référence de **Agbo et Okoroigwe (2007)** montre que les valeurs prédites du coefficient global de pertes de chaleur pour un collecteur solaire de type plat varient entre  $7$  et  $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Pour un collecteur incliné de  $0^\circ$  de l'horizontal, le coefficient précédent varie entre  $\sim 5,5$  et  $\sim 7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Même tendance a été observée concernant le cas du collecteur tubulaire mais la variation est marginale c.à.d. de  $\sim 1,67$  à  $\sim 2,05 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

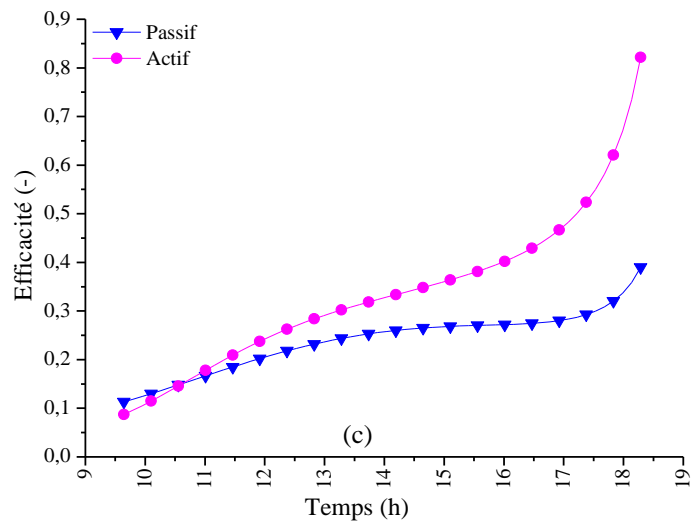
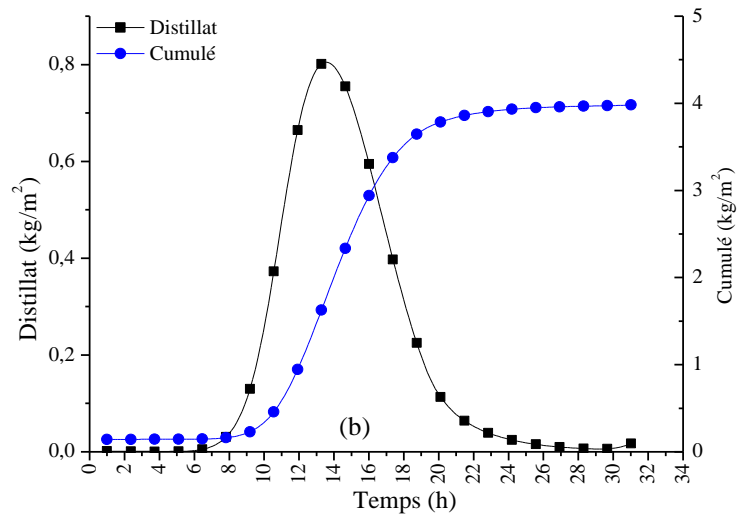
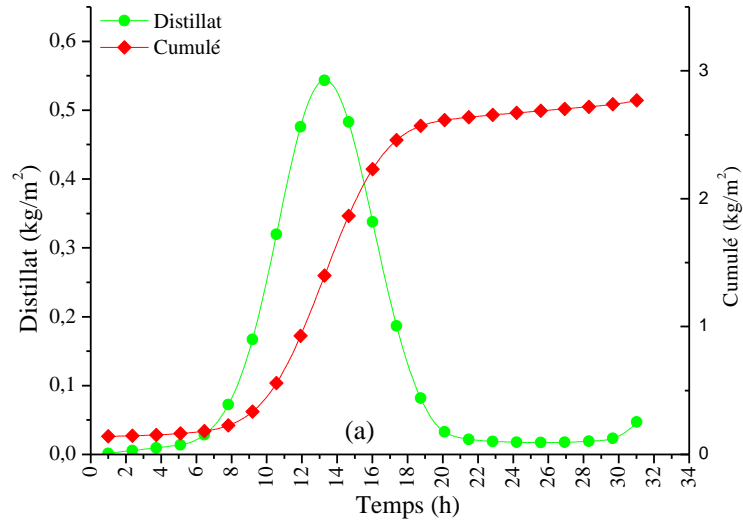


Fig. IV.5. a,b) Variation temporelle de distillat pour systèmes passif et actif, c) Efficacité.

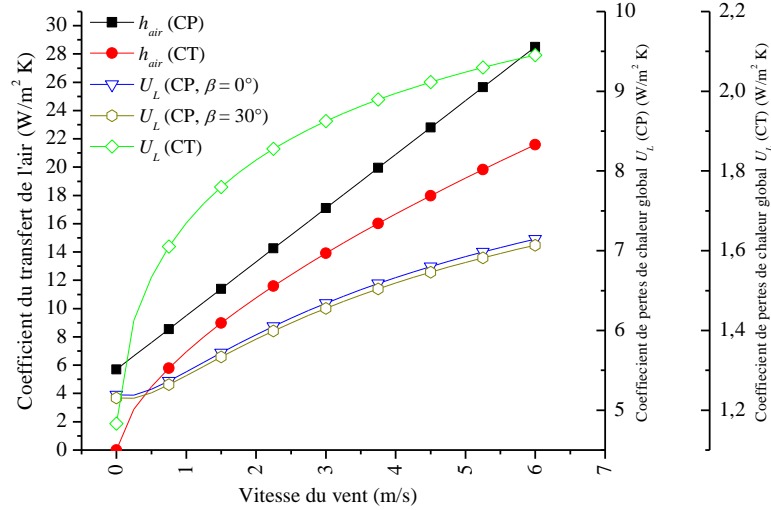


Fig. IV.6. Coefficient de pertes de chaleur global pour les systèmes CP et CT.

Tableau IV.1. Coefficient de pertes de chaleur dans le cas d'un collecteur plat et circulaire.

Résultats d'Agbo et Okoroigwe (2007)	Résultats du présent travail		
	$V_{vent}$ (m/s)	$U_L$ (W/m <sup>2</sup> K) (CP, $\beta = 0^\circ$ )	$U_L$ (W/m <sup>2</sup> K) (CT)
Le coefficient global de pertes de chaleur d'un collecteur plat a été évalué d'être varié de 7 à 8 W/m <sup>2</sup> K dans l'intervalle de vitesse du vent de 1 à 5 m/s.	1	5,48192	1,66967
	2	5,94613	1,8273
	3	6,3409	1,92492
	4	6,66272	1,99451
	5	6,92624	2,04785

- *Cas de la littérature*

En effet, et d'après la littérature, l'utilisation d'un tube spiral utilisé comme un échangeur de chaleur, en tenant compte de la variation du débit de fluide dans une unité de dessalement solaire a récemment été analysé par **Hosseini et al. (2017)**. Cette étude est basée sur deux axes : tout d'abord le chauffage de l'eau a été effectué à travers un appareil de chauffage électrique intégré pour que l'eau chaude passerait, ensuite par un échangeur de chaleur à conduit spiral au moyen d'une pompe. De plus, d'autres techniques ont été utilisées, notamment l'incorporation de plaques de forme spirale et d'épaisseur mince et des files sous forme de ressort dans l'échangeur de chaleur. Les résultats ont indiqué que le fait de considérer ces éléments dans les tests, les performances du système de dessalement s'améliorent. De plus, les rendements ont été comparés à ceux d'un simple tube spiralé et on peut en conclure que la quantité du distillé a été maximal pour une température d'eau élevée provenant de l'échangeur thermique. Dans le même contexte, **El-Sebaï et al. (2008)** ont



précédemment analysés numériquement un mécanisme de distillation solaire combine à un bassin solaire externe. Ce dernier est assemblé à une conduite spirale et directement raccordé au bassin du distillateur solaire. La variation de la profondeur de l'eau dans le distillateur et le débit massique ont été choisis pour prendre plusieurs valeurs. Les calculs numériques ont montré qu'une amélioration de la productivité a été observée avec 0,03 m de couche d'eau et 0,0009 kg/s de circulation du fluide. La production et l'efficacité moyenne annuelle dans le cas du système modifié ont été obtenues de 52,36 % and 43,80 %, respectivement. En outre, **Kumar et al. (2014)** ont mené une étude sur un distillateur solaire intégré avec un collecteur à tube évacué. Les systèmes couplés ont été testés dans le cas des circulations d'eau naturelle et forcée. Cette dernière a provoqué une température d'eau du bassin suffisamment élevée (90 °C) en raison de l'augmentation du débit massique jusqu'à 0,06 kg/s, ce qui a effectivement eu une influence sur les températures. Sur la base de cette étude, les auteurs ont recommandé de faire fonctionner le système actif avec un écoulement forcé à une valeur optimale du débit (entre 0,06 – 0,07 kg/s) afin de faire d'éviter l'ébullition de l'eau dans le bassin. La productivité totale sous cette condition (écoulement forcé) est de 3,9 kg/m<sup>2</sup>.

#### *IV.3.1.5. Distillateurs solaires passif et actif : Analyses énergétique et exergetique*

Les équations, à savoir **(III.18)** à **(III.30)** sont des expressions explicites des flux d'énergie thermique et exergetique d'évaporation, de convection et de rayonnement en fonction de la différence de température ( $\Delta T = T_w - T_g$ ) entre l'eau et la couverture et divers coefficients de transfert de chaleur. Les trois modes d'exergie thermique ont été évalués sur une période de 24 heures, comme les **Figs. IV.7a** et **7b** le montrent. Il est évidemment que ces modes dépendent de la différence de température  $\Delta T$ . Dans le cas d'un distillateur solaire traditionnel, on peut lire sur le graphique que les valeurs maximales d'évaporation, de convection et d'exergie de rayonnement sont respectivement de l'ordre de 25,6, 6,84 et 3,2 W/m<sup>2</sup>, autour de 14 : 00, alors que le système amélioré donne des valeurs de ~ 45, ~ 9 et ~ 5.25 W/m<sup>2</sup>. Selon les résultats obtenus, il est clair que l'augmentation de la température de l'eau a un effet significatif sur l'amélioration de l'exergie d'évaporation et que la différence de température  $\Delta T$  a affecté les paramètres énergie–exergie et leurs comportements. De plus, il est intéressant de noter que les taux d'exergie convective et surtout radiative ont tendance à être négligés. Les résultats obtenus sont en accord avec **Sarhaddi et al. (2017)** et **Zoori et al. (2013)**.

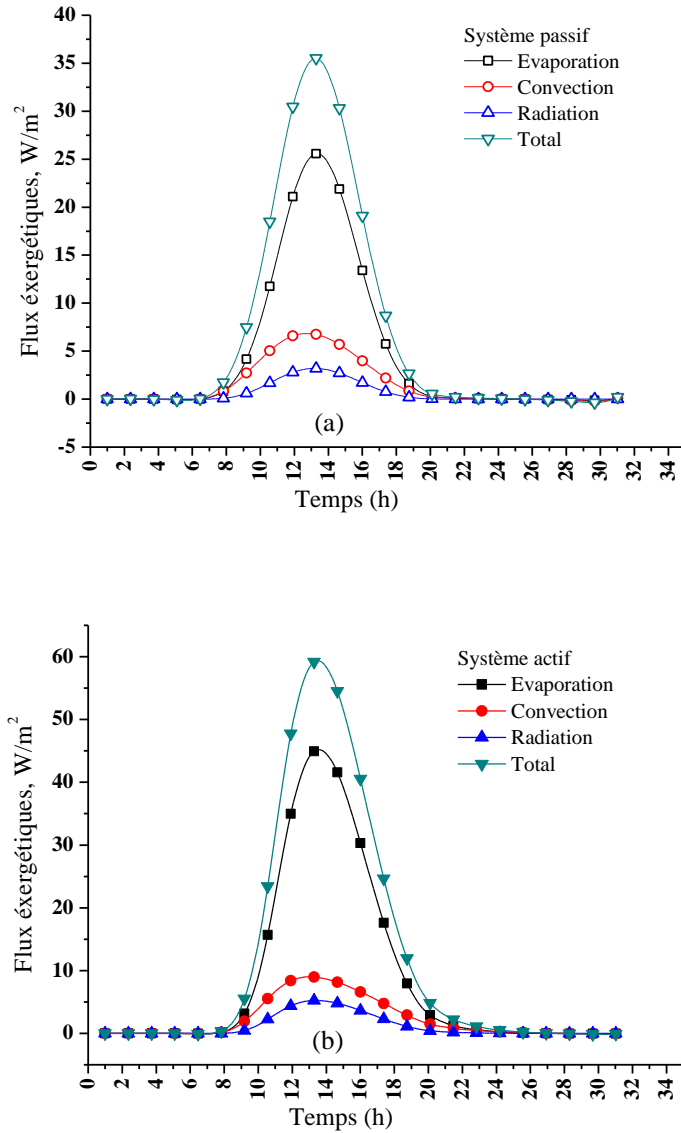
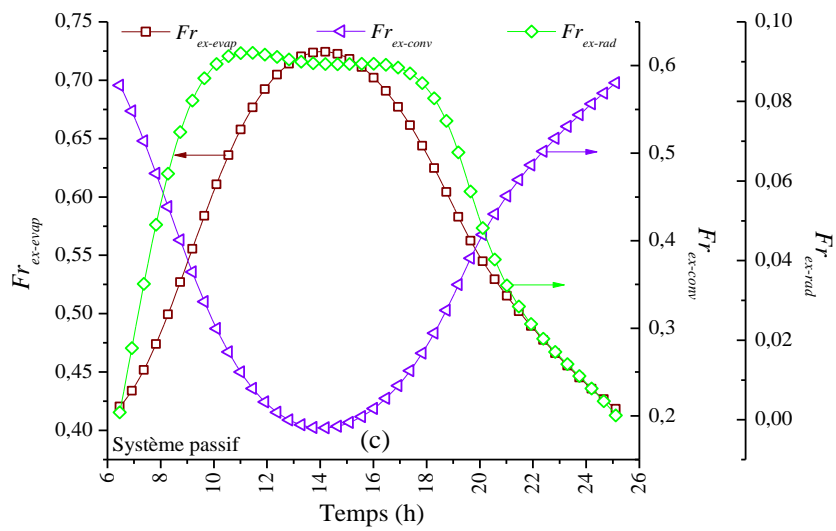
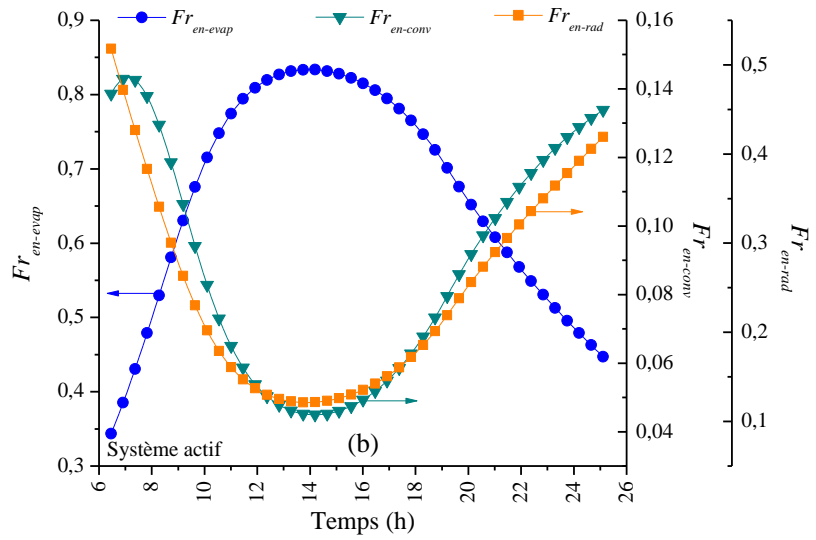
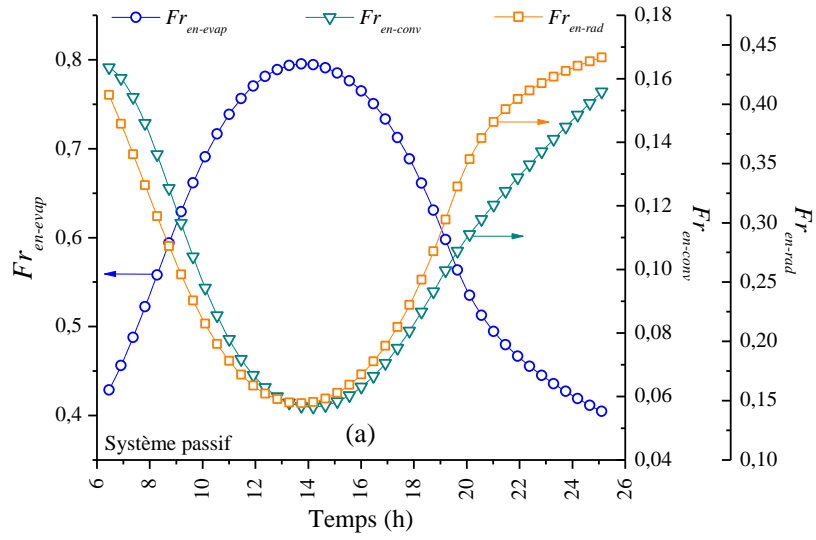


Fig. IV.7. Flux exergétiques pour systèmes : a) passif et b) actif.

La Fig. IV.8 illustre les courbes des fractions d'énergie et d'exergie horaires (Équations (25) à (30)). Dans les Figs. IV.8a et 8b, la fraction d'énergie d'évaporation indique des valeurs plus élevées parmi les autres fractions (c.à.d. par *convection* et *radiation*). La fraction d'évaporation énergétique maximale obtenue vers 14 : 00 est  $\sim 0,79/\sim 0,83$  en cas du distillateur solaire combiné/non combiné. Dans le même temps, la fraction d'énergie radiative varie d'environ de 0,15 à environ 0,44 et de 0,12 à 0,52, respectivement, pour les configurations solaires active et passif. Figs. IV.8c et 8d sont les évolutions instantanées de trois modes d'exergie fractionnaires. On peut remarquer que la fraction d'exergie radiative met en évidence un effet négligeable par rapport aux autres fractions. Cependant, l'exergie fractionnelle de convection et d'évaporation (Figs. IV.8c et IV.8d) doivent être élevées et permettent de meilleures performances des systèmes solaires (Sarhaddi et al., 2017).



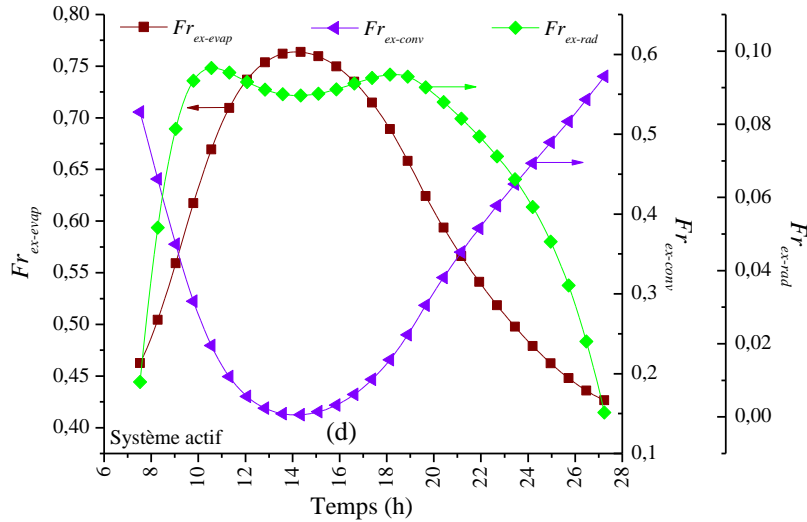
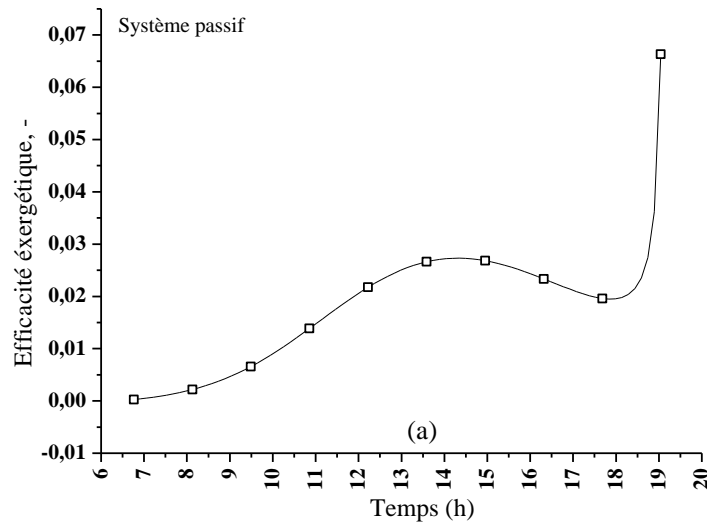


Fig. IV.8. Fractions : a,b) énergétiques et c,d) exergétiques des systèmes passif et actif.

Les équations (III.32) et (III.35) représentent la variation instantanée de l'efficacité exergétique durant les périodes du jour pour différentes configurations solaires, et elles sont calculées et représentées graphiquement dans la Fig. IV.9. Il est clair que l'unité de distillation solaire active présente une performance exergie améliorée par rapport à celle du mode solaire passif. Cela signifie que l'efficacité horaire exergétique s'est révélée d'être la plus élevée pour l'unité solaire améliorée et atteint jusqu'à ~ 11 % (Fig. IV.9b). Cependant, le système fonctionnant en mode passif a montré un maximum d'environ 7 % (Fig. IV.9a).



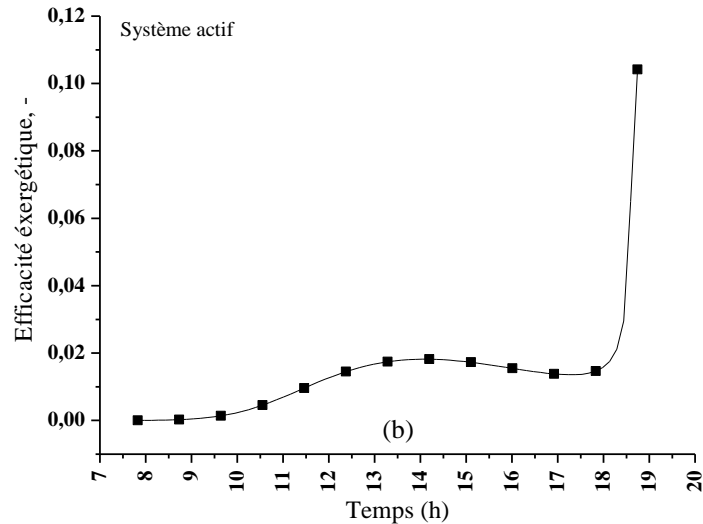


Fig. IV.9. Efficacités exergetiques des systèmes : a) passif et b) actif.

#### IV.3.1.6. Comparaisons

La performance exergetique des systèmes étudiés a été comparée avec d'autres résultats de travaux numériques et expérimentaux (voir **Tableau IV.2**). Comme il est montré, le système fonctionnant en mode actif montre un taux d'exergie meilleur que celui en mode passif.

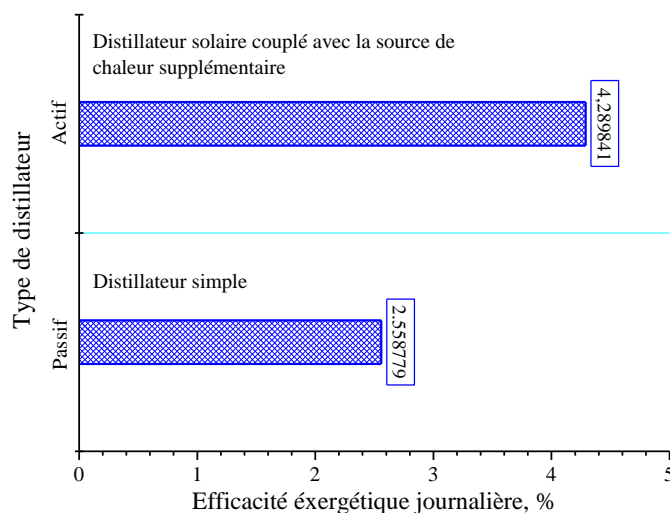
**Tableau IV.2.** Comparaisons avec différents travaux de la littérature.

Système mené/Type (Théo./Exp.)	Résultats	Réf.
<b>Systèmes passifs</b>		
D.S. à une seule pente (Théo. et Exp.)	L'efficacité exergetique journalière du système passif varie entre 0,4 – 0,5 % en augmentant l'épaisseur de la couche d'eau dans le bassin.	<b>Kumar et Tiwari (2008)</b>
D.S. à double pente (Théo. et Exp.)	L'efficacité exergetique journalière du système passif a atteint 1,031 %.	<b>Rajaseenivasan et al. (2014)</b>
D.S. à double pente (Théo.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'efficacité exergetique horaire maximale peut atteindre ~ 7 %.</li> <li>▪ L'efficacité exergetique journalière du système passif a atteint ~ 2,56 % (<b>Fig. IV.10</b>).</li> </ul>	<b>Présent travail</b>
<b>Systèmes actifs</b>		
D.S. à une seule pente couplé avec un collecteur solaire plate (Théo. et Exp.)	L'efficacité exergetique journalière du système hybride photovoltaïque varie entre 2,24 – 2,6 % en augmentant l'épaisseur de la couche d'eau dans le bassin.	<b>Kumar et Tiwari (2008)</b>
D.S. à double pente couplé avec un collecteur solaire plate (Théo. et Exp.)	L'efficacité exergetique globale du système a atteint 1,16 %.	<b>Dwivedi et Tiwari (2010b)</b>

D.S. à double pente couplé avec CT (Théo.)

- L'efficacité exergetique horaire maximale du système peut atteindre ~ 11 %.
- L'efficacité exergetique journaliere du système passif a atteint ~ 4,29 % (**Fig. IV.10**).

**Présent travail**



**Fig. IV.10.** Efficacité exergetique journaliere.

### IV.3.2. Système de distillation solaire à étages multiples

#### IV.3.2.1. Variation temporelle de la différence de température entre étages

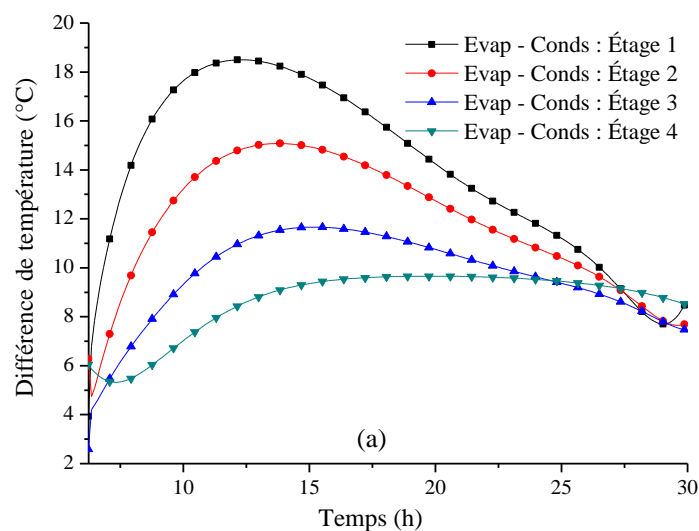
La **Fig. IV.11** illustre la variation horaire de la différence de température entre étages dans un système à quatre étages successifs. La variation de la température a été tracée sur une période plus de 24 heures (le système est déjà supposé bien isolé de l'ambiance). Étant donné que l'énergie solaire est transmise au capteur, le fluide circulant dans l'échangeur de chaleur serpentin augmente considérablement la température de l'eau de la chambre du fond plat (1<sup>er</sup> étage le plus bas), l'étage supérieur nécessitant de la chaleur pouvant être fournie par la chaleur de condensation de la chambre inférieure (toujours le 1<sup>er</sup> étage). Les étages métalliques en pente oblique servent comme des surfaces de condensation. Sur la même **Fig. IV.11**, il est clairement constaté que la température de l'eau dans chaque étage diminue lorsque nous allons verticalement jusqu'au dernier étage (4<sup>ème</sup> étage).

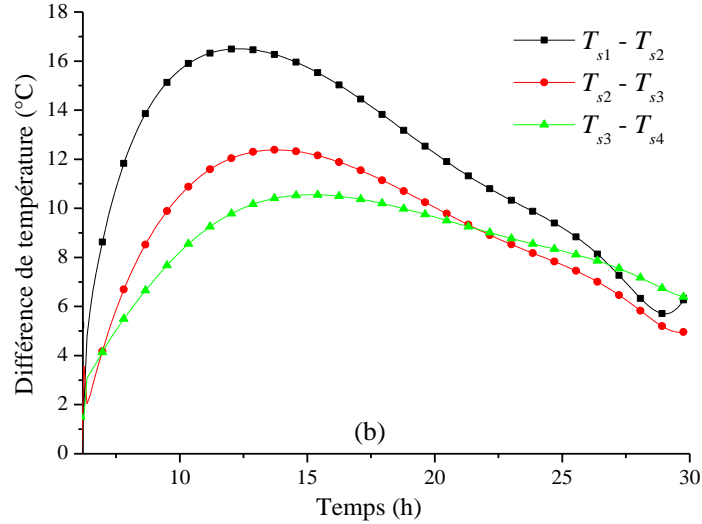
Pendant la période du levé de soleil, la température maximale de l'eau atteint par le premier, deuxième, troisième et quatrième étage est de ~ 80,96 °C, ~ 66,18 °C, ~ 54,43 °C et ~ 43,98 °C, ce qui correspond à une intensité maximale de rayonnement solaire de 971,22 W/m<sup>2</sup>. La présente unité de distillation à plusieurs étages ayant une température d'eau

maximale qui peut être atteinte à  $\sim 80,96$  °C et cette valeur peut être comparée à celle rapportée dans la littérature (**Reddy et al., 2012 ; Shatat et Mahkamov, 2010**).

Les auteurs précédents ont mené des tests expérimentaux sur des systèmes de distillation solaires à étages multiples, où ils ont trouvé que la température de l'eau (notamment dans le 1<sup>er</sup> étage) est haute situant entre 80 et 100 °C. Les différences de température maximales (entre la surface d'évaporation et de condensation) obtenues entre les plateaux à double pente pendant le processus de chauffage pour le présent système sont de  $\sim 18,50$  °C,  $\sim 15,08$  °C,  $\sim 11,66$  °C et  $\sim 9,66$  °C (**Fig. IV.11a**). De même, pour les différences de températures de l'eau ( $T_{si+1} - T_{si}$ ) entre étages ont été présentées dans la **Fig. IV.11b**. Leurs valeurs calculées sont de  $\sim 16,49$  °C,  $\sim 12,13$  °C et  $\sim 9,91$  °C. On peut également observer que la tendance des courbes actuelles est similaire à celle obtenue par **Adhikari et Kumar (1993)**, **Singh et al. (2012)** et **Schwarzer et al. (2009)**.

La forme des étages et leur effet sur la production du système a été récemment étudié expérimentalement par **Abdessemed et al. (2019)**. Le système proposé est similaire à celui analysé dans le présent travail, tandis que dans l'investigation d'**Abdessemed et al. (2019)**, l'unité de distillation est alimentée à l'aide de trois types de source de chaleur, à savoir un collecteur solaire de type cylindro parabolique, une résistance électrique et déchets végétaux. Les auteurs ont conclu que la forme 'V' des plateaux montre une amélioration de la performance et ainsi que le système est économiquement raisonnable.





**Fig. IV.11.** a) Variation temporelle des températures d'évaporateurs–condenseurs dans chaque étage, b) Variation temporelle de différence de température entre étages.

#### IV.3.2.2. Variation temporelle du distillat dans chaque étage

Pour avoir une idée claire sur les performances du système, la **Fig. IV.12** montre séparément la quantité cumulative d'eau distillée produite par chaque étage. On peut constater que dans les premières heures de la journée, la productivité du distillat augmente avec un rythme lent, en raison du rayonnement solaire qui est le paramètre environnemental le plus influent sur le rendement des distillateurs solaires (**Arslan, 2012**). Sur la base de la **Fig. IV.12** et pendant le fonctionnement de l'unité de dessalement, le premier étage contribue de manière importante à la production de la plus grande quantité de distillat, tandis que la quantité accumulée d'eau dans le second étage est considérablement plus importante, par rapport à celui obtenu par le troisième et quatrième étage ; ils produisent le moins d'eau distillée en raison de la basse température dans ces plateaux. Comme le montre la **Fig. IV.12**, la productivité totale du condensat pour chaque étage est de 5,02 kg/j pour le premier étage, 2,19 kg/j, 1,06 kg/j et 0,59 kg/j pour le deuxième, troisième et quatrième étage, respectivement. On peut facilement constater que le dernier plateau (étage 4) contient le moins d'eau pure, comparativement à l'étage inférieur (étage 1) qui capte de l'énergie d'alimentation  $Q_H$  d'une manière privilégiée.



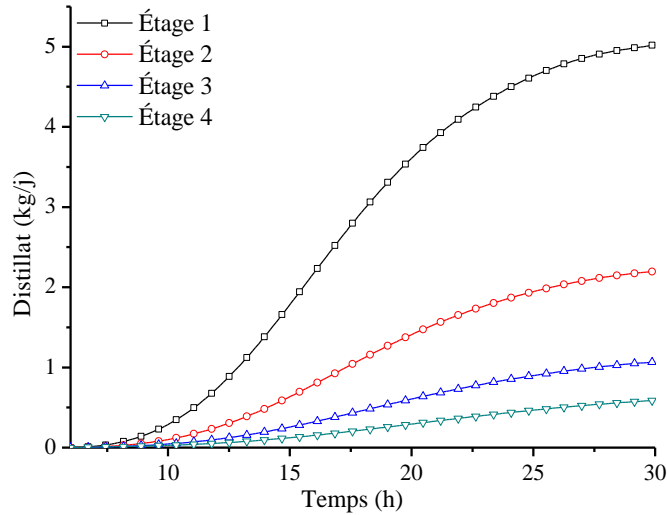


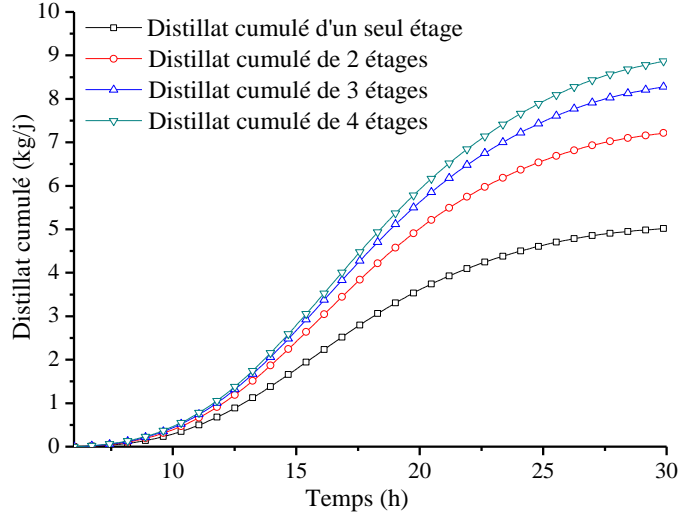
Fig. IV.12. Distillat cumulé de chaque étage.

#### IV.3.2.3. Variation temporelle du distillat cumulé (total)

La Fig. IV.13 indique le rendement cumulatif en distillats du 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> étage, ainsi que de tous les étages en fonction du temps. Tout d'abord, il convient de noter que le rayonnement solaire et le nombre d'étages ont un effet sur l'augmentation/la diminution de la production d'eau distillée. Il est clair que sur la Fig. IV.13, le premier étage (ou le système ayant un seul étage) a une productivité de masse de  $\sim 5,02$  kg/j.

Les productions cumulatives de distillat entre le troisième et quatrième étage sont légèrement proches les unes aux autres en raison de la faible production du dernier étage (étage 4). Cependant, le rayonnement solaire diminue progressivement au-delà de 14 : 00, on constate une certaine augmentation du distillat accumulé due à l'existence d'une différence de température entre les étages. Comme le montre la Fig. IV.13, le rendement total cumulé en distillat après le processus de distillation pour la première étape est de  $\sim 5,02$  kg/j,  $\sim 7,22$  kg/j pour le premier et deuxième étage,  $\sim 8,29$  kg/j pour le premier, deuxième et troisième étage.

Finalement, la quantité totale de production de l'ensemble du système est de  $\sim 8,88$  kg/j. Une valeur atteignant 8,88 kg/j du distillat total peut être comparée à celle obtenue expérimentalement par Shatat et Mahkamov (2010) qui ont eu une valeur de 9 kg/j. L'explication de la faible différence entre les deux approches réside probablement dans le changement des conditions géographiques locales et de fonctionnement du système de distillation.



**Fig. IV.13.** Distillat cumulé des quatre étages.

#### IV.3.2.4. Effet du terme radiatif sur la température et la quantité du distillat

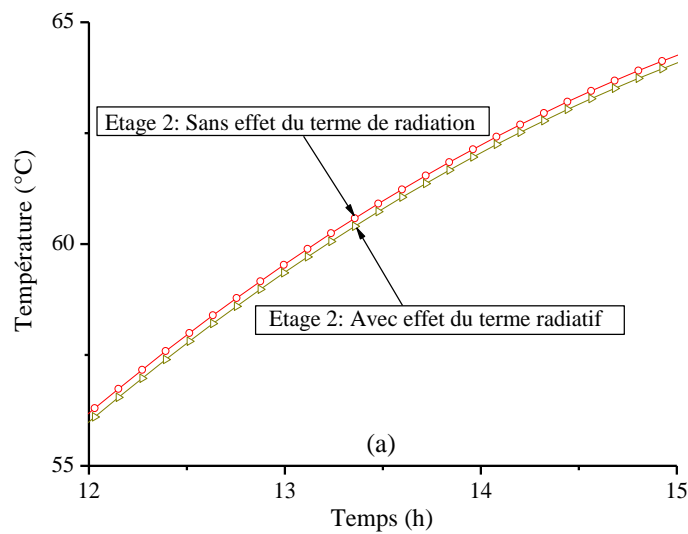
Dans cette partie du travail, un cas intéressant a été analysé concernant l'effet du terme de rayonnement  $\sigma A_s \varepsilon (T_s^4 - T_c^4)$  sur les profils de productivité de la masse en distillat et de la température, qui se produit entre la surface de condensation et l'eau contenant chacun des plateaux adjacents. Premièrement, ce terme peut principalement être représenté par la différence entre la température de condensation,  $T_c$  et la température de l'eau,  $T_s$  (différence de température entre la surface de l'eau et de condensation a été illustrée dans la **Fig. IV.11**).

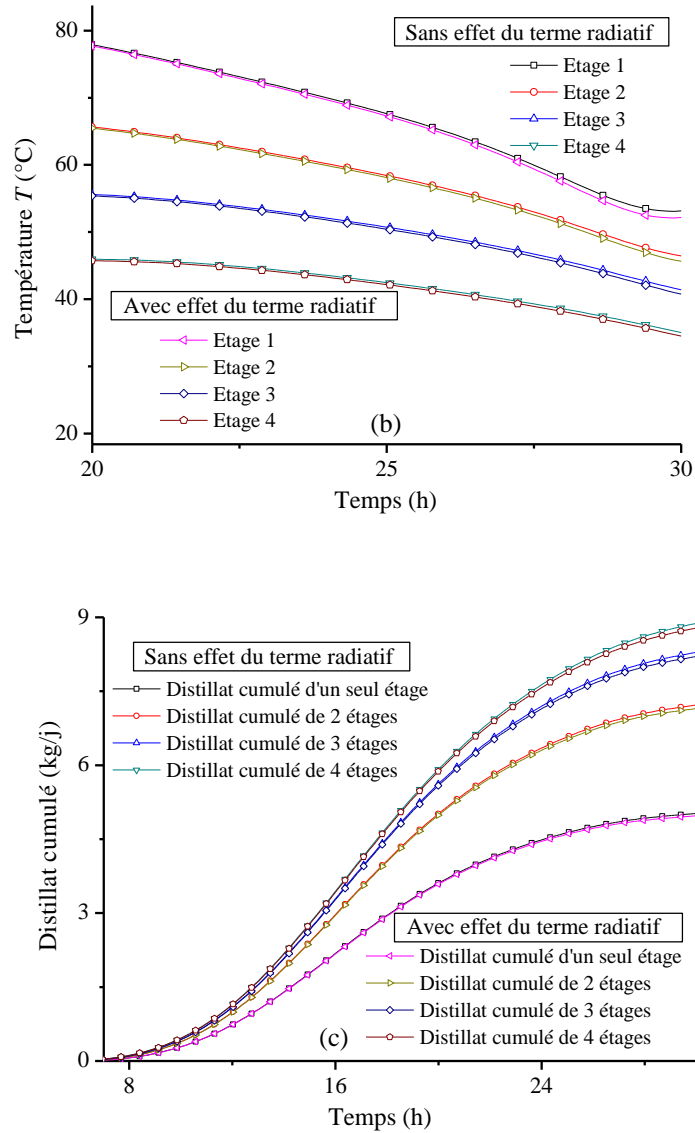
La température de l'eau est calculée initialement pour chaque étage à partir des équations **(III.38)** et **(III.40)**. En effet, l'équation **(III.38)** implique effectivement le calcul de la source d'alimentation en chaleur  $Q_H$  à partir de l'équation. **(III.39)** qui dépend de la formule de la température de sortie d'eau (équation **(III.39)**) pour un seul capteur  $T_{SC-s}$ , où  $T_{SC-s}$  repose essentiellement sur le calcul du rayonnement solaire. L'expression entière de ce terme peut être donnée par la différence entre la température de l'étage et la température de la surface de condensation (augmentée par : la surface de l'étage, le facteur d'émissivité, le coefficient de Stefan-Boltzmann,  $\sigma$ ).

Le terme précédent (peut être additionné au deuxième membre des équations **III.38** et **III.40**), son effet sur ces équations est présenté graphiquement dans les figures suivantes : **Figs. IV.14a**, **14b** et **14c**. Une vue détaillée (**Fig. IV.14a**) a été prise en premier lieu, pour un étage arbitraire (étage 2) et pour tous les étages dans la **Fig. IV.14b**, qui fournissent une

information sur le comportement des courbes de température dans les deux cas étudiés : avec et sans effet de rayonnement pour des intervalles de temps différents. On peut facilement voir que les profils de température ont tendance à coïncider les uns avec les autres et même pour le graphe d'eau distillée (**Fig. IV.14c**). Selon la même figure (**Fig. IV.14**), les courbes de l'effet du rayonnement se situent au-dessous des courbes correspondant à l'absence de ce terme. De même, il s'agit de la même tendance pour la productivité de l'eau distillée.

De plus, dans la **Fig. IV.14**, la coïncidence des courbes (que ce soit température ou distillat) nous fournit une information intéressante autour d'une faible différence entre avec ou sans le terme de rayonnement observée à la fin du processus de distillation. Il est possible de voir sur le graphe de la **Fig. IV.14c** les différences suivantes (différence de productivité de distillat en kg/j) : pour un seul premier étage : 0,05 kg/j, pour deux étages : 0,07 kg/j, pour trois étages 0,09 kg/j et enfin pour tous les étages : 0,1 kg/j. Ces valeurs obtenues montrent clairement l'effet négligeable du terme de rayonnement thermique sur les profils de distillat et de température. En conséquence, ce terme peut généralement être négligé (**Ahmed et al., 2009**).





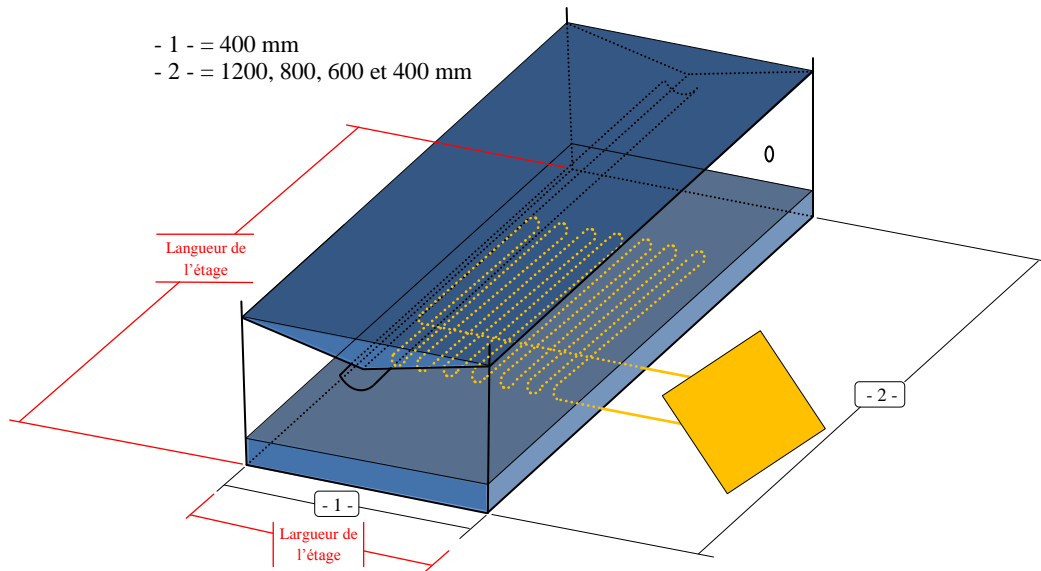
**Fig. IV.14.** Influence du terme radiatif sur : a,b) profils de température, c) distillat cumulé.

#### IV.3.2.5. Analyse variationnelle du design

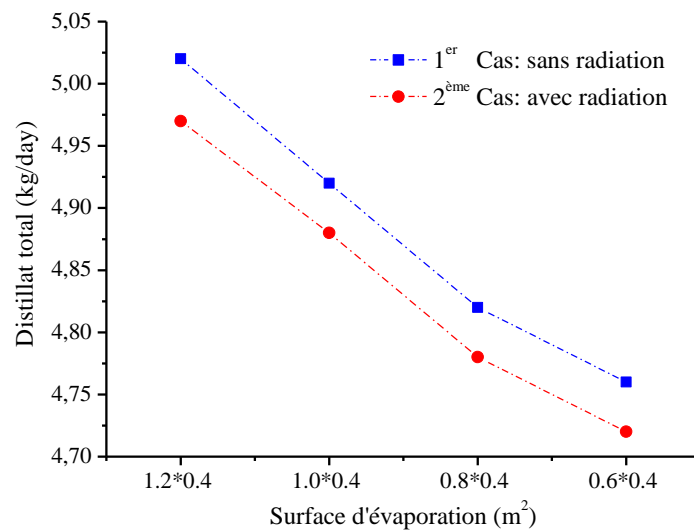
##### IV.3.2.5.1. Effet d'augmenter la surface d'évaporation

Une analyse variationnelle du design a été menée pour observer son effet sur la performance du système (rendement en distillat). L'analyse de l'effet de la variation de la surface d'évaporation, en considérant valeurs, à savoir  $1,2 \times 0,4 \text{ m}^2$ ,  $1,0 \times 0,4 \text{ m}^2$ ,  $0,8 \times 0,4 \text{ m}^2$  et  $0,6 \times 0,4 \text{ m}^2$  (**Fig. IV.15**). Sur la base des calculs numériques traitant cette situation, il est intéressant de mentionner que l'augmentation de la surface d'évaporation tend à augmenter la quantité de distillat. Par exemple, la production de distillat peut ainsi atteindre une valeur de  $4,76 \text{ kg/j}$  pour une surface de  $0,6 \times 0,4 \text{ m}^2$  (sans tenant compte l'effet du terme

radiatif). Cependant, si l'on augmente jusqu'à  $1,2 \times 0,4 \text{ m}^2$ , le rendement en condensat atteint une valeur de  $5,02 \text{ kg/j}$ . En considérant l'effet du terme radiatif, les quantités du distillat diminuent légèrement et elles atteignent respectivement  $4,72 \text{ kg/j}$  et  $4,97 \text{ kg/j}$ . On peut aussi constater que la réduction de la superficie entraîne une baisse de la productivité comme l'indique la **Fig. IV.16**. On peut aussi remarquer que pour des surfaces d'évaporations inférieures à  $1 \text{ m}^2$ , le volume cumulatif du distillat varie de manière quasi linéaire.



**Fig. IV.15.** Variation de la surface d'évaporation (1<sup>er</sup> étage du système).

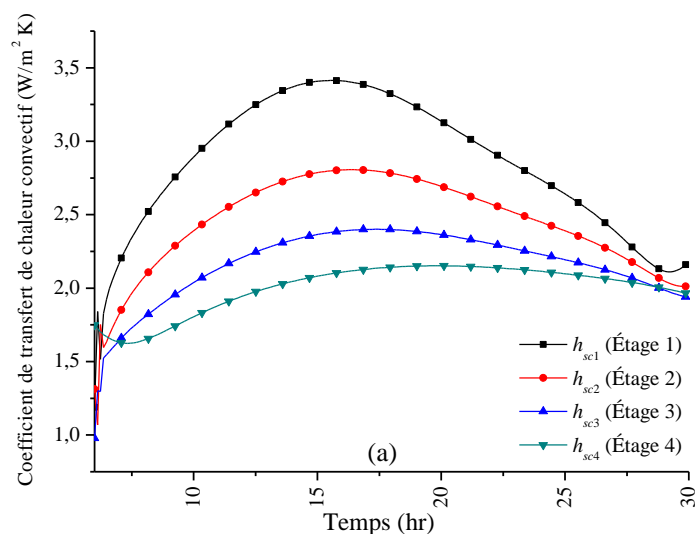


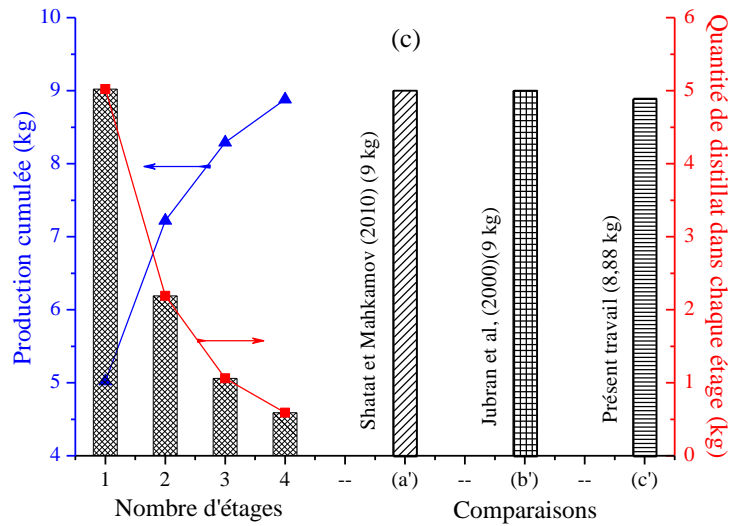
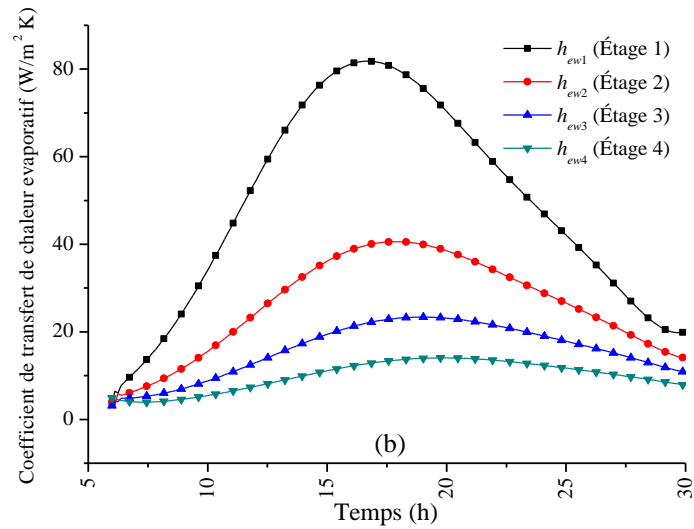
**Fig. IV.16.** Distillat total en fonction de la surface d'évaporation (1<sup>er</sup> étage du système).

#### IV.3.2.5.2. Coefficients de transfert de chaleur et comparaisons

La variation instantanée des coefficients de transfert de chaleur par convection et par évaporation exprimés au moyen des équations (III.43) et (III.48) pour un distillateur solaire à quatre étages est illustrée sur les Figs. IV.17a et 17b. Les équations précédentes (c.à.d. III.43 et III.48) dépendent essentiellement du terme de différence de température ( $T_{si} - T_{ci}$ ). Ces coefficients marquent donc de faibles valeurs, dans le dernier étage (étage 4). Par contre, les valeurs sont considérablement importantes au niveau du premier étage. Ainsi, le plateau inférieur a un coefficient de transfert de chaleur par convection important qui peut atteindre l'après midi du jour environ  $3,41 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , tandis que, le dernier étage exhibe une valeur de  $\sim 2,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Le même cas est observé pour le coefficient de transfert de chaleur par évaporation qui atteint une valeur de  $\sim 80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  et  $\sim 14 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  pour le 1<sup>er</sup> et 4<sup>e</sup> étage, respectivement. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que le transfert de chaleur par évaporation est le plus dominant en comparaison avec celui par convection.

Dans la Fig. IV.17c, des comparaisons ont d'abord été effectuées entre la capacité de chaque étage à produire une certaine quantité d'eau distillée et puis la productivité totale est parallèlement comparée avec des travaux antérieurs. D'après la figure, l'augmentation du nombre d'étages de l'unité de distillation permet d'obtenir une quantité importante d'eau dessalée par rapport à celle atteinte en utilisant un seul (simple) étage (sous-section IV.3.1.4). Les simulations actuelles montrent un bon accord avec la littérature (travaux expérimentaux et numériques) de Shatat et Mahkamov (2010) et Jubran et al. (2000).



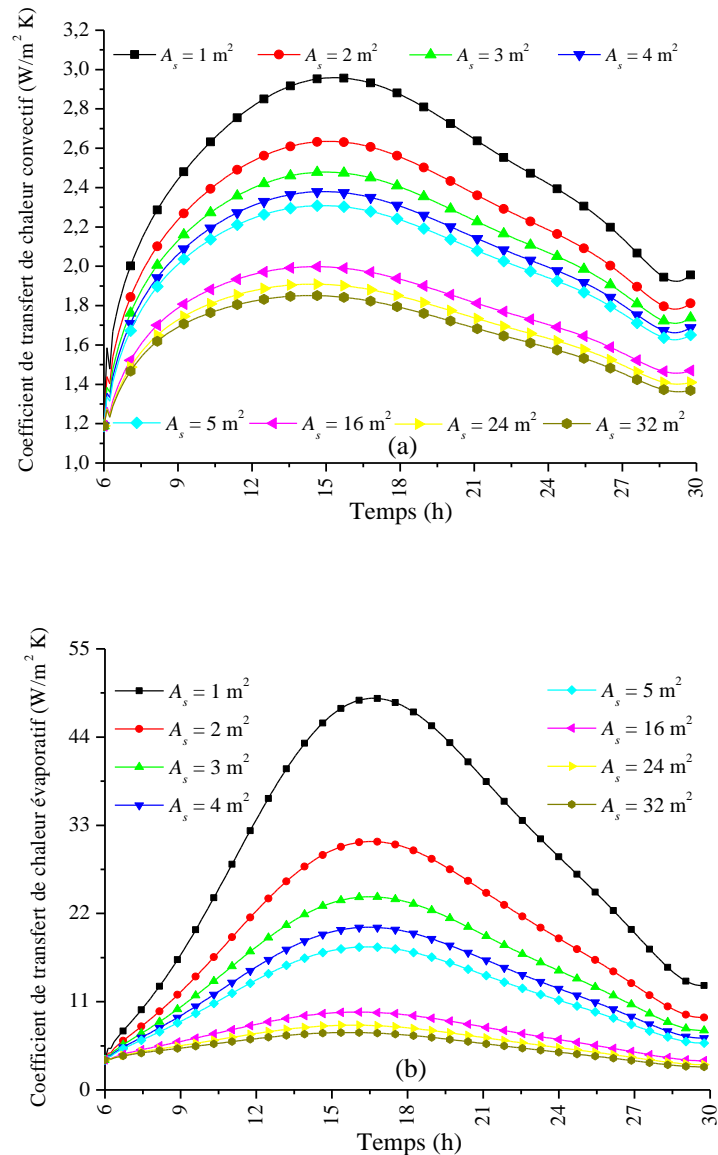


**Fig. IV.17.** Variation instantanée des coefficients de transfert de chaleur par : a) convection et b) évaporation (SE = 1,2 m × 0,4 m), c) comparaisons.

#### IV.3.2.5.3. Coefficient de transfert de chaleur convectif et d'évaporation en fonction de variation de la surface d'évaporation

Les figures ci-dessous (**Figs. IV.18a et 18b**) illustrent graphiquement la variation horaire des coefficients de transfert de chaleur par convection et évaporation. Ces derniers sont fortement affectés par la variation de la surface d'évaporation qui varie dans l'intervalle : 1, 2, 3, 4, 5, 16, 24 et 32 m<sup>2</sup>, en tenant en compte le premier étage comme échantillon de test. Comme indiqué précédemment, pour une surface d'évaporation fixe de 0,48 m<sup>2</sup> (valeur initiale), et ces coefficients étaient légèrement supérieurs (**Fig. IV.17**) à ceux du cas présent (**Fig. IV.18**), qui peuvent maintenant démontrer une chute lorsque cette surface s'augmente.

À titre indicatif, pour une surface d'évaporation de  $1 \text{ m}^2$ , le coefficient de transfert de chaleur par convection atteint  $\sim 2,95 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (**Fig. IV.18a**) alors que sa valeur précédente est de  $3,41 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Il en va de même pour le coefficient de transfert de chaleur par évaporation qui exhibe  $\sim 48,84 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (**Fig. IV.18b**) en comparaison à celle obtenue précédemment ( $\sim 80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  pour  $0,48 \text{ m}^2$  de surface).



**Fig. IV.18.** Dépendance des coefficients de transfert de chaleur : a) convectif et b) évaporatif de la surface d'évaporation.

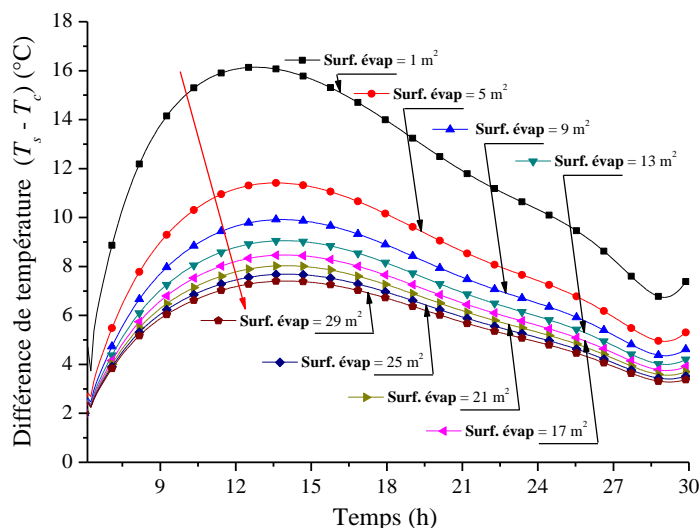
En continuant d'augmenter cette surface, une chute claire peut être observée. En effet, à partir de surfaces allant de  $1 \text{ m}^2$  à  $2 \text{ m}^2$ , de  $2$  à  $3 \text{ m}^2$  et de  $3$  à  $4 \text{ m}^2$ , une diminution significative des coefficients est évidente. Il est à remarquer que lorsque la surface d'évaporation augmente de  $5$  à  $32 \text{ m}^2$  (les courbes entre  $5$  et  $16 \text{ m}^2$ ,  $16$  et  $24 \text{ m}^2$ ,  $24$  et  $32 \text{ m}^2$



n'ont pas été tracées car les courbes coïncidaient entre elles). La même appréciation peut être projetée sur le coefficient de transfert de chaleur par évaporation.

#### IV.3.2.5.4. Effet de variation de la surface d'évaporation sur les profils de températures

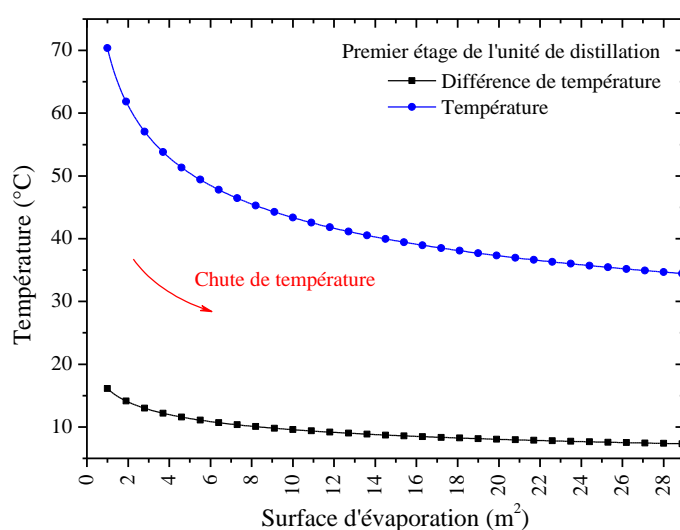
L'analyse des profils de températures sous l'effet de la surface d'évaporation comme paramètre de design a été effectuée sur une cellule de distillateur (le premier plateau du distillateur présenté dans le croquis de la **Fig. III.8**). L'ensemble des résultats a été graphiquement montré dans la **Fig. IV.19**. Il est important d'indiquer que selon le système d'axes  $xOz$ , même si on varie les valeurs des paramètres de longueur ( $L_s$ ) ou la largeur ( $w_s$ ) illustrés dans l'équation (**III.49**), c.à.d. en faisant varier la longueur de l'étage, et en même temps, en fixant sa largeur et vice versa, les résultats seront évidemment les mêmes (comme il est montré dans la **Fig. IV.19**). Afin de suivre l'effet de la surface d'évaporation, le premier aperçu peut être observé à partir de la même figure est que la variation instantanée de la différence de température diminue lorsque la surface augmente jusqu'à ce que les profils coïncident entre eux. La même figure montre clairement deux intervalles principaux de la surface d'évaporation quand il s'agit de  $1 \text{ m}^2 < SE < 5 \text{ m}^2$  et au-delà de  $5 \text{ m}^2$ . Dans le premier segment d'intervalle, la différence de température a diminué progressivement jusqu'à ce qu'il n'y a plus de diminution significative.



**Fig. IV.19.** Variation horaire de la différence de température (présence de l'effet de la surface d'évaporation (1<sup>er</sup> étage du système)).

Les résultats obtenus précédemment montrent une concordance avec ceux obtenus par **Kwatra (1996)** qui a montré qu'une surface d'évaporation de  $4 \text{ m}^2$ , qui représente l'optimum

dans le cas d'un distillateur solaire à étages multiples. Par ailleurs, la productivité du système pourrait être augmentée lorsque la surface d'évaporation atteint  $1,5 \text{ m}^2$  (Younas et al., 2016). Pour une simple configuration d'un distillateur solaire verticale, l'espace d'air entre la surface d'eau et de condensation (couverture) a été de  $0,20 \text{ m}$ . Par contre, la surface d'évaporation est de  $4 \text{ m}^2$  (Sharon et Reddy, 2015). La Fig. IV.20 ci-dessous montre clairement le cas traité afin de cibler l'intervalle de variation de la surface d'évaporation conduisant à une solution raisonnable pour la fabrication des distillateurs solaires. Par conséquent, il a été trouvé que la conception d'un système de distillation solaire doit faire partie d'une surface d'évaporation bien déterminée c.à.d.  $1 \text{ m}^2 < SE < 5 \text{ m}^2$ .



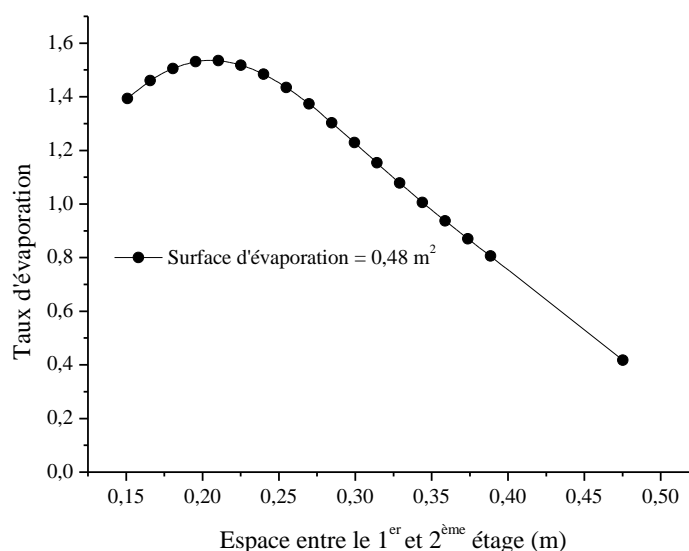
**Fig. IV.20.** Variation de température et de différence de température en fonction de la surface d'évaporation du 1<sup>er</sup> étage du système comme échantillon de test (système d'axes  $xOz$ ).

#### IV.3.2.5.5. Effet de variation du gap

Le présent modèle mathématique élaboré par Hongfei et al. (2002) et présenté dans la sous-section III.6.2.2 peut également prévoir la hauteur caractéristique optimale entre les étages empilés (entre la surface de l'eau et la surface de condensation, c'est-à-dire dans la direction de l'axe vertical  $Oy$  (Fig. III.9)) pour une meilleure production d'eau distillée. Pour cette raison, une tentative a été menée pour montrer la capacité de production d'eau pure en variant la distance verticale,  $x_1$  entre les chambres pleines (prenant le 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> étage comme un cas à tester) de  $0,15 \text{ m}$  à  $0,50 \text{ m}$  et d'un autre côté, pour fournir une image complète sur cette situation, la surface d'évaporation va ainsi prendre la valeur  $0,48 \text{ m}^2$ . Par conséquent, selon la Fig. IV.21, on peut constater que l'espace optimal tourne autour  $20 \text{ cm}$  ( $0,20 \text{ m}$ ) et si en considérant la valeur précédente de la surface d'évaporation, le taux d'évaporation

augmente d'environ 1,52 kg/h. Après cela, une diminution significative de ce paramètre (taux d'évaporation) est avoir lieu au-delà de 0,2 m.

Pour plus de clarté, une comparaison avec des résultats théoriques ou bien expérimentaux rapportés de la littérature sur différentes conceptions caractéristiques de distillateurs solaires à effets multiples est explicitement détaillée dans le **Tableau IV.3** ci-dessous.



**Fig. IV.21.** Effet de l'espace entre 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> étage (système d'axes  $Oy$ ).

**Tableau IV.3.** Comparaison avec les travaux antérieurs.

Auteur (s)/Année	Type de l'étude	Caractéristiques et résultats
<b>Shatat et Mahkamov (2010)</b>	Exp. et Théo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Distillateur solaire à étages multiples a été fabriqué.</li> <li>▪ Le collecteur solaire de type évacué a été couplé avec le distillateur.</li> <li>▪ L'unité de distillation consiste à quatre étages identiques sauf le 1<sup>er</sup> étage est de forme plat.</li> <li>▪ Les pertes de chaleur ont été considérées durant le fonctionnement du système.</li> <li>▪ La surface d'évaporation optimale obtenue est de 1 m<sup>2</sup>.</li> <li>▪ Selon les résultats obtenus, le nombre optimal des étages est compris entre 4 ou 5 étages.</li> </ul>
<b>Reddy et al. (2012)</b>	Exp. et Théo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Distillateur solaire ayant des étages à une seule pente a été construit.</li> <li>▪ Un collecteur solaire plat a été couplé avec l'unité de distillation.</li> <li>▪ Résultats : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre d'étages : 4 étages.</li> <li>• Espace entre étages : 0,1 m.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Reddy et Sharon (2016)</b>	Théo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Distillateur solaire à étages verticaux a été étudié numériquement.</li> <li>▪ Résultats : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre d'étages optimal : 5 étages.</li> <li>• Espace entre étages : 0,05 m.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Sharon et Reddy (2015)</b>	Théo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Distillateurs solaires verticaux l'un ayant une seule pente et l'autre possède une double pente ont été étudié numériquement.</li> <li>▪ L'espace entre la surface d'évaporation et l'eau saline est de 0,20 m, tandis que la surface d'évaporation est de 4 m<sup>2</sup>.</li> <li>▪ Le distillateur vertical à double pente donne un maximum de distillat journalier</li> </ul>

<b>Younas et al.</b> (2016)	Exp. et Théo.	<p>de 24,06 kg.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Application de l'analyse économique sur un distillateur solaire couplé avec un concentrateur.</li> <li>▪ Le système peut produire jusqu'à 10 kg/m<sup>2</sup> par jour correspondant à un climat chaud, tandis que pour des conditions climatiques froides, la production est de 4,8 kg/m<sup>2</sup> par jour.</li> <li>▪ Autres résultats : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Production maximale de 10 kg à une surface d'évaporation de 1.5 m<sup>2</sup>.</li> <li>- Production journalière de 10,6 kg/m<sup>2</sup> correspondant à un espace entre étages de 0,1 m.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Ahmed et al.</b> (2009)	Exp. et Théo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Un distillateur solaire à trois étages a été étudié expérimentalement.</li> <li>▪ La production journalière de l'unité est de 14,2 kg.</li> <li>▪ L'espace entre étages a été simulé dans l'intervalle de 26 cm à 36 cm.</li> <li>▪ La production se diminue au-dessus de 26 cm d'espace d'air.</li> </ul>
<b>Le présent cas</b>	Théo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le distillateur solaire à 4 étages a été étudié numériquement.</li> <li>▪ Un collecteur solaire de type plat à été couplé avec le système.</li> <li>▪ Les pertes de chaleur ont été négligées en même temps l'effet du terme radiatif a été considéré.</li> <li>▪ Résultats : <ul style="list-style-type: none"> <li>- La surface d'évaporation optimale obtenue varie entre 1 à 5 m<sup>2</sup>.</li> <li>- La distance optimale entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> étage est de 0,2 m.</li> </ul> </li> </ul>

---

## Conclusion générale

## Conclusion générale

Le présent travail est une étude numérique des performances de plusieurs types de systèmes de dessalement à petite et à grande échelle qui sont connus par leurs capacités de production de l'eau douce, basés sur l'énergie solaire comme source d'alimentation. Après avoir effectué notre étude, nous avons tiré les résultats suivants :

- **Utilisation de la modélisation 0 D (Systèmes de distillation solaire à petites échelles simples)**
  - Les performances énergétiques d'un nouveau système de distillation solaire (système actif) ont été analysées et comparées avec un système de même type à simple fonctionnement.
  - Le concept énergetique a été appliqué sur les deux mécanismes pour évaluation.
  - Les résultats montrent que le système actif proposé performe plus efficacement que celui fonctionnant en mode passif.
  - Le système de distillation couplé a démontré une amélioration du taux d'évaporation à cause de l'augmentation de la différence de température entre l'eau et la couverture.
  - L'efficacité énergetique journalière a été estimée pour les deux mécanismes et comparée avec ceux obtenues de la littérature.
  - L'utilisation de ces distillateurs dans les zones rurales et désertiques à forte insolation solaire reste demandée, afin de résoudre certains problèmes posés par le manque d'eau douce dans ces régions.
  - Pour avoir un bon fonctionnement des deux systèmes, et l'obtention d'un bon rendement, il est vivement recommandé de fournir une bonne maintenance pour assurer une durée de vie plus longue.
  - Le système actif proposé peut constituer une réponse au problème de la pénurie d'eau, particulièrement pour des régions isolées ou éloignées (un nombre moyen d'individus d'une famille).
- **Performance d'un système de distillation solaire à grande échelle (Distillateur solaire multi-étages)**
  - Les performances thermiques d'un distillateur solaire multi-étages (ayant quatre étages) ont été examinées.
  - Une étude paramétrique a été menée a pour but de constater l'effet du design sur le fonctionnement de ce système.

- L'effet du terme radiatif sur la variation temporelle de température et de distillat a été analysé.
- L'effet des paramètres ci-dessus a été graphiquement illustré.
- Il est observé que le terme radiatif a une influence insignifiante.
- Il est constaté que l'augmentation de la surface d'évaporation engendre simultanément une chute de différence de température et donc une chute remarquable des coefficients de transfert de chaleur par convection et évaporation.
- L'analyse variationnelle montre que : **(1)** pour des **valeurs maximales** de la surface d'évaporation, l'effet sera faible sur la différence de température entre étages. **(2)** la productivité du système se diminue tout en augmentant la distance entre les plateaux (gap entre étages).
- Le système de distillation solaire multi-étages présente une capacité de production supérieure à celle obtenue par un mécanisme simple.
  - **Autres paramètres affectant la productivité de ces systèmes**
- La production d'un distillateur dépend étroitement aussi bien de la quantité de chaleur qu'il reçoit, que de la différence qui existe entre la température de l'eau à l'intérieur du bassin et celle de la couverture transparente sachant que la distance entre la saumure et la surface de condensation doit être raisonnable.
- L'amélioration de la production est d'autant plus assurée par l'augmentation de la température de l'eau et de l'absorbeur tout en diminuant la température extérieure de la couverture. Plusieurs techniques ont eu lieu dans des recherches scientifiques, parmi lesquelles l'accélération de la vitesse de l'air circulant sur la face externe de la couverture ou le refroidissement de la couverture transparente elle-même en utilisant un écoulement d'eau. Tous ces procédés restent à réaliser avec de moindres coûts.
- Pour pouvoir améliorer le rendement, il est conseillé de renforcer l'isolation thermique de ces systèmes pour minimiser les déperditions thermiques vers le milieu externe.

- **Future recommandations**

Il serait judicieux et intéressant de poursuivre cette thèse en utilisant l'outil expérimental et la CFD en exploitant les logiciels de simulation multi-physiques comme ANSYS Fluent, Comsol, pour mener des simulations numériques sur les phénomènes multiphasiques dans les systèmes de distillation solaire. La finalité est de comprendre les mécanismes diphasiques dans ces dits systèmes et de les contrôler en vue de promouvoir leurs performances thermo-mécaniques.

# Annexes



## Corrélations des coefficients de transfert de chaleur par convection, évaporation et radiation

Les coefficients du transfert de chaleur apparus dans les équations du **Chapitre III**, sont exprimés ci-dessous selon la référence de **Vaithilingam et Esakkimuthu (2014)** comme suit :

Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation,  $h_{e,w-g}$  (ou parfois noté par :  $h_{ew}$ ) entre l'eau saline et la couverture transparente est donné par la formule suivante :

$$h_{e,w-g} = 0,016273 \cdot h_{c,w-g} \cdot \left( \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right)$$

$$\text{Avec : } P_g = \exp \left\{ 25,317 - \frac{5144}{T_g + 273} \right\} \text{ et } P_w = \exp \left\{ 25,317 - \frac{5144}{T_w + 273} \right\}$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection,  $h_{c,w-g}$  (ou parfois noté par :  $h_{cw}$ ) est donné par :

$$h_{c,w-g} = 0,884 \cdot \left( T_w - T_g + \left\{ \frac{(P_w - P_g) T_w}{268,9 \cdot 10^3 - P_w} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Le coefficient de transfert de chaleur par radiation,  $h_{r,w-g}$  (ou parfois noté par :  $h_{rw}$ ) est donné par :

$$h_{r,w-g} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot (T_w^2 + T_g^2) \cdot (T_w + T_g)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par radiation,  $h_{r,g-a}$  entre le milieu externe et la couverture est :

$$h_{r,g-a} = \frac{\varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_{sky}^4)}{T_g - T_{sky}}$$

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$$

Où, le coefficient de transfert de chaleur par convection,  $h_{c,g-a}$  entre les même milieux est exprimé par :

$$h_{c,g-a} = 5,7 + 3,8 \cdot v$$

La dénomination de chaque paramètre dans les équations ci-dessus a été définie dans la partie nomenclature.

## Applications des nanoparticules suspendues des fluides de base (eau) dans les systèmes de distillation solaire

### A2.1. Introduction

La technologie du ‘nano’ a occupé beaucoup de domaines scientifiques tels que la médecine, l’énergie, l’agriculture, etc. basant sur la dispersions de particules de taille nanométrique (typiquement inférieure à **100 nm**), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d’en améliorer certaines propriétés. Dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d’évaluer le potentiel d’échange thermique est la conductivité thermique. Les fluides les plus employés en ingénierie tels que l’eau, l’huile d’engin ou l’éthylène glycol ne disposent que d’une conductivité thermique faible par rapport à ceux dopés par des solides cristallins. Avec les nanofluides, l’idée est alors d’insérer, au sein du fluide de base, des nanoparticules afin d’augmenter sa conductivité thermique effective du mélange. En effet, le terme ‘nanofluide’ a été lancé par le Laboratoire National d’Argonne (**ANL**) (**Yu et al., 2007**) et qui reste couramment utilisé pour désigner ce type de suspensions. L’idée d’adjonction de fluides par des particules solides n’est pas nouvelle, mais l’utilisation des nanomatériaux ont potentiellement minimisé des problèmes rencontrés dans l’industrie avec des particules de taille plus élevée.

### A2.2. Transfert de chaleur en nanofluides

Les efforts visant à améliorer les transferts thermiques dans de nombreuses applications, sont en voie déjà de développement. L’un d’eux consiste à utiliser de nouveaux fluides capables d’accroître ces transferts, c’est le cas des nanofluides. Le transfert de chaleur en nanofluides conduit à explorer et présenter leurs propriétés thermo-physiques, à savoir la chaleur spécifique,  $C_{nf}$ , la masse volumique,  $\rho_{nf}$ , la viscosité dynamique,  $\mu_{nf}$ , la conductivité thermique,  $k_{nf}$  et la dilatation thermique,  $\beta_{nf}$ . Les caractéristique thermo-physiques sont profondément modifiées notamment en présence des nanoparticules. Les paramètres caractérisant ces nanoparticules c.à.d. la nature de la nanoparticule utilisée, sa taille, sa forme, fraction volumique (ou concentration),  $\varphi$  ont un effet significatif sur les paramètres du fluide à base de nanoparticules. En effet, le **Tableau** utile **A.2.1** présente les propriétés thermo-physiques (corrélations) sur la base des modèles mathématiques développés

antécédemment gouvernant les nanoparticules suspendues des fluides de base (eau) alimentant un système de distillation assisté par l'énergie solaire.

### **A2.3. Type de nanoparticules utilisées en distillation solaire**

À travers plusieurs contributions scientifiques publiées traitant le comportement des nanofluides dans diverses situations, cela a ouvert la voie à l'introduction de cette nouvelle classe de fluides dans les systèmes de distillation solaire. À propos des nanomatériaux utilisés en distillation à base d'énergie solaire, **Madani et Zaki (1995)** ont analysé l'effet des microparticules du Carbone sur la performance d'un distillateur solaire à double pente. Après cela, d'autres investigateurs ont utilisé différents nanoparticules suspendues l'eau comme fluide de base, à savoir Oxyde d'Aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Oxyde de Zinc ( $\text{ZnO}$ ), Oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Oxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ), Dioxyde de Titane ( $\text{TiO}_2$ ), Oxyde de Cuivre ( $\text{CuO}$ ), Oxyde de graphène, Nanotubes de Carbone (**CNTs**), Graphite. Le **Tableau A.2.2** donne un aperçu sur des travaux publiés récemment basant sur l'utilisation des nanofluides en distillation solaire. Selon ces articles, la présence de nanofluides a effectivement amélioré le processus de distillation (augmentation du taux d'évaporation).

**Tableau A.2.1.** Expressions mathématiques des propriétés thermo-physiques des nanofluides (Sahota et Tiwari, 2016).

Paramètres	Expressions
Chaleur spécifique, $C_{nf}$	$C_{nf} = \frac{\varphi_p \rho_p C_p + (1 - \varphi_p) \rho_{bf} C_{bf}}{\rho_{bf}}; \varphi_p = \frac{V_p}{V_f + V_p}$
Conductivité thermique, $k_{nf}$	$k_{nf} = k_{bf} \left\{ 1 + 1,0112 \cdot \varphi_p + 2,4375 \cdot \varphi_p \cdot \left( \frac{47}{d_p(nm)} \right) - 0,0248 \cdot \varphi_p \cdot \left( \frac{k_p}{0,613} \right) \right\}$
Coefficient d'expansion, $\beta_{nf}$	$\beta_{nf} = (1 - \varphi_p) \beta_{bf} + \varphi_p \beta_p$
Viscosité dynamique, $\mu_{nf}$	$\mu_{nf} = -0,4491 + \left( \frac{28,837}{T_{nf}} \right) + 0,547 \cdot \varphi_p - 0,163 \cdot \varphi_p^2 + 23,653 \cdot \left( \frac{\varphi_p}{T_{nf}} \right)^2 + 0,0132 \cdot \varphi_p^3 - 2354,7 \cdot \left( \frac{\varphi_p}{T_{nf}^3} \right) + 23,498 \cdot \left( \frac{\varphi_p}{d} \right)^2 - 3,018 \cdot \left( \frac{\varphi_p^3}{d_p^2} \right)$ $11 \leq \varphi_p \leq 9 \quad ; \quad 13 \leq d_p \leq 130 \text{ nm} \quad ; \quad 20 \leq T \leq 70 \text{ } ^\circ\text{C}$
Densité, $\rho_{nf}$	$\rho_{nf} = \varphi_p \rho_p + (1 - \varphi_p) \rho_{bf}$

**Tableau A.2.2.** Données utiles sur l'application de la nanotechnologie (nanomatériaux) sur les systèmes de distillation solaire.

No.	Nanofluide (s)	Objectif et résultats	Réf.
1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oxyde d'Aluminium</li> <li>▪ Oxyde de Zinc</li> <li>▪ Oxyde de fer</li> <li>▪ Oxyde d'étain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quatre nanofluides ont été préparés et utilisés pour un processus de distillation en utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur.</li> <li>▪ Pour cet objectif, deux (02) distillateurs solaires de dimensions semblables et à une seule pente ont été construits.</li> <li>▪ Selon les tests de laboratoire, le <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> représente un problème de stabilité.</li> <li>▪ Les nanofluides H<sub>2</sub>O/<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>, <b>ZnO</b> et <b>SnO<sub>2</sub></b> ont été employés au cours des tests expérimentaux.</li> <li>▪ Les résultats montrent qu'avec le nanofluide H<sub>2</sub>O/<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>, la production du distillat a atteint <b>29,95 %</b> en comparaison avec les autres nanofluides.</li> </ul>	<b>Elango et al. (2015)</b>
2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oxyde de cuivre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Trois distillateurs solaires à une seule pente ont été fabriqués (1. Distillateur</li> </ul>	<b>Sharshir et al. (2017)</b>

- Graphite
  - solaire à bassin simple ; **2.** Distillateur solaire contient du nanofluide (graphite) ;
  - 3.** Distillateur solaire contient du nanofluide (Oxyde de cuivre)).
  - L'épaisseur des fluides de base se varient entre 0,25 et 5 cm.
  - L'eau mixée avec l'oxyde de cuivre et le graphite augmente la productivité du système solaire jusqu'à **44,91** et **53,95** %, respectivement.
  - La technique de refroidissement de la couverture du distillateur a été étudiée.
  - Exploitant la technique précédente avec la présence des nanoparticules d'oxyde de cuivre, la capacité de production a achevé **47,80** %, tandis que le graphite a montré une augmentation de **57,60** %.
  
- 3.** Oxyde cuivreux
  - Deux distillateurs solaires à une seule pente ont été fabriqué (**1.** Distillateur solaire à bassin simple peint en noir ; **2.** La peinture du bassin est mixée de nanoparticules de **Cu<sub>2</sub>O**).
  - Les résultats montrent que le processus de distillation est amélioré jusqu'à **25** % qui correspond à une concentration de **40** %.
  
- 4.** Oxyde d'Aluminium
  - Les nanoparticules de **Cu<sub>2</sub>O** et **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** ont été choisi pour des essais de distillation expérimentaux.
  - Deux (**02**) designs ont été fabriqué (**1.** Distillateur solaire à bassin simple et à une seule pente ; **2.** Distillateur solaire à une seule pente ayant un bassin de forme **V**).
  - Pour avoir une bonne production du condensat, un processus d'évacuation a été appliqué.
  - Le deuxième design a montré une capacité de production de distillat près de **180** % en présence de vacuum et des réflecteurs à l'intérieur du système.
  - En addition au techniques ci-dessus, la production a été augmenté jusqu'à

- 285,10 % en présence de nanoparticules de **Cu<sub>2</sub>O**.
5. Oxyde de Zinc
- Pour cette étude, l'oxyde de zinc de différentes formes a été choisi. **Saleh et al. (2017)**
  - Un distillateur solaire ayant une forme de couverture semi cylindrique et de bassin rectangulaire.
  - Thermocouples ont été placés dans différentes locations qui enregistreront les températures des éléments constituant ce système.
  - Les résultats montrent que :
    - Les nano tiges d'oxyde de zinc ont une bonne performance sur la production du système.
    - Le pourcentage d'augmentation en productivité et efficacité atteignent **30** et **38 %**, respectivement.
6. Dioxyde de Titane
- Les nanoparticules proposées par **Rufuss et al. (2018)** ont été mélangées en paraffin. **Rufuss et al. (2018)**
  - Oxyde de Cuivre
  - Oxyde de graphène
  - Pour se faire, quatre distillateurs solaires à différents absorbeurs ont été construits.
  - D'après les résultats expérimentaux, il est conclu que les nanoparticules d'oxyde de cuivre ont été recommandées pour une bonne performance du distillateur solaire.
7. Nanotubes de Carbone
- Un distillateur solaire de forme pyramide a été construit. **Abdelal et Taamneh (2017)**
  - Le bassin de ce système est équipé de différentes doses de nanoparticules de **Nanoplatelet de graphène** et **CNTs**.
  - La présence de CNTs (**5 wt.%**) fait augmenter la quantité de distillat à **109 %**.
  - La présence de Nanoplatelet de graphène fait augmenter la quantité de distillat à **30 %**.
-

## Références bibliographiques

## Références bibliographiques

- Abdelal, N., Taamneh, Y., 2017. Enhancement of pyramid solar still productivity using absorber plates made of carbon fiber/CNT-modified epoxy composites. *Desalination* 419, 117–24.
- Abdessemed, A., Bougriou, C., Guerraiche, D., Abachi, R., 2019. Effects of tray shape of a multi-stage solar still coupled to a parabolic concentrating solar collector in Algeria. *Renew Energy* 132, 1134–40.
- Abed, F.M., 2018. Design and fabrication of a multistage solar still with three focal concentric collectors. *J Sol Energy Eng* <https://doi.org/10.1115/1.4039351>.
- Abu-Arabi, M., Al-harashsheh, M., Mousa, H., Alzghoul, Z., 2018. Theoretical investigation of solar desalination with solar still having phase change material and connected to a solar collector. *Desalination* 448, 60–8.
- Adhikari, R.S., Kumar, A., 1993. Transient simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still. *Desalination* 91, 1–20.
- Agbo, S.N., Okoroigwe, E.C., 2007. Analysis of thermal losses in the flat-plate collector of thermosyphon solar water heater. *Res J Phys* 1(1), 35–41.
- Agboola, P.O., Al-Mutaz, I.S., 2017. Effect of cooling the glass cover of an inclined solar water distillation system under the climatic condition of Riyadh, Saudi Arabia. *Desalin Water Treat* 76, 1–18.
- Ahmed, M.I., Hrairi, M., Ismail, A.F., 2009. On the characteristics of multistage evacuated solar distillation. *Renew Energy* 34, 1471–8.
- Ali, M.T., Fath, H.E.S., Armstrong, P.R., 2011. A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination. *Renew Sustain Energy Rev* 15, 4187–99.
- Ali Rahmani, S.E., Brahim, C., 2017. Water supply prediction for the next 10 years in Algeria: Risks and challenges. *Irrigat Drainage Sys Eng* <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000197>.
- Al-Abbasi, O., 2019. Water desalination using renewable energy in a humidification-dehumidification cycle for Bahrain climate conditions. *Sustainability and Resilience Conference Sustainability and Resilience Conference: Mitigating Risks and Emergency Planning*. <http://dx.doi.org/10.18502/keg.v3i7.3084>.



- Al-harahsheh, M., Abu-Arabi, M., Mousa, H., Alzghoul, Z., 2018. Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM. *Appl Therm Eng* <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.073>.
- Al-Madani, H., 2006. The performance of a cylindrical solar water heater. *Renew Energy* 31, 1751–63.
- Al-Sulttani, A.O., Ahsan, A., Rahman, A., Nik Daud, N.N., Idrus, S., 2017. Heat transfer coefficients and yield analysis of a double-slope solar still hybrid with rubber scrapers: an experimental and theoretical study. *Desalination* 407, 61–74.
- Arslan, M., 2012. Experimental investigation of still performance for different active solar still designs under closed cycle mode. *Desalination* 307, 9–19.
- Bani-Hani, E., Qassem, H., Al Kandari, M., Al Azmi, S., Khalid, M., Bu-Mijdad, H., Khanafer, K., Sedaghat, A., 2017. Experimental analysis of an improved solar still system with cooling fan and preheating oil. *Energy Eng* 114(5), 55–71.
- Belyayev, Y., Mohanraj, M., Jayaraj, S., Kaltayev, A., 2018. Thermal performance simulation of a heat pump assisted solar desalination system for Kazakhstan climatic conditions. *Heat Transf Eng* <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1451246>.
- Boonchom, K., Vorasingha, A., Ketjoy, N., Souvakon, C., Bongkarn, T., 2007. Performance evaluation of a helix tube solar collector system. *Int J Energy Res* 31, 1169–79.
- Bouzaid, M., Ansari, O., Taha-Janan, M., Mouhsin, N., Oubrek, M., 2019. Numerical analysis of thermal performances for a novel cascade solar dealination still design. *Energy procedia* 157, 1071–82.
- Cheng, W.L., Huo, Y.K., Nian, Y.L., 2019. Performance of solar still using shape-stabilized PCM: Experimental and theoretical investigation. *Desalination* 455, 89–99.
- Danis, P., Juin 2003. Dessalement de l'eau de mer. *Techniques de l'Ingénieur*, J 2700.
- Danish, S.N., El-Leathy, A., Alata, M., Al-Ansary, H., 2019. Enhancing solar still performance using vacuum pump and geothermal energy. *Energies* 12, 539; <https://doi.org/10.3390/en12030539>.
- Dhindsa, G.S., Mittal, M.K., 2018. Experimental study of basin type vertical multiple effect diffusion solar still integrated with mini solar pond to generate nocturnal distillate. *Energy Convers Manage* 165, 669–80.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2013. *Solar engineering of thermal processes*. fourth ed. New Jersey: Wiley; 2013.

- Dwivedi V.K., Tiwari G.N., 2010a. Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode. *Desalination* 250, 49–55.
- Dwivedi, V.K., Tiwari, G.N., 2010b. Thermal modeling and carbon credit earned of a double slope passive solar still. *Desalin Water Treat* 13, 400–10.
- Elango, T., Kannan, A., Murugavel, K.K., 2015. Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids. *Desalination* 360, 45–51.
- Elashmawy, M., 2017. An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still. *Desalination* 411, 1–8.
- El-Sebaili, A.A., Ramadan, M.R.I., Aboul-Enein, S., Salem, N., 2008. Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond. *Energy Convers Manage* 49, 2839–48.
- Ghazy, A., Fath, H.E.S., 2016. Solar desalination system of combined solar still and humidification–dehumidification unit. *Heat Mass Transf* doi:10.1007/s00231-016-1761-1.
- Goudarzi, K., Shojaeizadeh, E., Nejati, F., 2014. An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO–H<sub>2</sub>O nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector. *Appl Therm Eng* 73, 1234–41.
- Guo, X.X., Zhang, H., Chen, H.P., 2018. Experimental investigation on a vacuum still integrated with concentrating PVT hybrid system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* <https://doi.org/10.1088/1755-1315/188/1/012066>.
- Hansen, R.S., Murugavel, K.K., 2017. Enhancement of integrated solar still using different new absorber configurations: An experimental approach. *Desalination* 422, 59–67.
- Henri, B., 2008. *Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée*. Plan Bleu Centre d'Activités Régionales, Sophia Antipolis.
- Hidouri, K., Benhmidene, A., Chaouachi, B., Ravishankar, S., 2017. Comparative study for evaluation of mass flow rate for simple solar still and active with heat pump. *J Water Environ Nanotechnol* 2(3), 157–165.
- Hongfei, Z., Xiaoyan, Z., Jing, Z., Yuyuan, W., 2002. A group of improved heat and mass transfer correlations in solar stills. *Energy Convers Manage* 43, 2469–78.
- Hosseini, S.S., Farhadi, M., Sedighi, K., 2017. Experimental investigation of a solar desalination system using twisted tape and wire coil inside of spiral heat exchanger. *Desalination* 420, 34–44.

- Hou, J., Yang, J.C., Chang, Z.H., Zheng, H.F., Su, Y.H., 2018. The mass transfer coefficient assessment and productivity enhancement of a vertical tubular solar brackish water still. *Appl Therm Eng* <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.129>.
- Huang, C.H., Chang, T.R., 2017. Determination of optimal inclination function for external reflector of basin type still for maximum distillate productivity. *Energy* 10.1016/j.energy.2017.11.070.
- Iqbal, S.M., Karthik, K., Michael, J.J., 2018. Performance analysis on improved efficiency in a hybrid solar still and solar heater. *Int J Ambient Energy* <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1517685>.
- Issa, R.J., Chang, B., 2017. Performance study on evacuated tubular collector coupled solar still in west Texas climate. *Int J Green Energy* 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2017.1328422>.
- Jamil B., Akhtar N., 2017. Effect of specific height on the performance of a single slope solar still: An experimental study. *Desalination* 414, 73–88.
- Joy, N., Antony, A., Anderson, A., 2017. Experimental study on improving performance of solar still using air blower. *Int J Ambient Energy* doi:10.1080/01430750.2017.1324817.
- Jubran, B.A., Ahmed, M.I., Ismail A.F., Abakar, Y.A., 2000. Numerical modelling of a multi-stage solar still. *Energy Convers Manage* 41, 1107–21.
- Kabeel, A.E., Omara, Z.M., Essa, F.A., Abdullah, A.S., Arunkumar, T., Sathyamurthy, R., 2017. Augmentation of a solar still distillate yield via absorber plate coated with black nanoparticles. *Alex Eng J* 56(4), 433–8.
- Kumar, S., Tiwari, A., 2008. An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)–active solar still. *Int. J. Energy Res.* 32, 847–58.
- Kumar, S., Dubey, A., Tiwari, G.N., 2014. A solar still augmented with an evacuated tube collector in forced mode. *Desalination* 347, 15–24.
- Kusumadewi, R.A., Notodarmodjo, S., Helmy, Q., 2018. Utilization of solar energy for sea water and brackish water desalination using vacuum pressure and number of trays variations. *MATEC Web of Conferences* doi:10.1051/matecconf/201819713015.
- Kwatra, H.S., 1996. Performance of a solar still: predicted effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature. *Sol Energy* 56(3), 261–6.
- Lahouel, S., Lahouel, N., 2015. Dessalement de l'eau de Mer et les Énergies Renouvelables. *J Advanced Research Science Technol* 2(2), 271–9.

- Maalej, M., Bouguecha, S., 2002. Le dessalement de l'eau dans le monde arabe (perspectives d'utilisation des énergies renouvelables). Organisation Arabe pour l'Education, la Culture et les Sciences ALECSO, Tunis.
- Madani, A.A., Zaki, G.M., 1995. Yield of solar stills with porous basins. *Appl Energy* 52, 273–81.
- Manchanda, H., Kumar, M., Tiwari, G.N. 2018. Thermal analysis of tilted wick solar distillation cum–drying system. *Int J Green Energy* doi.10.1080/15435075.2018.1531873.
- Muftah, A.F., Sopian, K., Alghoul, M.A., 2018. Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts. *Desalination* <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.017>.
- Munisamy, T.K., Mohan, A., Veeramanikandan, M., 2017. Experimental investigation of tilted wick solar still using fabrics. *Australian J Mechanical Eng* doi10.1080/14484846.2017.1334306.
- Murugesan, V, Seralathan, S., Hariram, V., Mohan, T., 2017. Experimental study on productivity enhancement of an improvised inclined solar still. *Int J Ambient Energy* doi:10.1080/01430750.2017.1280083.
- Narayana, R.L., Raju, V.R., 2018. Experimental study on performance of passive and active solar stills in Indian coastal climatic condition. *Front Energy* <https://doi.org/10.1007/s11708-018-0536-4>.
- Nasri, B., Benatiallah, A., Kalloum, S., Benatiallah, D., 2018. Experimental study of solar still using local material in south of Algeria. *AIP Conf Proc* doi:10.1063/1.5039211.
- Ogueke, N.V., Njoku, M.C., Anyanwu, E.E., 2009. Design, construction, and testing of a cylindrical solar water heater. *Int J Energy a Clean Environ* 10(1–4), 57–72.
- Omara, Z.M., Kabeel, A.E., Essa, F.A., 2015. Effect of using nanofluids and providing vacuum on the yield of corrugated wick solar still. *Energy Convers Manage* 103, 965–72.
- Pal, P., Rahul, D., 2018. Performance study of modified basin type single slope solar distiller. *Euro–Mediterranean J Environ Integ* <https://doi.org/10.1007/s41207-018-0081-x>.
- Petela, R., 2010. *Engineering thermodynamics of thermal radiation: for solar power utilization*. The McGraw–Hill Companies Inc., New York.
- Ranjan, K.R., Kaushik, S.C., Panwar, N.L., 2016. Energy and exergy analysis of passive solar distillation systems. *Int J Low Carbon Technol* 11(2), 211–21
- Rajaseenivasan, T., Murugavel, K.K., 2013. Theoretical and experimental investigation on double basin double slope solar still. *Desalination* 319, 25–32.

- Rasekh, A., Farzaneh-Gord, M., 2012. Novel theoretical approach on exergy and energy performance assessment of cylindrical solar water heater. *J. Energy Engineering* 138(3), 119–24.
- Reddy, K.S., Kumar, K.R., O'Donovan, T.S., Mallick, T.K., 2012. Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination system. *Desalination* 288, 80–92.
- Reddy, K.S., Sharon, H., 2016. Active multi-effect vertical solar still: Mathematical modeling, performance investigation and enviro-economic analyses. *Desalination* 395, 99–120.
- Reddy, K.S., Sharon, H., 2017. Energy-environment-economic investigations on evacuated active multiple stage series flow solar distillation unit for potable water production. *Energy Convers Manage* 151, 259–85.
- Rufuss, D.D.W, Suganthi, L., Iniyar, S., Davies, P.A., 2018. Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity. *J Clean Prod* 192, 9–29.
- Sadi, A., 2000. Le dessalement solaire – Considérations techniques. *Rev Energ Ren : Chemss* 91–7.
- Sahota, L., Tiwari, G.N., 2016. Effect of nanofluids on the performance of passive double slope solar still: A comparative study using characteristic curve. *Desalination* 388, 9–21.
- Saleh, S.M., Hassan, A.M.S., Eldean, M.A.S., Kale, V., Gadgil, B., 2017. Influence of solvent in the synthesis of nano-structured ZnO by hydrothermal method and their application in solar-still. *J Env Chem Eng* 5(1), 1219–26.
- Sarhaddi, F., Tabrizi, F.F., Zoori, H.A., Mousavi, S.A.H.S., 2017. Comparative study of two weir type cascade solar stills with and without PCM storage using energy and exergy analysis. *Energy Convers Manag* 133, 97–109.
- Saroja, S., Nithiarasu, P., Seetharamu, K.N., 1997. Transient analysis of a cylindrical solar water heater. *Energy Conuers Manage* 38(18), 1833–40.
- Schwarzer, K., Vieira da Silva, E., Hoffschmidt, B., Schwarzer, T., 2009. A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production. *Desalination* 248, 204–11.
- Sidem, Fresh water through desalination. Paris, 27 Mai 1997.
- Shanmugan, S., Manikandan, V., Shanmugasundaram, K., Janarathanan, B., Chandrasekaran, J., 2012. Energy and exergy analysis of single slope single basin solar still. *Int J Ambient Energy* 33(3), 142–51.

- Sharshir, S.W., Peng, G., Wu, L., Yang, N., Essa, F.A., Elsheikh, A.H., Showgi, I.T.M., Kabeel, A.E., 2017. Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: Experimental study. *Appl Therm Eng* 113, 684–93.
- Sharon, H., Reddy, K.S., 2015. Performance investigation and enviro-economic analysis of active vertical solar distillation units. *Energy* 84, 794–807.
- Shatat, M.I.M., Mahkamov, K., 2010. Determination of rational design parameters of a multistage solar water desalination still using transient mathematical modelling. *Renew Energy* 35, 52–61.
- Shatat, M., Worall, M., Riffat, S., 2013. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. *Sustainable Cities Society* 9, 67–80.
- Singh, P., Singh, P., Singh, J., Singh, R.I., Kundu, K., 2012. Performance evaluation of low inertia multi-stage solar still. In: *Proceeding of IMECS, Hong Kong*.
- Singh, R.V., Kumar, S., Hasan, M.M., Khan, M.E., Tiwari, G.N., 2013. Performance of a solar still integrated with evacuated tube collector in natural mode. *Desalination* 318, 25–33.
- Suneesh, P.U., Jayaprakash, R., Kumar, S., Denkenberger, D., 2017. Performance analysis of “V”-type solar still with tilt wick and effect of wick coverage. *Cogent Eng* <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1419791>.
- Tahri, T., Bettahar, A., Douani, M., Abdul-Wahab, S.A., Al-Hinai, H., Al-Mulla Y., 2010. Dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire en vue de l'irrigation d'une serre agricole. *seminaires\_2010/Article\_Tahri\_C13*.
- Tiwari, G.N., Kumar, S., Sharma, P.B., Khan, M.E., 1996. Instantaneous thermal efficiency of an active solar still. *Appl Therm Eng* 16(2), 189–92.
- Tiwari, G.N., Yadav, J.K., Singh, D.B., Al-Helal, I.M., Abdel-Ghany, A.M., 2015. Exergoeconomic and enviroeconomic analyses of partially covered photovoltaic flat plate collector active solar distillation system. *Desalination* 367, 186–96.
- Ullah, I., Rasul, M.G., 2018. Recent Developments in Solar Thermal Desalination Technologies: A Review. *Energies* <http://dx.doi.org/10.3390/en12010119>.
- Vaithilingam, S., Esakkimuthu, G.S., 2014. Energy and exergy analysis of single slope passive solar still: an experimental investigation. *Desalin Water Treat* 55, 1433–44.
- Xie, G., Sun, L., Yan, T., Tang, J., Bao, J., Du M., 2018. Model development and experimental verification for tubular solar still operating under vacuum condition. *Energy* 115–130.

- Yan, T., Xie, G., Sun, L., Du, M., Liu, H., 2019. Experimental investigation on a two-effect tubular solar still operating under vacuum conditions. *Desalination* <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.023>.
- Younas, O., Banat F., Islam D., 2016. Seasonal behavior and techno economical analysis of a multi-stage solar still coupled with a point-focus Fresnel lens. *Desalin Water Treat* 57(11), 4796–809.
- Yu, W., France, D.M., Choi, S.U.S., Routbort, J.L., 2007. Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, IL 60439–4838.
- Zhang, L.X., Jiang, Y.Z., Zhang, X.J., 2018. Study on active and passive integration humidification–dehumidification solar desalination. ASRTU Conference on Alternative Energy Sino–Russian ASRTU Conference Alternative Energy: Materials, Technologies, and Devices. <http://dx.doi.org/10.18502/kms.v4i2.3053>.
- Zarzoum, K., Zhani, K., Bacha, H.B., 2017. Experimental validation of optimized solar still using solar energy. *J Fundam Renew Energy Appl* doi:10.4172/2090-4541.1000242.
- Zoori, H.A., Tabrizi, F.F., Sarhaddi, F., Heshmatnezhad, F., 2013. Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still. *Desalination* 325, 113–21.

# Travaux scientifiques



يُعد التقطير الشمسي أحد العمليات التي تلبى احتياجات مياه الشرب خاصة في المناطق الريفية، مع استخدام مصدر للطاقة يتميز بنظافته وكفاءته وتوافره. يكمن الهدف الرئيسي المتوخى من هذا العمل في استخدام الأداة العددية لفهم آليات وظواهر التقطير في العديد من التطبيقات الشمسية. سيتم عن كثب فحص الإنتاج الكلي للمياه العذبة، وسيتم اقتراح تحسين هندسي بعد أهمية نتائج النهج (0 D) استناداً إلى ميزانيات الطاقة، فضلاً عن القياسات التجريبية. إلى جانب تطبيق مفهوم الطاقة، تم إثراء المحتوى عن طريق استخدام جانب (exergy)، والذي هو يُعد أيضاً أداة لفحص وتقييم أداء مثل هذا النظام الديناميكي الحراري. سيكون تغيير تصميم نظام التقطير عن طريق إدخال عدة طوابق عاملاً يؤثر على تشغيل وإنتاج كمية الماء المقطر. لذلك، تم إجراء تحليل لعدة عوامل في هذا الاتجاه.

### Résumé

La distillation solaire est l'un des procédés qui répond aux besoins en eau potable notamment dans les populations rurales, tout en utilisant une source d'énergie caractérisée par sa propreté, son efficacité et sa disponibilité. L'objectif essentiel prévu dans ce travail réside dans l'utilisation de l'outil numérique pour la compréhension des mécanismes et phénoménologie de distillation, dans plusieurs applications solaires. On examinera de près la production globale de l'eau douce et une optimisation géométrique sera proposée à l'issue de la pertinence des résultats qui feront l'objet d'une confrontation avec l'approche globale (0 D) qui se base sur les bilans énergétiques, ainsi que les mesures expérimentales. Parallèlement à l'application du concept énergétique, le contenu est enrichi en introduisant l'aspect exergétique qui est ainsi un outil d'examinations et d'évaluation de la performance d'un tel système thermodynamique. Le changement de la conception du système de distillation par l'insertion de plusieurs étages sera un facteur influant sur le fonctionnement et la production du condensat. Donc, une analyse paramétrique a été menée dans ce contexte.

**Mots clés :** Dessalement solaire, Distillateur solaire, Collecteur solaire, Production, Analyse énergétique, Analyse exergétique.

### Abstract

Solar distillation is one of the processes that meet the needs of drinking water especially in rural populations, while using a source of energy characterized by its cleanliness, efficiency, and availability. The main objective envisaged in this work lies in the use of the numerical tool for the understanding of the mechanisms and phenomenology of distillation in several solar applications. The global production of freshwater will be closely examined and a geometrical optimization will be proposed following the relevance of the results, which will be confronted with the global approach (0 D) based on the energy budgets, as well as experimental measurements. Along with the application of the energy concept, the content is enriched by introducing the exergy aspect, which is thus a tool for examining and evaluating the performance of such a thermodynamic system. The change of the design of the distillation system by the insertion of several stages will be a factor influencing the operation and the production of the condensate. Therefore, a parametric analysis has been conducted in this direction.

**Keywords:** Solar desalination, solar still, Solar collector, Production, Energy analysis, Exergy analysis.