



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1

FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CLIMATIQUE

N ° d'ordre.....

N ° de série.....

THESE

Présentée pour obtenir le diplôme de

DOCTORAT Es SCIENCES

En : Génie Climatique

*Etude et modélisation de deux distillateurs solaires
symétrique et asymétrique à effet de serre*

TRAD Abderachid

Le : / / 2014

Dirigée par

Professeur Kaabi A

Devant le jury:

Président :	M. Gomri Rabah	Professeur	Université Constantine1
Rapporteur :	M. Kaabi Abdenacer	Professeur	Université Constantine1
Examineurs :	M. Rouabah Mohamed Saleh	Professeur	Université Constantine 1
	M ^{me} Rouag Saffidine Djamila	Professeur	Université Constantine 3
	M. Ayadi Abdelhamid	Professeur	Université d'O.E. Bouaghi

Remerciements

Cette thèse a été réalisée après un grand effort fourni en traduisant l'idée d'un thème à une valorisation induite à partir des articles et un plan de travail suivi avec rigueur.

Mes remerciements et ma reconnaissance vont en particulier, à mon directeur de thèse, **Monsieur Kaabi Abdenacer**, Professeur au département de génie Climatique, qui a accepté de m'encadrer tout au long de mes travaux, pour sa direction et ses conseils judicieux et son aide.

Je remercie également Monsieur **M. Gomri Rabah**, Professeur et chef de département de Génie Climatique, pour m'avoir fait l'honneur d'accepté de présider le jury.

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, qu'ils soient ici vivement remerciés de l'honneur qu'ils me font en faisant partie du jury :

Mme Rouag Saffidine Djamila, Professeur et Doyenne à l'Université 3

M.Ayadi Addelhamid, Professeur à l'Université d'Oum el Bouaghi

M. Rouabah Mohamed Salah, Professeur à l'Université Constantine 1

Tous mes remerciements et mon estime se dirige à tous **les enseignants** du département de Génie Climatique.

Le même sentiment est aussi affecté à tous le personnel du département de Génie Climatique et se prolonge aussi à ceux de la Faculté des Science de la Technologie de l'Université Constantine1.

SOMMAIRE

Nomenclature

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Etude Bibliographique

Introduction	4
I.1. Le contexte de l'énergie renouvelable dans le développement durable	4
I.1.1 Génération d'énergie renouvelable	6
I.1.2 Thermo solaire.....	6
I.1.3 Géothermie.....	7
I.1.4 Biomasse.....	8
I.1.5 Quelques données sur la topographie de l'énergie de l'Algérie.....	9
I.2. Problématique de l'eau potable.....	10
I.2.1 Le rôle de l'eau dans la vie.....	10
I.2.2 L'eau, l'environnement et l'économie.....	11
I.2.3. Critères de la qualité de l'eau.....	11
I.2.4. Eau de mer.....	12
I.2.5. L'eau saumâtre.....	13
I.3. L'eau et l'énergie.....	13
I. 3. 1 Les procédés de dessalement.....	14
I.3.2 Les techniques de dessalement	14
I.3.3 Le processus de distillation thermique.....	15
I.3.3.1. La distillation solaire directe à effet de serre	15
I.3.3.2. La distillation à multiple effet (MED).....	16
I.3.3.3. La distillation à multiples étages.....	17
I.3.4. Le procédé à membrane (Filtration).....	18
1.3.4.1. L'osmose inverse.....	19
1.3.4.2. L'électrodialyse [ED].....	21
I.3.5 Autres Procédés dessalement.....	22

I.3.5.1 Echange d'ions.	22
I.3.5.2. Principe du dessalement par congélation.....	23
I.4. Etat de l'art et situation du processus de dessalement solaire dans le contexte des énergies renouvelables -Principes de base -.	24
I.4.1. La distillation	24
I.4. 2. Contexte de la distillation solaire.....	24
I.4.3. Classification des systèmes de distillation solaire.....	25
I.5. Revue littéraire des différentes méthodes utilisées pour l'amélioration de la productivité des distillateurs solaires.....	26
I.5.1 Le principe de la distillation solaire	26
I.5.2 Amélioration de la productivité des distillateurs solaires.....	26
I.5.2 .1. Théorie de l'évaporation.....	27
I.5.2 .2 Facteurs affectant l'évaporation de surface.....	27
I.5.2 .3. Facteur affectant la condensation.....	28
I.5.2 .4. Distillateurs avec évaporateur et condenseur séparés.....	28
I.6. Application aux différents Types de Distillateurs solaire	28
I.6.1. Distillateur solaire à simple bassin.....	28
I.6.2. Distillateur solaire à multiple bassin (Multi bassin)	29
I.6.3. Distillateurs solaires passif à multiple effets	29
I.6.4. Distillateurs solaires multi-bassin inversé	35
I.6.5. Distillateur solaire active à multiple bassin	36
I.6.6. Distillateur solaire active à multiple bassin muni d'un capteur plan.....	36
I.6.7. Distillateur solaire à double effet avec échangeur de chaleur.....	37
I.6.8. Distillateur solaire avec condenseur supplémentaire.....	38
I.6.9. Distillateur solaire avec condenseur séparé.....	39

Chapitre II : Gisement solaire et Thermique solaire

Introduction	41
II.1. Gisement solaire	42
II.1.1. Le soleil : Genèse de l'étoile et structure.....	42
II.1.2. Données astronomiques et liaison soleil - terre	43
II.1.2.1. Mouvement terre – soleil	44
II.1.2.2. Mouvement de la terre.....	45
II.1.2.3. Mouvement de rotation de la terre.....	45

II.1.2.4	Mouvement de translation: Le cycle des saisons	46
II.1.2.5.	Angles de base soleil - terre.....	47
II.1.2.5.1.	Paramètres de position de la sphère terrestre.....	47
II.1.3.	Repérage du soleil.....	48
II.1. 3.1.	Position du Soleil	48
II.1. 3.2.	Coordonnées équatoriales.....	49
II.1. 3.2.1.	Déclinaison du soleil.....	49
II.1. 3.2.2.	Angle horaire.....	50
II.1. 3.3.	Les coordonnées horizontales	51
II.1. 3.3.1.	Hauteur angulaire du soleil.....	51
II.1. 3.3.2.	L'azimut de soleil.....	52
II.1. 3.4.	Liaison entre les coordonnées horaires et les coordonnées horizontales.....	54
II.1. 3.5.	Equation de passage d'un système de coordonnées à un autre.....	54
II.1.3.6.	Détermination de l'angle d'incidence (θ_i).....	55
II.1.4.	Les temps solaires.....	56
II.1.4. 1.	Durée du jour.....	56
II.1.4.2.	Temps solaire et l'équation du temps.....	56
II. 1.4.3.	Temps universel.....	57
II.1.4.4.	Temps solaire local.....	58
II.1.4.5.	Temps solaire vrai (T. S .V)	58
II.1.4.6.	Temps solaire moyen (T.S.M).....	58
II.1.5.	Energie solaire et rayonnement solaire	59
II.1.5. 1.	Origine de l'énergie solaire.....	59
II.1.6.	Rayonnement solaire	59
II.1.6.1.	Nature et composition.....	59
II.1.6. 2.	Caractéristiques du rayonnement solaire	61
II.1.6. 2.1.	Lois de plank.....	61
II.1.6. 2.2.	Lois deWien.....	62
II.1.6. 2.3.	Lois de stéphane.....	62
II.1.6. 3.	Rayonnement solaire et position du soleil.....	62
II.1. 6. 4.	Emission du rayonnement solaire.....	63
II.1.7.	Répartition du rayonnement solaire.....	64

II.2.3.7.2. Transfert de chaleur lors de la condensation	92
II.2.3.7.2. 1. Condensation en gouttes	92
II.2.3.7.2. 2. Condensation en film sur une paroi verticale (équation de Nusselt).....	92
II.2.3.7.2. 3. Cas d'une plaque plane inclinée d'un angle (β) par rapport à l'horizontale.....	95
II. 2.4. Résistance thermique.....	96
II.2.5. Transfert de masse	98
II. 2.6. Transfert de chaleur et de masse appliquée à un modèle de distillateur solaire, type conventionnel.....	98

Chapitre III : Etude et modélisation des systèmes proposés

Introduction	104
III. 1. Conception et description des modèles proposés à l'étude	104
III. 1.1. Présentation des deux modèles proposés à l'étude	104
III. 1.2. Concept géométrique et principes de fonctionnement.....	105
III. 1.2.1. Distillateur solaire type symétrique à double pente (à deux faces)... ..	105
III. 1.2.2. Distillateur solaire type asymétrique à double effet (une seule pente : une seule face).....	106
III. 1.3. A la découverte des mêmes composants	107
III. 2. Paramètres influant sur le système de distillation solaire.....	108
III. 2.1. Les Paramètres externes.....	108
III. 2. 1. 1. Les paramètres géographiques	108
III. 2. 1. 2. Paramètres météorologiques (climatiques).....	108
III. 2. 2. Les Paramètres internes	109
III. 2. 2. 1. Paramètres de position.....	109
III. 2. 2. 2 Paramètres de conception.....	110
III. 2.2.3. Les paramètres optiques et Les paramètres thermo physiques.....	112
III. 2.2.3.1. Les paramètres optiques.....	112
III. 2.2.3.2. Paramètres thermo-physiques.....	113
III. 2. 2.4. Les phénomènes physiques intervenant dans le distillateur.....	114
III. 3. Principales caractéristiques d'un distillateur solaire	115
III. 3.1. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire.....	115
III. 3.1.1. La production du distillat	116

III. 3.1.2. L'efficacité.....	116
III. 3.1.3. Rendement d'absorption.....	118
III. 3.1.4. La performance.....	118
III. 4. Concept Thermique (énergétique)	118
III. 4.1. Le bilan thermique globale.....	118
III.4.2. Les différents modes de transfert de chaleur dans les deux types de distillateurs solaires.....	119
III.4.3. Bilan énergétique du distillateur solaire, type symétrique à double pente	119
III. 4.3.1. Bilan énergétique de la vitre.....	120
III. 4.3.1. 1. Transfert de chaleur externe (vitre –ambiance).....	120
III. 4.3.1. 2. Transfert de chaleur interne (vitre –masse d'eau).....	121
III.4.3.2. Bilan énergétique de la masse d'eau.....	123
III. 4.3. 3. Bilan énergétique de l'absorbeur (plaque absorbante).....	124
III. 4. 3. 4 Bilan énergétique de l'isolant	125
III. 4. 3. 5. Bilan énergétique du distillateur solaire de type symétrique	125
III.4.4. Principe de fonctionnement du distillateur solaire de type symétrique.....	125
III. 4. 4. 1. Hypothèses.....	126
III. 4. 5. Les équations de fonctionnement.....	127
III. 4. 5.1. Au niveau de la couverture.....	127
III. 4.5.2. Au niveau de la masse d'eau.	127
III. 4. 5.3. Au niveau de l'isolant	128
III. 4.6. Distillateur solaire de type asymétrique et à double effet.....	128
III. 4. 6.1. Bilan énergétique	128
III. 4. 6.1.1. Bilan énergétique de la vitre (g2)	128
III. 4. 6.1.2. Transfert de chaleur externe (vitre 2- ambient).....	128
III. 4. 6.1.3. Transfert de chaleur interne (vitre 2- film d'eau).....	129
III. 4. 6.1.4. Bilan énergétique du film d'eau.....	131
III. 4. 6.1.5. Bilan énergétique de la vitre (g1).....	131
III. 4. 6.1.6. Bilan énergétique dans le bassin principal.....	132
III. 4. 6.1.7. Bilan énergétique de la plaque absorbante.....	133
III. 4. 6.1.8. Bilan énergétique de l'isolant	133
III. 4. 6.1.9. Bilan récapitulatif du type asymétrique.....	134
III. 4.6.2. Principe de fonctionnement.....	134
III. 4. 6. 2.1. Les hypothèses	134

III. 4. 6. 3. Les Equations de fonctionnement	135
III. 4. 6. 3.1. Au niveau de la vitre 2.....	135
III. 4. 6. 3.2. Au niveau de la face intérieur de la vitre 2-film d'eau ...	136
III. 4. 6. 3.3. Au niveau du film d'eau vitre	136
III. 4. 6. 3.4. Au niveau de la surface d'eau du bassin principal.....	136
III. 4. 6. 3.5. Au niveau de la plaque absorbante.....	137
III. 4. 6. 3.6. Au niveau de l'isolant.....	137
III. 4. 7. Analogie électrique.....	137
III. 4. 8. Modélisation mathématique	143
III. 4. 9. Principe de programmation.....	145
III. 4.9. 1. Organigramme général : Distillateur solaire type symétrique	148
III. 4. 9. 1.1 Discrétisation des équations de transfert thermique du distillateur solaire, type symétrique	151
III. 4. 9. 2. Organigramme général : Distillateur solaire, type Asymétrique...155	
III. 4. 9. 2.1. Discrétisation des équations de transfert thermique du distillateur solaire type asymétrique	158

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1.Introduction	166
IV.2. Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.....	166
IV.3. Influence de l'angle d'inclinaison sur la productivité journalière des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.....	173
IV.4. Influence de la profondeur de l'eau, sur la productivité journalière des deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.	175
IV.5. Variation temporelle de la température de l'eau et celle de la face intérieure de la vitre des deux distillateurs de type symétrique et asymétrique dans les différentes orientations..	179
IV.6. Comparaison entre la production horaire des deux modèles de distillateurs solaires de types symétrique et asymétrique orientés vers l'est –ouest et le sud – nord.....	182
IV.7. Comparaison entre la production journalière des deux distillateurs solaires de types symétrique et asymétrique à double effet dans les conditions optimales.....	184

IV.8. Variation temporelle du coefficient d'échange de chaleur global intérieur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.....	186
IV.9. Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.....	190
IV.10. Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.	193
IV.11. Variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur et de la température ambiante, dans les conditions optimales des deux distillateurs solaires, types : symétrique et asymétrique, orientés vers l'est –ouest et au sud nord.	196
IV.12. Effet de la l'épaisseur de l'isolant sur la productivité des deux types de distillateur solaires : symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.....	199
V.13. Conclusion	201
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	203
ANNEXE (1) : Résolution des systèmes d'équations linéaires par La méthode itérative.....	207
ANNEXE (2) : Propriétés physiques de l'eau et de l'air humide	209
ANNEXE (3) : Programme informatique en langage "Matlab"	212
Références Bibliographiques	228
Résumé	
Abstract	
المخلص	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I.

Figure 1.1 Les prévisions de la consommation de l'énergie primaire dans le monde.....	5
Figure 1.2 Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.....	5
Figure 1.3 La topographie des principales régions climatiques d'Algérie.....	9
Figure 1.4 Classification des procédés de dessalement.....	15
Figure 1.5 Distillation à multiple effet.....	17
Figure 1.6 Distillation à détente étagées.....	18
Figure 1.7 Mise en évidence de l'osmose inverse.....	20
Figure 1.8 Schéma de principe d'une unité de l'électrodialyse.....	22
Figure 1.9 Procédé de congélation sous vide par absorption de vapeur (AFVC) utilisant une pompe à chaleur à compression.....	24
Figure 1.10 Schéma d'un organigramme général des modes de Classification des systèmes de distillation solaire.....	25
Figure 1.11 Schéma d'un type de distillateur solaire conventionnel simple.....	29
Figure 1.12 Schéma du distillateur solaire à double effet (l'eau s'écoule sur la couverture supérieure).....	30
Figure 1.13. Distillateur solaire à double effet surélevé.....	32
Figure 1.14 Distillateur solaire à double effet (bassin supérieur prend la forme de 'V').....	32
Figure 1.15 Distillateur solaire symétrique à double pente.....	33
Figure 1.16 Distillateur solaire type asymétrique à double effet.....	33
Figure 1.17 Distillateur solaire à double effet à double pente.....	34
Figure 1.18. Distillateur solaire à Multi-bassin inversé.....	35
Figure 1.19 Distillateur solaire type Active couplé à un capteur par Mode de circulation a) à thermosiphon b) à circulation forcé.....	36
Figure 1.20 Distillateur solaire à double effet avec échangeur de chaleur.....	38
Figure 1.21 Distillateur solaire avec condenseur supplémentaire.....	39

Figure 1.22	Distillateur solaire avec condenseur séparé.....	40
-------------	--	----

CHAPITRE II.

Figure 2.1	Coupe schématique et structure du soleil.....	43
Figure 2.2	Mouvement apparent du soleil.....	44
Figure 2.3	Mouvement de la terre autour du soleil.....	44
Figure 2.4	Mouvement de rotation de la terre.....	45
Figure 2.5	Le cycle des saisons tracé par le mouvement de la terre.....	47
Figure 2.6	Angles de base soleil - terre.....	48
Figure 2.7	Coordonnées équatoriales et horaires.....	49
Figure 2.8	Schéma de l'angle horaire du soleil.....	51
Figure 2.9	Schéma de la hauteur angulaire (h) et azimut ($a = \gamma$) du soleil	52
Figure 2.10	Repérage du soleil.....	54
Figure 2.11	Représentation de l'angle d'incidence.....	56
Figure 2.12	Diagramme des variations annuelles de l'équation du temps.....	57
Figure 2.13	Composition du rayonnement	60
Figure 2.14	Répartition du Spectre du rayonnement solaire hors atmosphère et au niveau du sol	61
Figure 2.15	Schéma de diffusion et de captage du rayonnement solaire direct sur une surface inclinée, formant les angles solaires (dans l'hémisphère nord).....	63
Figure 2.16	Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.....	64
Figure 2.17	Propagation du rayonnement solaire à travers l'air et la couverture en verre d'un distillateur solaire.....	70
Figure 2.18	Schéma de la réfraction : le faisceau du rayonnement solaire est dévié selon la loi dite de Snell-Descartes.....	72
Figure 2.19	Les éléments d'un milieu réfractant.....	73
Figure 2.20	Réfraction de la lumière à la surface de l'eau.....	73

Figure 2.21 Schéma de principe de la loi de la réflexion : les faisceaux incidents et réfléchis forment avec la normale le même angle, qu'il faut orienter correctement.....	74
Figure 2.22 Transfert de chaleur par conduction monodimensionnel à travers une plaque à la température $T_1 > T_2$	84
Figure 2.23 Formation des couches limites laminaires et turbulentes d'un fluide s'écoulant sur une surface plate.	87
Figure 2.24 Le rayonnement réfléchi sur: (a) surface d'un réflecteur spéculaire ;(b) surface diffuse.....	88
Figure 2.25 L'échange de rayonnement a) sur une surface courbé, b) sur une surface plate.....	90
Figure 2.26 Croissance du film sur une paroi vertical.....	93
Figure 2.27 Profils de vitesse et de température.....	95
Figure 2.28 Condensation en film d'un fluide sur une paroi inclinée.....	96
Figure 2.29 Modes de transfert de chaleur dans un distillateur solaire de type conventionnel.....	99
Figure 2.30 Schéma du réseau de résistance thermique correspondant aux modes de transfert de chaleur d'un distillateur solaire de type conventionnel.....	100

CHAPITRE III.

Figure 3.1 Schéma d'un distillateur solaire de type symétrique et à effet de serre.....	106
Figure 3.2 Schéma du distillateur solaire type asymétrique à double effet.....	107
Figure 3.3 Bilan énergétique de la vitre.....	120
Figure 3.4 Bilan énergétique de la masse d'eau.....	124
Figure 3.5 Bilan énergétique de la plaque absorbante et de l'isolant.....	125
Figure 3.6 Schéma des différents échanges thermiques dans la maille du distillateur solaire, type symétrique et à double exposition.....	140
Figure 3.7 Représentation de l'analogie électrique du distillateur solaire symétrique.....	141
Figure 3.8 Représentation de l'analogie électrique du distillateur solaire, type asymétrique et à effet de serre.....	143

Figure 3.9 Les différents nœuds considérés dans la maille d'un distillateur solaire, type symétrique à effet de serre et à double exposition.....144

Figure 3.10 Les différents nœuds considérés dans la maille d'un distillateur solaire, type asymétrique et à double effet.....144

CHAPITRE IV.

Figure 4.1 Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire...170

Figure 4.2 Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type asymétrique à double effet orienté vers le sud – nord.....171

Figure 4.3 Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type symétrique à double pente, orienté vers la direction est – ouest.....171

Figure 4.4 Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type symétrique à double pente orienté vers la direction sud – nord.....172

Figure 4.5 Variation du rayonnement solaire incident (maximum) avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type asymétrique orienté vers les directions est-ouest et sud – nord.....172

Figure 4.6 Variation du rayonnement solaire incident (maximum) avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type symétrique orienté vers les directions est-ouest et sud – nord.....173

Figure 4.7 Effet de l'angle d'inclinaison sur la productivité journalière du distillateur solaire, type symétrique orienté vers l'est-ouest et vers le sud-nord.....175

Figure 4.8 Effet de l'angle d'inclinaison sur la productivité journalière du distillateur solaire, type asymétrique orienté vers l'est-ouest et vers le sud-nord.....175

Figure 4.9 Effet de la profondeur de l'eau, sur la productivité journalière du distillateur solaire de type symétrique à double pente, orienté vers l'est-ouest et sud – nord.....177

Figure 4.10 Effet de la profondeur de l'eau, sur la productivité journalière du distillateur solaire de type asymétrique à double effet, orienté vers l'est-ouest et sud – nord.....177

Figure 4.11 Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers l'est – ouest.	180
Figure 4.12 Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire de type symétrique, orienté vers le sud - nord.	180
Figure 4.13 Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet, orienté vers l'est – ouest.	181
Figure 4.14 Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet, orienté vers le sud - nord.....	181
Figure 4.15 Comparaison entre la production horaire des deux modèles de distillateurs solaires types symétrique et asymétrique orientés vers l'est –ouest et le sud – nord.....	183
Figure 4.15a Variation de la production horaire du distillateur solaire de type symétrique orienté vers l'est-ouest et le sud- nord.....	184
Figure 4.15b Variation de la production horaire du distillateur solaire de type asymétrique orienté vers l'est-ouest et le sud- nord.....	184
Figure 4.16 Comparaison entre la production journalière des deux distillateurs solaires de types symétrique et asymétrique à double effet, dans les conditions optimales, durant la journée la plus chaude (2002- 2012).....	185
Figure 4.17 Variation temporelle du coefficient global d'échange intérieur de chaleur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire, type symétrique orienté vers l'est – ouest.....	188
Figure 4.18 Variation temporelle du coefficient global d'échange intérieur de chaleur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type asymétrique orienté vers l'est - ouest.....	188
Figure 4.19 Variation temporelle du coefficient global d'échange intérieur de chaleur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type symétrique orienté vers le sud- nord.....	189

Figure 4.20 Variation temporelle du coefficient d'échange de chaleur global intérieur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type asymétrique orienté vers le sud-nord.....	189
Figure 4.21 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type symétrique, orienté vers l'est ouest.....	191
Figure 4.22 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type asymétrique, orienté vers l'est -ouest.....	192
Figure 4.23 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type symétrique, orienté vers le sud -nord.....	192
Figure 4.24 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type asymétrique orienté vers le sud -nord.....	193
Figure 4.25 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers l'est -ouest.....	194
Figure 4.26 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire du distillateur solaire de type symétrique, orienté vers le sud - nord.....	194
Figure 4.27 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers l'est -ouest....	195
Figure 4.28 Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers le sud - nord.....	195
Figure 4.29 Variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur et de la température ambiante, dans les conditions optimales du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers l'est -ouest.	197
Figure 4.30 Variation temporelle du coefficient global d'échange extérieur de chaleur et de la température ambiante dans les conditions optimales du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers le sud-nord.....	197

Figure 4.31 Variation temporelle du coefficient global d'échange extérieur de chaleur et de la température ambiante dans les conditions optimales du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers l'est -ouest.	198
Figure 4.32 Variation temporelle du coefficient global d'échange extérieur de chaleur et la température ambiante dans les conditions optimales du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers au sud - nord.	198
Figure 4.33 Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la productivité journalière du distillateur solaire, type symétrique à effet de serre.....	200
Figure 4.34 Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la productivité journalière du distillateur solaire, type asymétrique à effet de serre.....	200

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Potentielle de l'énergie solaire moyenne annuelle pour différentes zones d'Algérie.....	10
Tableau 1.2 Classification des eaux selon la salinité	12
Tableau 1.3 Degré de salinité des eaux de mer	13
Tableau 2.1 Variation de l'angle horaire avec le temps d'une journée normale dans l'hémisphère nord.....	50
Tableau 2.2 Angle d'azimut solaire (γ) pour différentes orientations d'une surface inclinée dans l'hémisphère nord.....	53
Tableau 2.3 Les jours moyens recommandés pour chaque mois de l'année.....	65
Tableau 2.4 Facteur de turbidité pour différents mois de l'année et différentes régions.....	67
Tableau 2.5 Représentation des indices de réfraction de quelques substances.....	71
Tableau 2.6 Valeurs des coefficients de trouble (a) et (b).....	76
Tableau 2.7 Valeurs de l'albédo du sol (ρ)	77
Tableau 2.8 Le Processus de transfert de chaleur.....	82
Tableau 3.1 Caractéristiques thermo physiques de matériaux métalliques constituant la plaque absorbante au niveau des distillateurs solaires à effet de serre.....	113
Tableau 3.2 Caractéristiques thermo physiques de certains matériaux locaux pouvant être utilisés comme isolant parfait au niveau des distillateurs solaires à effet de serre.....	114
Tableau 3.3 Caractéristiques thermo physiques de certains matériaux locaux pouvant être utilisés comme couvertures transparentes habituelles au niveau des distillateurs solaires à effet de serre.....	114
Tableau 3.4 Valeurs des coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption, de transmission vis à vis du rayonnement solaire incident au niveau des différentes parties du distillateur solaire.....	117
Tableau 3.5 Analogie entre le système thermique et le système électrique.....	139
Tableau A.2.1 Propriétés physiques de certains matériaux pouvant être utilisées comme absorbeur ou isolant.....	210
Tableau A 2.2 Pertes d'énergie dans un distillateur de type conventionnel bassin	211

NOMENCLATURE

- A : Aire, m^2
a : Azimut, degré
Cp : Chaleur massique, J/kg K
e : Coefficient de déviation (pourcentage de déviation), %
G : Rayonnement solaire incident, W/m^2
Gr: Nombre de Grashof, Sans dimension
H: Fraction du rayonnement solaire absorbé, W/m^2
h : Hauteur angulaire, degré
h₁: Coefficient de transfert de chaleur global interne, $W/m^2.K$
h₂ : Coefficient de transfert de chaleur global externe, $W/m^2. °K$
ID : Rayonnement solaire direct, W/m^2
Id : Rayonnement solaire diffus, W/m^2
K: Conductivité thermique, W/m. K
L (e): Epaisseur, m
Lv : Chaleur latente de vaporisation, kj/kg
N: Number of observations
m: Masse, kg
ṁ : Quantité de la masse d'eau en écoulement, kg/s
mew, md: Quantité d'eau produite, $kg/m^2.h$
P: Pression partielle, N/m^2
Pr: Nombre de Prandtl, Sans dimension
Qev : Quantité de chaleur par évaporation, W /h
q: Le flux de chaleur, W/m^2
r: Coefficient de corrélation
S : Surface d'échange, m^2
T: Température, K
TL: Temps Local,
TSV: Temps solaire vrai, h
TSM : Temps solaire Moyen, h
TU : Temps Universel, h
t: Temps, s
U: Coefficient de transfert de chaleur global, $W/m^2.K$

V : Vitesse du vent, m/s

x: Distance le long de la couverture en verre, m

Lettres grecques

α : Coefficient d'absorption,

α : Altitude, degré

α_t : Coefficient d'absorption thermique effective,

β : L'angle d'inclinaison de la vitre, degré

β_p : Coefficient d'expansion volumique, K^{-1})

δ : l'angle de Déclinaison solaire, degré

ε : Emissivité, Sans dimension

η_g : Efficacité globale, %

η_i : Efficacité interne, %

φ : Latitude, degré

λ : Conductivité Thermique, W/m. K

λ : Longitude, degré

μ : Viscosité dynamique, m/s^2

ρ : Masse volumique, kg/m^3

σ : Constante de Stephan Boltzmann, $W/m^2 \cdot K^4$

τ : coefficient de transmission

ω : l'angle horaire, degré

θ_i : Angle d'incidence, degré

θ_z : Angle Zénithal, degré

Indices

a : Air Ambiant,

b : Basin (Absorbeur),

c : Convection,

cd : Conduction,

c,g-a : Convection entre la vitre et l'air ambiant,

c,w-b : Convection entre l'eau et l'absorbeur,

c,w-g : Convection entre l'eau et la vitre,

eff : Effective,

ev: Evaporation,

ev,w-g: Evaporation entre l'eau et la vitre

g: Vitre,

ge: Face extérieure de la vitre,

gi : Face intérieure de la vitre,

i : Interne,

in (is): Isolant

r: Rayonnement

r,g-a : Rayonnement entre la vitre et le milieu ambiant,

r,w-g : Rayonnement entre l'eau et la vitre,

w: Eau

wf : film d'eau,

Introduction générale

1. L'eau et l'énergie

L'eau est un élément essentiel pour la continuité et le développement de l'humanité. Mais quelle est le futur de cette importante ressource ? Au plan mondial, la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour plus préoccupante. Le constat unanimement partagé est simple : déjà précaire dans certaines régions du globe, la situation ne pourra qu'empirer dans les années à venir. Le formidable essor démographique que va en effet connaître notre planète dans les prochaines années va nécessairement s'accompagner d'une explosion de la consommation en eau et d'une dégradation de sa qualité et quantité, cela risque de mettre gravement en péril l'approvisionnement en eau douce d'une grande partie de l'humanité et par voie de conséquence d'aggraver les conflits entre pays voisins ayant des ressources communes. A cet effet et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau, il est plus judicieux de repenser la planification des ressources en eau conventionnelles dans le cadre d'une vision globale qui intègre également l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres Le dessalement des eaux saumâtres et, a fortiori, de l'eau de mer procure une solution séduisante à cette problématique. C'est pourquoi le marché du dessalement est dorés et déjà en pleine expansion avec une progression de 7 % par an.

L'Algérie est l'un des pays qui s'intéresse à la recherche de nouvelles ressources et de nouveaux procédés de fournir de l'eau fraîche. Ce besoin en eau est dû principalement à la croissance rapide de la population, au développement des différents secteurs tel que l'agriculture et l'industrie, mais aussi à la sécheresse qui a pris de l'ampleur et qui est devenue un facteur menaçant même le mode de vie, pour combler à ce déficit , on a misé sur le dessalement solaire (distillation solaire), comme l'une des futures source d'eau, qui contribuer et porter des solutions d'avenir proposées pour la production d'eau douce, étant donné que le pays est caractérisé par une forte intensité de rayonnement solaire durant la plupart des périodes de l'année.

2. Objectif du travail

En relation avec ce sujet, plusieurs travaux ont été mis en œuvre ces dernières années et on portés des résultats satisfaisante surtout dans les régions intérieurs aride ou semi aride, qui sont caractérisés par un climat régnant à forte intensité du rayonnement solaire, qui est très

favorable à être utilisé au profit de l'exploitation du gisement des ressources en eau saumâtres existante en profondeur sous forme de nappes.

Le travail effectués dans le cadre de cette thèse, rapporte une contribution enchaînée aux travaux précédant dans ce domaine, dans ce contexte notre travail concerne plus précisément, l'étude et l'analyse d'un nouveau concept de distillateur solaire type asymétrique à double effet possédant une seule pente, en comparaison avec un modèle de distillateur type conventionnel type symétrique à double pente.

Le but de ce présent travail est de comparer l'effet de l'orientation sur la performance des deux unités de distillation, en liaison nous avons optimisés d'autres paramètres de conception des deux modèles en question, dans le contexte de l'orientation (est-ouest) et (sud-nord) et dans les conditions climatiques envisagées à savoir le journée la plus chaude durant la décennie allant de (2002-2012).

Pour concrétiser les objectifs principaux de la présente thèse, nous avons élaborés un plan de travail qui résume les différents étapes suivantes :

3. Organisation du travail

Chapitre I : Etude bibliographique où l'on rappelle quelques définitions entre autre

Le contexte de l'énergie renouvelable dans le développement durable étant donné comme une énergie émergente à multiple sources et utilisation.

La problématique de l'eau, son rôle dans la vie est aussi soulevé, sans oublier que les enjeux du monde d'aujourd'hui qui se dirige vers ces deux ressources critiques qui sont inextricablement liés l'eau et l'énergie avec l'apport des principes des techniques de dessalement de l'eau saumâtres et de l'eau de mer. Nous n'avons pas manqués de signaler le passage en revue des différentes méthodes utilisées pour l'amélioration de la productivité des types de distillateurs solaires.

Chapitre II : Cette partie est consacrée au : **Gisement solaire et Thermique solaire** qui comporte essentiellement la description de la source de l'énergie solaire 'le soleil', les données astronomique du soleil-terre ajoutant les paramètres pouvant influencer l'énergie captée par un système de distillation ,tenant compte aussi du rayonnement solaire comme énergie émise par le soleil, nous avons étudiés sa nature et sa composition, comme ,nous avons introduit aussi la répartition du rayonnement solaire à l'échelle extraterrestre et au sol principalement sur lors de son captage par une surface horizontale ou une surface inclinée tel que reçu par un distillateur solaire, en relation nous avons détaillés les principaux phénomènes intervenant dans la conversion thermique de l'énergie utilisant des systèmes solaire c'est les mécanismes de transfert chaleur et de masse .

Chapitre III : Etude et Modélisation des systèmes proposés à l'étude. Cette partie présente l'étude et l'analyse et les modélisations des deux systèmes de distillateurs solaires de type symétrique et asymétrique à effet de serre. Une synthèse de cette démarche a abouti à la conception de chacun des deux modèles proposés à l'étude. Une analyse détaillée de chacun des phénomènes thermiques des deux unités de distillation solaire a été faite dont le principe de fonctionnement de chaque modèle de distillateurs est dicté selon des hypothèses explicites conduisant à élaborer des systèmes d'équations différentielles pour chacun des deux systèmes, en introduisant la méthode de résolution et le principe de la programmation. La résolution des systèmes d'équations différentielles non linéaires se concrétise à travers un programme de simulation numérique développé en langage « Matlab »

Chapitre IV : Résultats et discussion. Cette étude, est basée sur un facteur principal, représenté par l'effet des différentes orientations : est- ouest et sud-nord, sur la performance des deux unités de distillations solaire. Nous avons pris en considération l'impact de certains paramètres opérationnels tels que l'angle d'inclinaison, la profondeur de l'eau de bassin, l'effet des coefficients d'échange internes et externes et enfin l'effet de l'épaisseur de l'isolant sur la productivité des deux distillateurs cités auparavant. Les résultats obtenus sont utilisés pour comparer le rendement relatif aux deux systèmes décrit, en vue de sélectionner le distillateur le plus performant.

Enfin, une synthèse des principaux résultats obtenus est présentée dans la conclusion générale ainsi que des perspectives qui se dégagent logiquement en fin de ce travail.

CHAPITRE I. ETUDE BILIOGRAPHIQUE

Introduction

Cette partie présente quelques informations utiles sur le contexte de l'énergie renouvelable dans le cadre du développement durable qui est devenu une nécessité de par le monde entier, vu les avantages qu'elle présente sur le plan environnemental et ou économique, c'est aussi une énergie émergente à multiple sources d'utilisation telles que : l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie éolienne, etc. Notre étude prend aussi en compte la problématique de l'eau (disponibilité) et son rôle dans la vie, étant donné que les enjeux dans le monde actuel se dirigent vers ces deux ressources à savoir l'eau et l'énergie. La diversification des ressources en eau est aussi importante, où dans ce contexte nous avons décrit les principes des techniques de dessalement de l'eau saumâtres et de l'eau de mer qui se répartissent en deux grandes catégories, d'une part il y a les différents processus de distillation thermiques (qui nécessitent un changement de phase : évaporation – condensation) et d'autre part, les procédés à membranes (filtration), dont l'osmose inverse et l'électro dialyse. Une synthèse sur l'état de l'art et la situation du processus de dessalement solaire dans le contexte des énergies renouvelables sera également présentée. Comme la distillation solaire est une technique concernant ce sujet, il nous a semblé intéressant de rappeler les principes de base de cette simple technologie et de ses aspects fondamentaux. La dernière partie est consacrée effectivement au passage en revue des différentes méthodes utilisées pour l'amélioration de la productivité des différents types de distillation solaire.

I.1. Contexte de l'énergie renouvelable dans le développement durable

Dans le cadre du développement durable, et face au double enjeu planétaire posé par l'éventuel épuisement des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés à la qualité de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. En effet, la consommation mondiale d'énergie ne cesse, en effet, de croître selon les données illustrées dans la figure 1.1, posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques [1]. Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire.

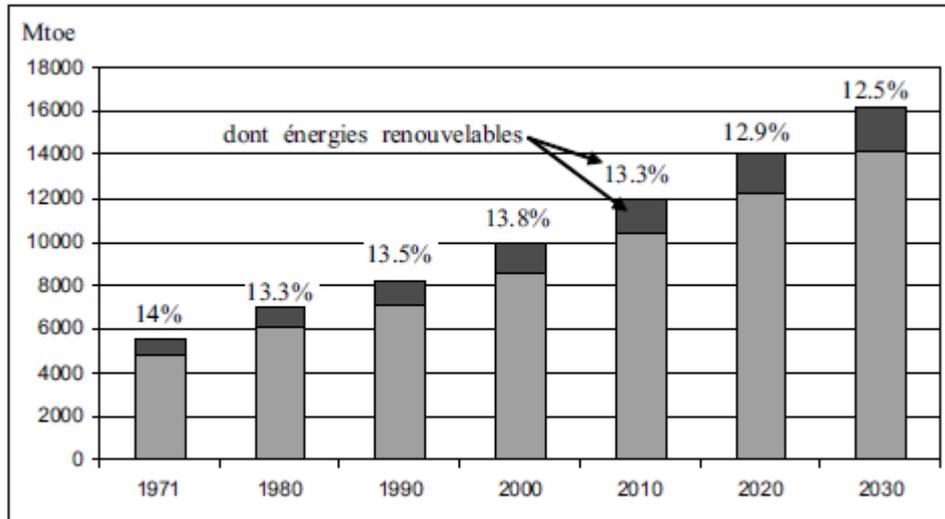


Figure I.1 : Prévisions de la consommation de l'énergie primaire dans le monde.

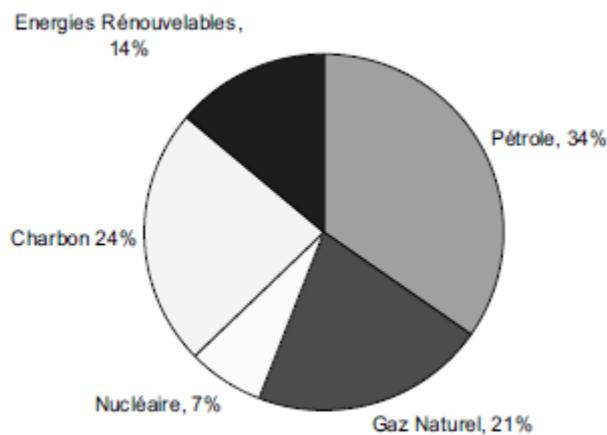


Figure I.2 : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par le rejet des gaz à effet de serre [2] provoquant un changement climatique irréversible et où dans le cas du nucléaire, une pollution par radiations à effet de longue durée pose problème, sans oublier le problème stockage des déchets radioactifs. L'autre argument qui milite à l'avantage des ressources d'énergie renouvelables est lié à leur pérennité. Dans le courant du 21ème siècle, le paysage énergétique va radicalement changer, car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour « essayer » de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres. Dans le contexte économique actuel où l'on ne chiffre qu'une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement des centrales nucléaires, pollution, etc.), les installations à énergie renouvelable peuvent encore aujourd'hui avoir un coût important (exemple des panneaux solaires photovoltaïques) et qui sont plutôt réservées à des pays développés dont elles peuvent, dans d'autres cas, être peu onéreuses (exemple de la combustion de la biomasse) et qui peuvent être utilisées dans les pays en voie de développement.

I.1.1. Génération d'énergie renouvelable

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, l'éolienne), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique, etc.) tout en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies c'est l'énergie provenant du soleil, qui est transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins, etc.). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de l'irrégularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations, selon les périodes annuelles ou journalières, de la demande en puissance ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs ressources, par exemple de l'énergie solaire avec l'énergie éolienne.

I.1.2 Thermo solaire

Un des moyens pour profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct à partir des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui, à leur tour, réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 °C voire 80°C. Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type de capteurs universel est que

l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans des zones couvertes de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement pour le chauffage individuel ou chauffage des piscines). En 2003, environ 14.000 m² de capteurs de ce type ont été en utilisation en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22 % [3]. Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante pour les pays en voie de développement. La technologie thermo-solaire est plus évoluée lorsqu'on utilise des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permettant d'obtenir un fluide à des températures très élevées. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée qui demande un ensoleillement direct et permanent.

I.1.3. Géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m de profondeur en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la terre dont les températures s'étalent de 1.000 °C à 4.300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères. Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement : la haute (> 180 °C), la moyenne (> 100 °C), la basse (> 30 °C) et la très basse énergie. Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie à basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de la chaleur dans les processus industriels, etc. La géothermie à très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très

élevé. En 1995, la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 7.000 MW (il s'agit de la production de l'électricité donc de la géothermie à grande et à moyenne énergie). En 2004, ce chiffre est passé à près de 8.500 MW. En Europe, les installations utilisant les pompes à chaleur permettent d'extraire théoriquement environ 1.000 MW de puissance sous forme de chaleur. Ce chiffre augmente chaque année d'environ 50 MW installés [4].

I.1.4. Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse.

Différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois – énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51 % de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie [5]. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois : les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élitage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes, etc.). L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW.

Le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui, l'éthanol (betterave, blé, etc.) et le biodiesel (colza, tournesol, etc.) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. L'union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution. Longtemps, le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. 80 % provenaient des décharges d'ordures ménagères. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum : une croissance de cette technologie est donc à prévoir.

I.1.5. Quelques données sur la topographie de l'énergie en Algérie

L'emplacement géographique de l'Algérie a plusieurs avantages concernant un usage intensif de la plupart des sources d'énergies renouvelables existantes (éolienne, géothermie, biomasse, solaire, etc.). L'Algérie est divisée en trois régions séparées par l'atlas tellien dans le nord, l'atlas moyennant les hauts plateaux et le Sahara et la plateforme saharienne (figure 3).

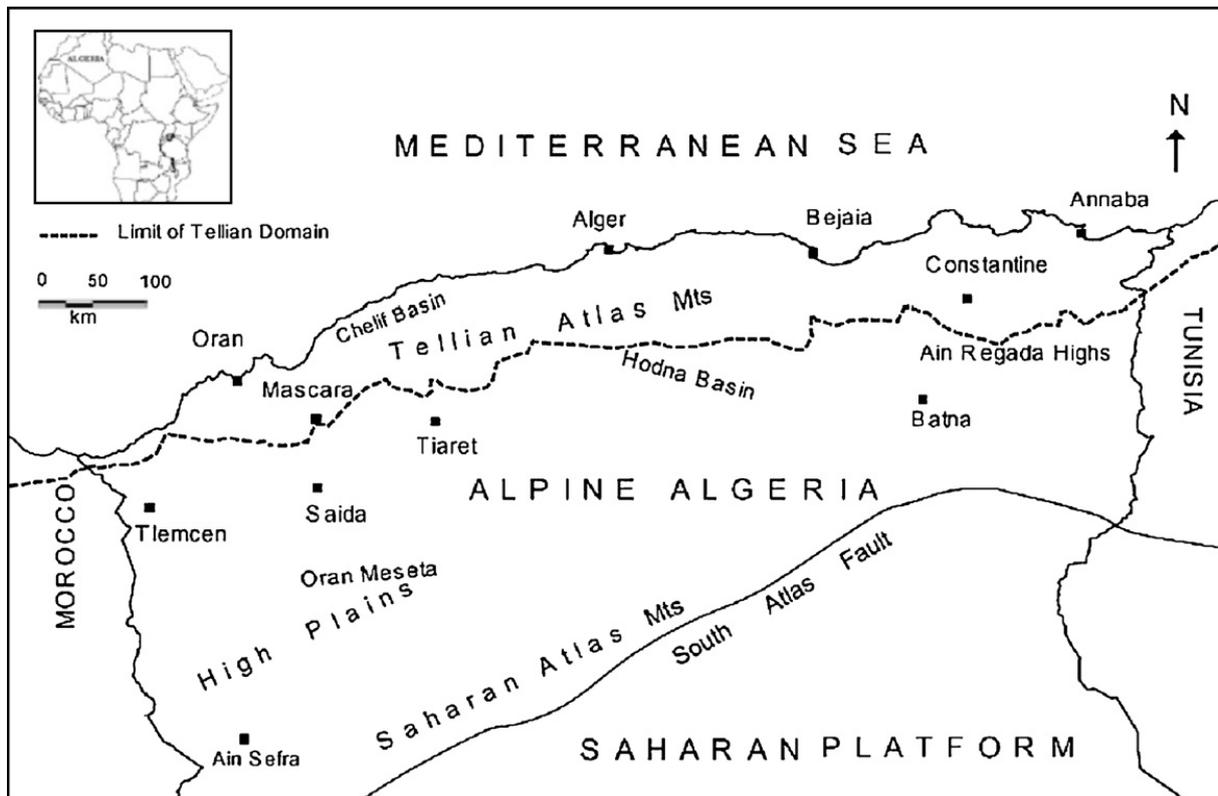


Figure I.3 : Topographie des principales régions climatiques en Algérie [6].

En 2005, la capacité géothermique installée est de 152,3 MWth dont 2,3 MWt vient du chauffage à effet de serre, 0,1 MWt de l'espace de chauffage, et le reste, à savoir 149,9 MWth, est destiné pour la baignade et pour des besoins de thermalisme [7]. La biomasse en Algérie, peut être utilisée pour répondre à une variété de besoins en énergie y compris la production d'électricité, le chauffage des maisons et la fourniture de la chaleur de processus pour les installations industrielles. La biomasse offre potentiellement de grandes promesses avec un roulement de 3,7 millions de TEP provenant des forêts et 1,33 million de TEP par an provenant des déchets agricoles et urbains, mais ce potentiel n'est pas encore amélioré et consommé [8]. L'énergie solaire est la source naturelle la plus abondante en Algérie. Il devient impératif pour l'Algérie d'exploiter cette importante ressource avec un temps

d'insolation sur la quasi totalité du territoire national qui dépasse 2.000 h par an et parfois il peut atteindre les 3.900 h/ an (cas du Sahara).

Les applications solaires, par l'implantation de centrales photovoltaïques, sont une extension des centrales existantes en diesel dans les régions isolées qui sont limitées en électrification, le pompage, les télécommunications, l'éclairage public et les petits systèmes de réfrigération. La puissance totale du photovoltaïque installée (PV) est d'environ 1,2 MW [8]. L'énergie obtenue par jour sur une surface horizontale de 1 m² est de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit environ 1.700 kWh / année/ m² pour le nord et 2.650 kWh / année /m² pour le sud du pays (voir tableau 1) [9].

Tableau I.1 : Potentielle de l'énergie solaire moyenne annuelle pour différentes zones d'Algérie.

Régions	Littoral	Hauts Plateaux	Sahara
Surface (%)	04	10	86
Moyenne de la durée d'enseillement/année	2.650	3.000	3.500
Moyenne de l'énergie reçue par année (Kw/m ² .année)	1.700	1.900	2.650

I.2. Problématique de l'eau potable

I.2.1. Le rôle de l'eau dans la vie

L'eau est une substance 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 depuis le début du XX^{ème} siècle suivant ainsi l'amélioration du niveau de vie et l'augmentation de la population mondiale. Sa disponibilité dans le monde commence à diminuer sous l'effet de la croissance démographique et du changement climatique. Elle sera dans les prochaines années une denrée de plus en plus rare. A l'égard de notre époque moderne qui est caractérisée par un essor démographique, industriel et agricole sans précédent, des utilisations nouvelles sont venues s'ajouter aux usages anciens et classiques de l'eau. L'exploitation de plus en plus poussée des potentiels de production jointe à la nécessité d'alimenter des collectivités plus nombreuses, et où les besoins de chaque individu sont en augmentation permanente, exigera dans les années

qui viennent de nouvelles ressources hydriques, car la disponibilité de l'eau et son abondance sur notre planète se trouve à 97% dans les mers et les océans comme eau salée [10]. Donc, cette ressource doit être soumise à un traitement rigoureux qui nécessite des équipements pour la rendre potable. Le reste des ressources disponibles est constitué d'une eau potable constituant seulement 3% du débit mondial et même cette quantité n'est pas uniformément répartie au niveau de notre planète où seulement neuf pays se partagent près de 60 % du débit annuel mondial. En plus, il y a la répartition irrégulière d'une année à l'autre ou parfois d'une saison à l'autre (plus de 60 % du débit annuel mondial étant généré lors d'inondations suivies de sécheresses, parfois pluriannuelles).

I.2.2. L'eau, l'environnement et l'économie

L'exigence d'une eau propre est essentielle pour une bonne santé qui influe directement sur la vie sociale et le développement économique d'une nation voir sur les personnes qui utilisent l'eau contaminée et sujette à des maladies d'origine hydrique (OMS, 2006). Il y a aussi des préoccupations majeures au sujet de la dégradation de l'environnement résultant principalement de la surexploitation des ressources énergétiques non renouvelables. Les activités anthropiques génèrent des Gaz à Effet de Serre (GES) poussant à une hausse de la température ambiante de l'air [11]. L'utilisation de combustibles fossiles contribue de manière significative au changement climatique par l'émission de dioxyde de carbone (GES majeur) et d'autres substances [12]. Il a été aussi rapporté que les impacts du changement climatique sont actuellement observables [13]. Cependant, il y a un accès limité à l'eau potable qui répond aux normes biologiques, chimiques et physiques des constituants plus acceptables à cause de la présence d'une pollution de l'environnement issue principalement des activités anthropiques dont elles contribuent également à la dégradation des ressources en eau douce. A cet effet, un défi est lancé avec une approche multi-facettes qui comprend le développement de technologies appropriées pour le dessalement de l'eau par l'énergie solaire. Néanmoins, cette source d'énergie durable est nécessaire pour fournir de l'eau fraîche à une partie de la population mondiale. Par conséquent, l'application des technologies de l'énergie renouvelable dans l'approvisionnement en eau douce peut aider à atténuer la dégradation environnementale.

I.2.3. Critères de la qualité de l'eau

Une eau potable est une eau douce inodore, incolore, insipide qui ne contient pas de produits toxiques, mais contient quelques sels minéraux avec des concentrations réglementées et qui doivent être respectées. L'Organisation Mondiale de la Santé a édicté des normes

internationales pour l'eau potable, qui comprennent un exposé général des normes bactériologiques, physiques, chimiques, biologiques et radiologiques. Une eau destinée à des fins domestiques doit avoir une salinité inférieure ou égale à 0,5 g/l, avec une dureté (T.H) entre 1,5 et 3 degrés et elle ne doit pas contenir plus de 200 mg/l de chlore, ni plus de 75 mg/l de calcium, ni plus de 50 mg/l de magnésium, ni plus de 150 mg/l de sulfates [14]. Le pH, qui dépend de la teneur en ions, conditionne les équilibres physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôt). Le pH est acide dans les eaux des aquifères sableux ou granitiques. Il est alcalin dans les calcaires. Le pH est corrigé selon le cas par élimination du CO₂ dissous en excès ou par correction de la dureté carbonatée. La concentration d'ions dans l'eau est mesurée avec son pH qui est généralement égale à 7.0. La teneur en gaz dissous issus de l'atmosphère (O₂ et CO₂), la teneur en substances minérales dissoutes généralement sous forme ionique : anions (bicarbonates, chlorures, sulfates, nitrates, fluorures) et cations (calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, manganèse, ammonium).

Tableau I.2 : Classification des eaux selon la salinité [15].

Type d'eau	Salinité (mg/l)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1.000 - 5.000
Eau modérément saumâtre	5.000 - 15.000
Eau très saumâtre	15.000 - 35.000
Eau de mer	35.000 - 42.000

I.2.4. Eau de mer

L'eau de mer est un liquide dont la composition est extraordinairement variée, puisqu'on y trouve une cinquantaine de corps simples. L'énumération de ces corps simples va de l'hydrogène, de l'oxygène, ainsi de la teneur de l'eau de mer en sels est plus importante dont le sel prédominant est le chlorure de sodium (environ 27 g/l), Il y a aussi du chlorure de magnésium (environ 3,8 g/l), du sulfate de magnésium (environ 1,7 g/l), du sulfate de calcium (environ 1,3 g/l), du sulfate de potassium (environ 0,8 g/l) et du carbonate de calcium (environ 0,1 g/l) ; ce dernier étant d'ailleurs sous forme de bicarbonate soumis à l'équilibre carbonique. Il y a aussi du bromure de magnésium (environ 0,08 g/l). En additionnant les

teneurs ci-dessus, on trouve que l'eau de mer possède une salinité moyenne de 35 g/l, mais en réalité, il faut considérer que l'eau de mer contient généralement de 35 à 42 g/l de sels minéraux dissous, et la salinité étant différente selon les mers [16].

Tableau I.3 : Degré de salinité des eaux de mers [16].

Eau de mer	degré de salinité (g/l)
Mer Baltique	7.0
Mer Caspienne	13.5
Mer noir	20
Mer adriatique	25
Océan Pacifique	33.5
Océan Indien	33.8
Océan Atlantique	35
Mer méditerranée	39
Golfe arabique	42
Mer rouge	43
Mer morte	270

I.2.5. L'eau saumâtre

Une eau saumâtre est une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. Les eaux de certaines nappes superficielles ou souterraines peuvent être salées, avec des salinités très diverses. Les eaux des lagunes, plus ou moins en communication avec la mer, peuvent présenter une salinité très élevée. On trouve aussi à l'intérieur des continents des lacs d'eau salée. Elles sont classées en trois catégories suivant le degré de salinité :

- Les eaux peu saumâtres $1.000 < \text{salinité} < 3.000$ ppm.
- Les eaux moyennement saumâtres $8.000 < \text{salinité} < 10.000$ ppm.
- Les eaux fortement saumâtres $10.000 < \text{salinité} < 33.000$ ppm.

Les deux premières catégories se trouvent particulièrement en Afrique du nord, en Moyen Orient et aux U.S.A. [17].

I.3. L'eau et l'énergie

L'eau et l'énergie sont deux des sujets les plus importants au niveau du programme de développement sur l'environnement international. La santé économique et sociale du monde

moderne dépend de l'approvisionnement durable en énergie et en eau. Ces deux ressources critiques sont inextricablement et réciproquement liées : la production d'énergie nécessite de grandes quantités d'eau pendant le traitement et la distribution. La disponibilité de l'eau est dépendante d'une énergie à faible coût.

I.3.1. Les procédés de dessalement

Devant une crise d'eau certaine qui commence à se faire sentir à travers le monde, en plus des contraintes économiques pour un développement durable, des solutions appropriées nécessitent d'être élaborées afin de se préparer à faire face à ce défi qui menace l'existence même de l'homme. Les pays du sud, qui disposent parfois des ressources hydriques salines considérables et d'un potentiel solaire tout aussi important, doivent utiliser les techniques de dessalement, dont la fiabilité n'est plus à démontrer, en les associant à des sources d'énergies renouvelables. Cet état de fait constitue un moyen d'avenir pour produire de l'eau potable. Nous nous intéressons aujourd'hui au potentiel de synergie entre le solaire et les différents procédés de dessalement. L'énergie solaire thermique est considérée comme l'une des applications les plus prometteuses de l'énergie renouvelable pour le dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau de mer, comme il est approprié pour les régions arides et semi arides qui offrent une énergie solaire gratuite.

I.3.2. Techniques de dessalement

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, par les différents procédés existants, connaît un développement important. Les procédés de dessalement de l'eau se répartissent en deux grandes catégories, d'une part et parmi les plus connus, il y a le procédé de distillation thermique (qui nécessite un changement de phase : évaporation – condensation) et d'autre part les procédés à membranes (filtration) [18] dont l'osmose inverse et électrodialyse qui sont des techniques à forte intensité énergétique, et ne sont réalisables que pour les grandes exigences en eau douce. De plus il y a d'autres procédés comme le procédé d'échange d'ions, le procédé de congélation [18] et les procédés de l'humidification. La figure 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.

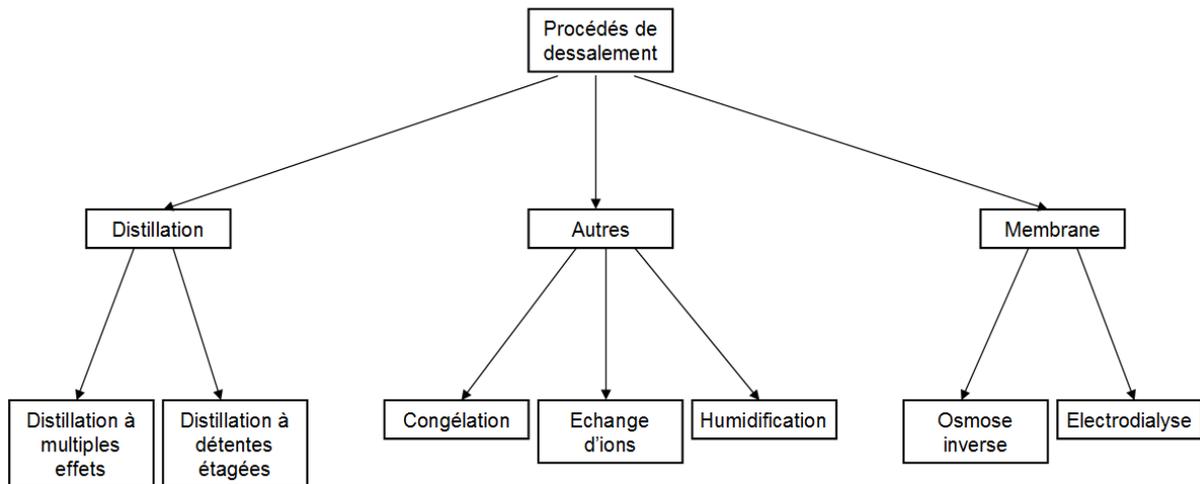


Figure 1.4. Classification des procédés de dessalement [19].

I.3.3. Processus de distillation thermique

Le procédé de dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau saline est un bon moyen pour obtenir de l'eau fraîche vu son accessibilité par des moyens simples et disponibles, c'est ainsi que les procédés à distillation nécessitent pour la plus grande part de l'énergie thermique pour assurer le chauffage de l'eau salée, et la source de chaleur peut être fournie dans le cas d'un accouplement de l'énergie solaire. Dans le dessalement thermique, les sels sont séparés de l'eau par des procédés d'évaporation- condensation. Parmi les procédés les plus connus à distillation thermique on distingue :

- La distillation solaire directe à effet de serre (Simple Effect Distillation [SED]) qui constitue un procédé proprement solaire.

Les procédés à distillation classique tels que :

- La distillation à multiples effets (Multiple Effect Distillation [MED]).
- La distillation à multiples étages (Multiple Stage Flash [MSF]).
- La distillation par compression de la vapeur (Vapour Compression [VC]).

L'amélioration des techniques de distillation par utilisation de l'énergie solaire est idéale dans le domaine de dessalement de l'eau surtout dans les zones où la demande en eau est en dessous de 50 m³ par jour [20]. Néanmoins, il est encore nécessaire d'augmenter la productivité des distillateurs solaires à un prix abordable en particulier dans le cadre de développement des régions du monde.

I.3.3.1. La distillation solaire directe à effet de serre (Simple Effect Distillation [SED])

Elle constitue un procédé proprement solaire. Ce procédé consiste à chauffer directement un composé volatil d'une solution (l'eau saumâtre) par le rayonnement solaire

dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite se condense sur le vitrage le plus froid et légèrement inclinée et est recueillie sous forme de condensat dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien, mais son rendement est relativement faible 4-5 l / J /m². Une circulation de vapeur permet de chauffer dans un évaporateur l'eau salée, qui s'évapore sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, on peut alors condenser directement la vapeur sortant de l'évaporateur, sans récupération de la chaleur de condensation, ou bien, au contraire, on peut envoyer la vapeur dans un condenseur en vue du préchauffage de l'eau salée qui arrive dans l'installation.

I.3.3.2. La distillation à multiple effet (MED)

La distillation à multiple effet se produit dans une série d'évaporateurs, et utilise le principe de réduction de la pression dans les cellules, qui permet la vaporisation de l'eau de mer, sans fournir de chaleur supplémentaire après le premier effet [21]. L'eau de mer est chauffée dans le premier corps d'évaporation par des tubes alimentés par la vapeur d'une source extérieure. La vapeur émise par ébullition dans ce corps (effet) sert à évaporer l'eau dans le deuxième corps. La vapeur de chauffe condensée dans le premier corps est récupérée sous forme d'eau douce à la sortie du deuxième corps. Cette opération est répétée dans plusieurs effets (de 4 à 21). La consommation d'énergie de la distillation à effet multiple s'exprime par :

$$Q = m_e c_p \Delta T + \frac{m_s \Delta H_{vap}}{n} \quad (I.1)$$

n : est le nombre d'effets ;

m_e et m_s : sont respectivement la masse de l'eau de mer admise et la masse de l'eau douce produite ;

C_p : la chaleur spécifique de l'eau de mer ;

ΔT : l'écart entre la température d'ébullition et la température de l'eau de mer à l'entrée de l'enceinte ;

ΔH_{vap} : la chaleur de vaporisation moyenne de l'eau dans les différents corps.

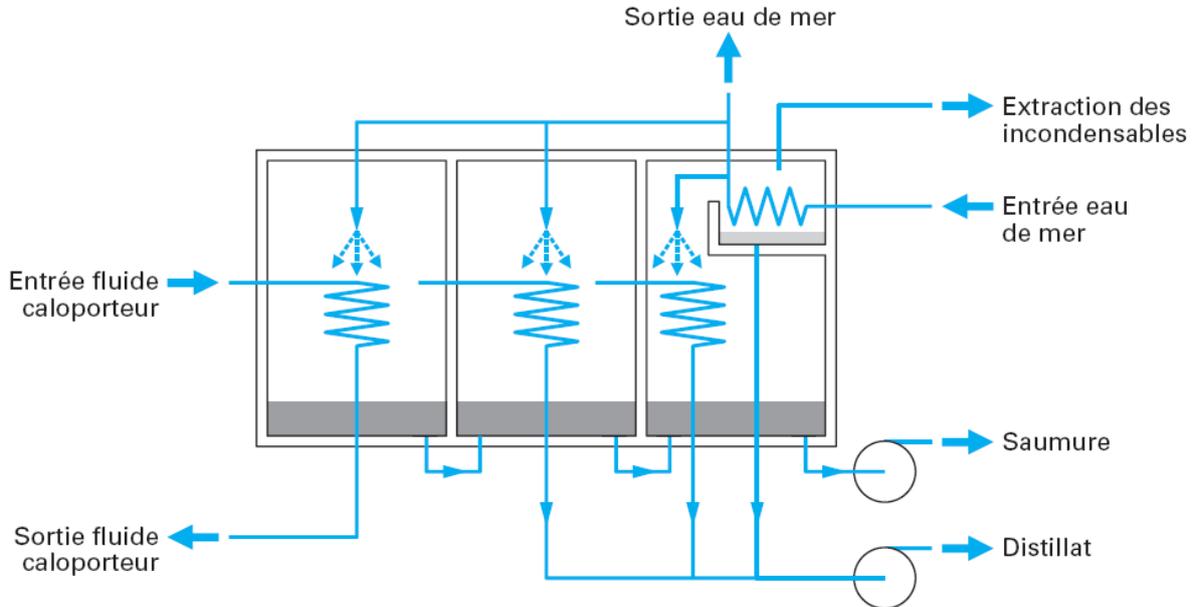


Figure I.5 : Distillation à multiple effet [22].

Dans une unité de dessalement par distillation à multiple effet, la vapeur émise peut être comprimée pour produire une chaleur suffisante à l'évaporation. Deux méthodes sont utilisées : la compression mécanique et la thermo-compression. Dans le cas où aucune source extérieure de chaleur n'est disponible, la vapeur produite dans le dernier corps est comprimée dans un compresseur centrifuge et alimente ainsi le serpentin du premier corps. C'est la compression mécanique. Dans le procédé par thermo-compression, un apport de vapeur (30 bars) est requis. Cet apport de vapeur alimente un éjecteur à vapeur qui permet d'aspirer la vapeur produite dans le dernier corps. Les deux vapeurs sont mélangées et sortent de l'éjecteur avec une pression plus élevée. La vapeur obtenue est alors alimentée dans le serpentin du premier corps. La thermo-compression permet ainsi d'abaisser la consommation d'énergie en récupérant l'enthalpie de vaporisation de la vapeur produite dans le dernier corps. La température maximale de fonctionnement d'une unité de distillation à multiple effet est entre 60 et 63 °C, ce qui réduit la vitesse de corrosion et permet l'utilisation d'aciers inoxydables standards [22].

I.3.3.3. La distillation à multiples étages 'La distillation à détente étagée' (Multiple Stage Flash [MSF]).

Dans le procédé de distillation à détente étagée (multi stage flash), la vaporisation de l'eau de mer est obtenue par une succession de réduction de pression dans chaque étage. L'eau salée est tout d'abord chauffée puis introduite dans une première chambre à basse

pression, de sorte qu'une partie est instantanément vaporisée. La vaporisation d'une partie de l'eau produit une diminution de température de la solution restante. Cette solution est introduite dans la chambre suivante à pression plus réduite et le processus est ainsi répété dans plusieurs étages (50 étages peuvent être installés dans une usine). La vapeur produite est refroidie par échange de chaleur avec l'eau de mer d'alimentation et condensée sous forme d'eau dessalée. Les unités de dessalement par distillation à détente successive opèrent à des températures entre 120 °C et 90 °C ce qui tend à augmenter la productivité mais aussi le problème d'entartrage. Pour éviter l'entartrage qui est dû aux ions bicarbonates, l'eau de mer est traitée par l'ajout d'inhibiteur d'entartrage comme des poly phosphates ou bien par neutralisation des bicarbonates avec l'acide sulfurique. La saumure est recyclée dans ce procédé pour réduire le débit de prétraitement de l'eau d'alimentation et par conséquent son coût. Cette technique permet d'atteindre de très grandes capacités (supérieures à 25.000 m³/j), mais la consommation énergétique est supérieure à celle de la distillation à multiple effet [22].

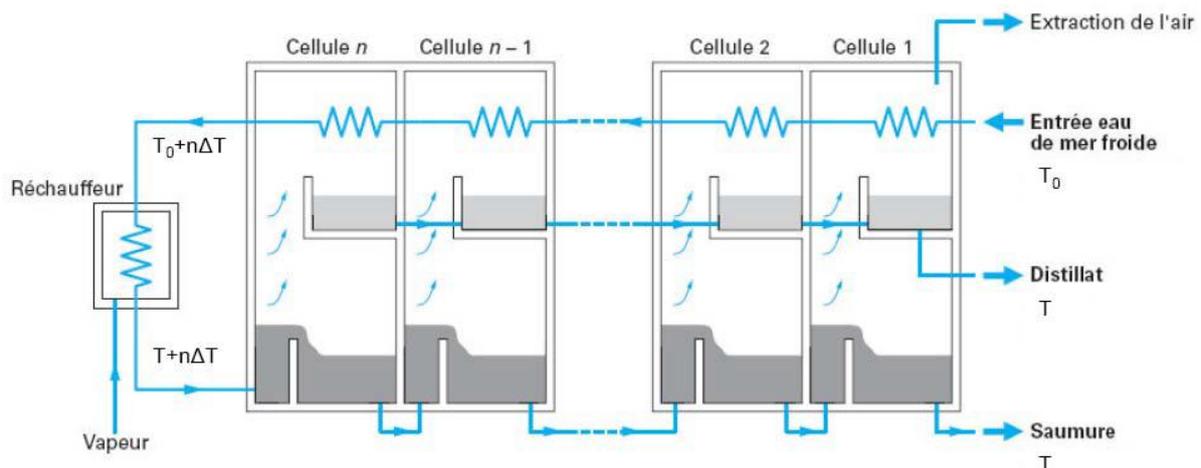


Figure I.6 : Distillation à détente étagée [22].

I.3.4. Procédé à membrane (Filtration)

Les procédés à membranes sont des procédés dont la source principale d'énergie est l'électricité comme : l'osmose inverse (Reverse Osmosis [RO]) et l'ElectroDialyse [ED]. Les techniques à base de membranes utilisent une membrane à travers laquelle l'eau se diffuse avec une forte proportion de sels qui est retenue. Par cette technique l'eau salée est ainsi filtrée sous pression à travers une membrane. Les sels et les microorganismes sont retenus par cette dernière. Ce procédé nécessite toutefois un traitement de l'eau en amont. Cependant, ces techniques nécessitent un apport considérable d'énergie et ne sont pas rentables pour les faibles demandes d'eau [23].

I.3.4.1. L'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de purification de l'eau inspiré du phénomène chimique appelé l'osmose. Le principe du procédé de l'osmose inverse consiste à faire passer, sous l'effet d'une pression de l'eau pure à travers une membrane semi perméable qui a la caractéristique de retenir les sels dissouts dans l'eau. Dans ce principe, on a besoin de l'énergie nécessaire à alimenter une pompe à haute pression, ce qui peut être fourni de façon économique, pour les petites installations, par un générateur photovoltaïque ou un aérogénérateur. Un certain nombre d'installations est en fonctionnement à travers le monde, et les résultats obtenus à travers les différentes études théoriques et expérimentales rendent son application très encourageante. Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est réalisé en appliquant à la solution à dessaler, une pression supérieure à la pression osmotique de cette solution sous l'effet de laquelle l'eau s'écoule à travers une membrane semi-perméable dans la direction inverse (du compartiment contenant l'eau salée vers le compartiment d'eau douce) (figure I.7). Ce procédé est simple, mais pose un vrai problème au niveau de l'encrassement des membranes, qui nécessite un prétraitement poussé de l'eau de mer.

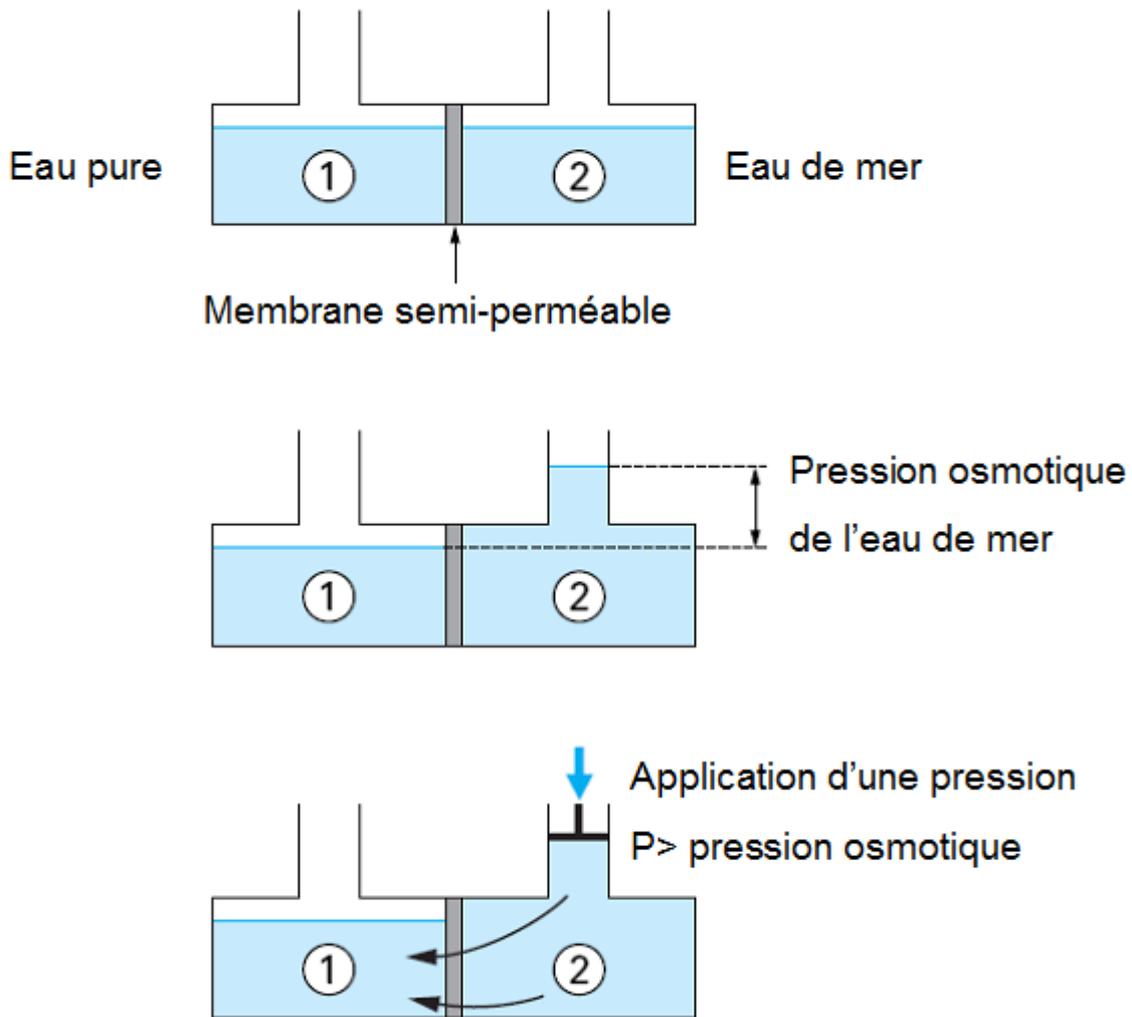


Figure I.7 : Mise en évidence de l’osmose inverse [22].

Avant le prétraitement chimique, l’eau de mer d’alimentation est filtrée pour retirer le solide en suspension et les particules supérieures à 10 microns. Le prétraitement chimique inclut l’addition d’hypochlorite de sodium pour la prévention contre la croissance des microorganismes, de chlorure ferrique comme flocculant, d’acide sulfurique pour l’ajustement du pH, et enfin de bisulfite de sodium pour la réduction du chlore [21]. La circulation de l’eau de mer à travers les modules d’osmose inverse est assurée par des pompes à haute pression dont la puissance est donnée par :

$$P_{\text{pompe}} = \frac{q_v \cdot h_m}{\eta} \tag{I.2}$$

Avec q_v , comme étant le débit volumique en m^3/s ;

h_m , la différence entre la pression de refoulement et la pression d’aspiration en Pa ;

η , le rendement de la pompe.

La pression de fonctionnement pour l'eau de mer est comprise entre 54 et 80 bars contre une pression osmotique de l'ordre de 25 bars [24]. La plupart des usines d'osmose inverse sont équipées par des systèmes de récupération d'énergie de pression à partir du débit de concentrât sortant à pression élevée. Cette récupération se fait au moyen d'une turbine, qui peut être couplée directement à une pompe d'alimentation des modules ou à un alternateur produisant de l'électricité [22].

I.3.4.2. L'électrodialyse [E.D]

Un électro-dialyseur est formé essentiellement d'une cuve dans laquelle on place un certain nombre de membranes sélectives, en faisant alterner les membranes anionique et les membranes cationiques, qui délimitent une suite de compartiments. On fait circuler dans cette cuve l'eau saline, on la fait traverser par un courant électrique continu grâce à des électrodes, donc on va voir une migration des ions de l'eau saline à travers ces membranes imperméables à l'eau. Une membrane sélective est infranchissable par les ions d'une catégorie tels que les cations, mais laisse pénétrer sur une face de la membrane les ions de l'autre catégorie (anions) et ne laisse pas pénétrer sur l'autre face, donc la membrane était perméable aux anions et imperméable aux cations, on dit que c'est une membrane anionique et on définirait de façon analogique une membrane cationique, possédant la propriété inverse. L'électrodialyse est un procédé électrochimique qui permet d'extraire les ions (atomes chargés positivement ou négativement) d'une solution en les déplaçant. Ainsi par électrodialyse, on peut extraire par exemple les ions Na^+ et Cl^- de l'eau de mer. Ce procédé fonctionne avec un appareil nommé électro dialyseur. L'extraction des ions se fait par migration de ces derniers à travers des membranes sélectives (anioniques ou cationiques) sous l'action d'un champ électrique. Ainsi, seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique et seuls les cations peuvent traverser une membrane cationique. En plaçant plusieurs membranes en parallèle laissant passer alternativement les ions positifs et les ions négatifs, on peut éliminer certains ions de l'eau. Dans certains compartiments il y a concentration des ions et dans d'autres les ions sont éliminés. Les particules qui ne portent pas de charge électrique ne sont pas éliminées. L'électrodialyse est utilisée pour le dessalement de l'eau de mer. La figure I.8 présente schématiquement le fonctionnement d'une unité en parallèle de dessalement. En fin de chaîne de traitement, on récupère à la fois de l'eau douce et de la saumure. Il existe également des unités en série et d'autres modèles de système d'électrodialyse. Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes, les ions Na^+ sont attirés vers l'électrode négative et les ions

Cl⁻ vers l'électrode positive, en raison de la sélectivité des membranes. Ainsi les ions Na⁺ peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et les ions Cl⁻ les membranes anioniques, on obtient donc de l'eau douce dans deux des quatre compartiments [25].

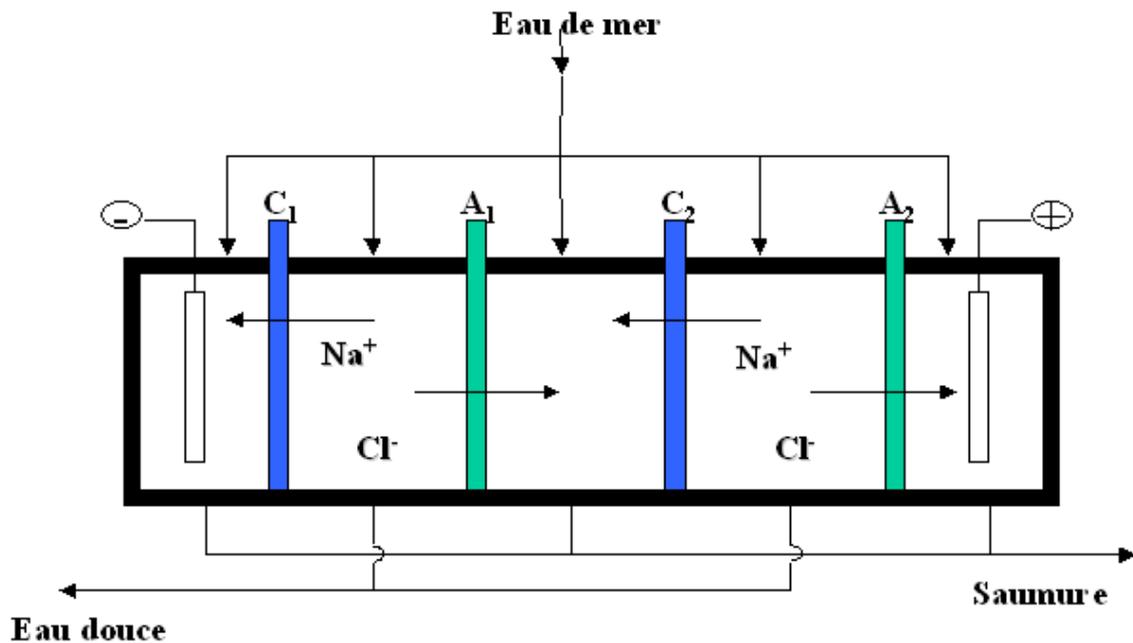


Figure I.8 : Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse [25].

En fait, l'électrodialyse est surtout utilisée jusqu'ici pour le dessalement des eaux saumâtres puisque le procédé n'est plus rentable pour des eaux ayant des teneurs en sels très élevées. L'électrodialyse n'est pas non plus pratiquée pour traiter les eaux à moins de 0,04 % de sels. Malgré ces limitations, plusieurs petites usines de dessalement par électrodialyse sont exploitées dans le monde sur des bases commerciales, dessalant ainsi plusieurs centaines de mètres cube par jour. La plus grande installation de traitement par électrodialyse traite actuellement 10.000 m³ par jour [26].

I.3.5. Autres Procédés dessalement

Il existe d'autres procédés comme le procédé d'échange d'ions, et le procédé de congélation [27].

I.3.5.1. Echange d'ions

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.3.5.2. Principe du dessalement par congélation

Cette technique est utilisée surtout dans les pays chauds. La température de congélation est presque indépendante de la pression, elle est déterminée par la concentration saline et varie de 0 °C pour l'eau pure jusqu'à environ -2 °C pour l'eau de mer et -4 °C pour une concentration qui est double que celle de l'eau de mer, le dessalement par congélation est basé sur le fait qu'une fraction d'une masse donnée d'eau saline se dérobe à la congélation en s'enrichissant en sels, la partie congelée étant formée d'eau pure. Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce. En pratique, la glace est contaminée par les sels lors de la congélation pour des raisons cinétiques, et par la saumure elle-même pendant la séparation glace-solution ; Le procédé doit permettre de minimiser cette contamination. Les opérations unitaires d'un procédé de dessalement par congélation sont :

1. le prétraitement de l'eau de mer (élimination des solides en suspension, élimination des gaz dissouts pour les procédés sous vide) ;
2. la formation des cristaux de glace à partir de la solution saline (pour les procédés en suspension, des cristaux de grande taille sont souhaités pour faciliter le lavage) ;
3. le lavage et / ou le ressuage des cristaux de glace (pour les procédés continus, lavage dans une colonne par environ 5% de l'eau produite) ;
4. la fusion des cristaux de glace.

Les procédés de congélation peuvent être divisés en trois catégories : la congélation primaire sous vide, la congélation secondaire et la congélation indirecte [28].

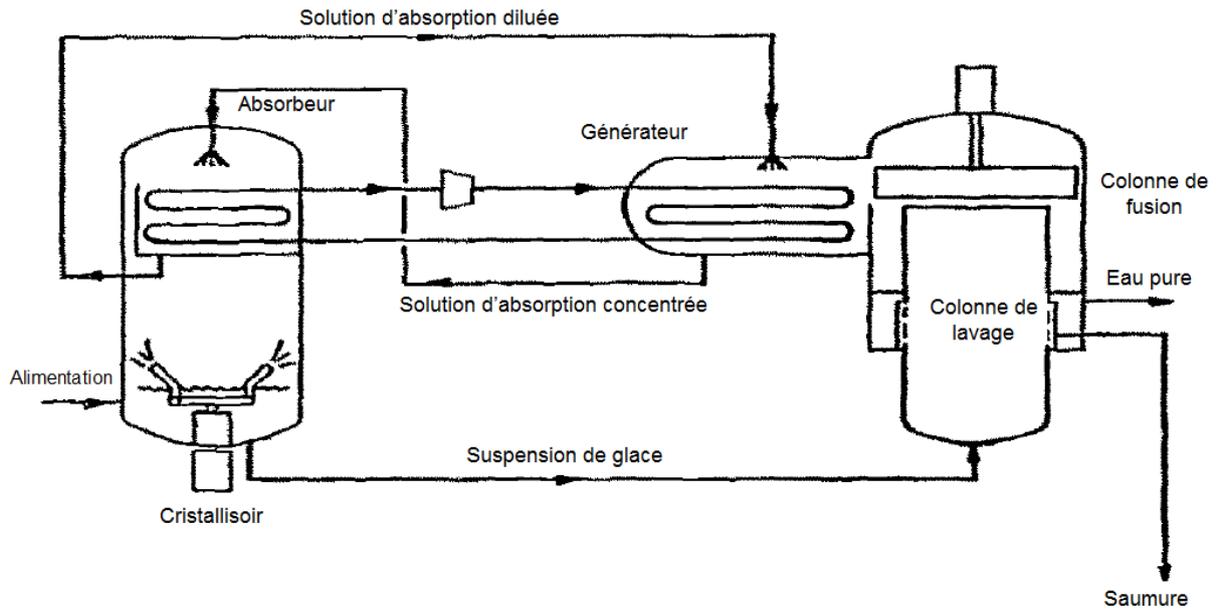


Figure I.9 : Procédé de congélation sous vide par absorption de vapeur (AFVC) utilisant une pompe à chaleur à compression [29].

I.4. Etat de l'art et situation du processus de dessalement solaire dans le contexte des énergies renouvelables - Principes de base-

I.4.1. La distillation

La distillation solaire est une alternative intéressante en raison de sa simple technologie, sa non exigence d'une main-d'œuvre qualifiée pour des travaux de maintenance, sa faible consommation d'énergie pour ces travaux de maintenance et sa faible consommation d'énergie, en plus l'implantation des unités de distillation ne demande aucune exigence particulière.

I.4.2. Contexte de la distillation solaire

Le procédé de dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau saline est une bonne méthode pour obtenir de l'eau fraîche vu son accessibilité par des moyens simples et disponibles. Ce procédé consiste à chauffer de l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement inclinée est recueillie sous forme de condensat dans des gouttières. Le principe est très simple et fiable. On l'appelle aussi procédé par changement d'état, c'est une opération qui peut être effectuée par le chauffage ou par la réduction de la pression ou de l'eau salée qui est transformée en vapeur d'eau, l'eau pure est ainsi obtenue par condensation. Le procédé par

distillation passe par trois phases : le chauffage de l'eau, le transfert de la vapeur vers le condenseur et la récupération de l'eau douce. Cependant, ce même procédé de distillation prévoit la séparation selon laquelle un composé volatil d'une solution est évaporé puis condensé.

I.4.3. Classification des systèmes de distillation solaire

La classification des modes de distillation solaire est connue à travers la revue de la littérature et les publications qui sont élaborées et reprises par plusieurs chercheurs, le schéma ci-dessous nous renseigne de l'organigramme général tel par certains travaux [30,31].

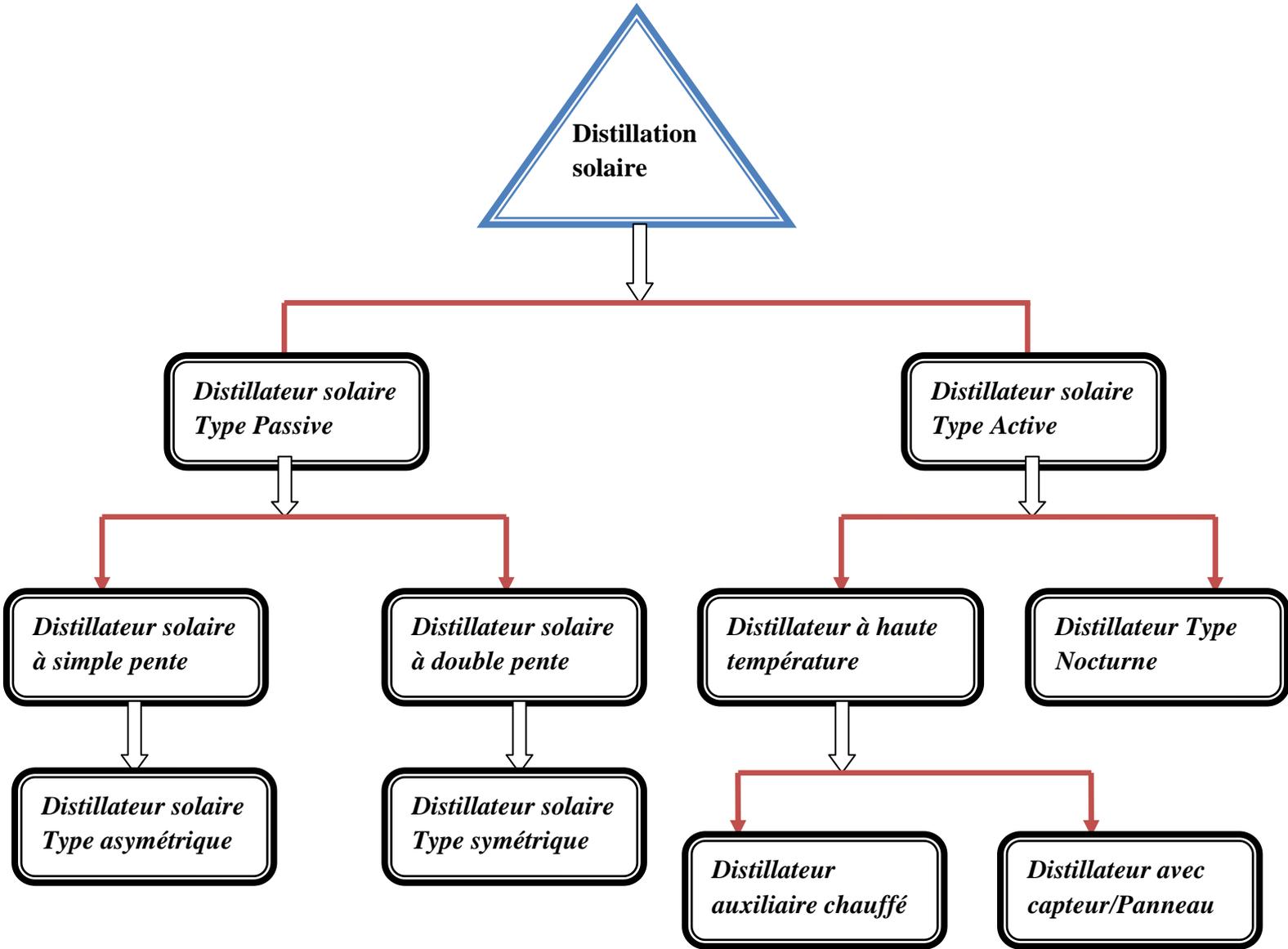


Figure I.10 : Organigramme général des modes de classification des systèmes de distillation solaire.

I.5. Revue littéraire des différentes méthodes utilisées pour l'amélioration de la productivité des distillateurs solaires

I.5.1. Principe de la distillation solaire

Un distillateur solaire est un dispositif qui est largement utilisé dans le processus de dessalement solaire pour produire de l'eau potable à partir de l'eau saumâtre et de l'eau saline en utilisant l'énergie solaire. Ce même distillateur solaire procure d'un dispositif très simple, facile à fabriquer et ne nécessitant que peu d'entretien, il est économique et non familièrement utilisé en raison de sa plus faible productivité [32, 33]. Plusieurs systèmes de distillation solaire ont été développés au fil des années selon le principe cité auparavant pour la purification de l'eau dans de nombreuses régions du monde. Beaucoup de chercheurs ont effectué des travaux sur la distillation solaire. Malik et al. [34] ont effectué des travaux sur un distillateur solaire de type passif. Tiwari et al. [10] ont réalisé une étude portant sur l'état des systèmes de distillateurs solaires passifs et actifs, ils ont conclu que les distillateurs solaires de type passifs et à double pente peuvent être économiques afin de fournir de l'eau potable pour les zones enclavées. Murugavel et al. [35] ont réalisé une étude sur l'augmentation de l'efficacité d'un distillateur solaire à simple conception en utilisant les méthodes passives. Ils ont conclu que le stockage de l'énergie est subordonné à la matière utilisée dans la construction de l'unité de distillation, et que la réduction de la profondeur de l'eau de bassin augmente la productivité des distillateurs solaires. Sampath Kumar et al. [36] ont élaboré une étude détaillée sur la distillation solaire active, où ils ont mis en place une étude théorique et une modélisation pour les distillateurs solaires actifs. Ayush et Varun [37] ont également révisé et examiné certains types de distillateurs solaires. Velmurugan et Srithar [38] ont étudié les différents facteurs qui influent sur la productivité des distillateurs solaires. Kabeel et El-Agouz [39] ont également étudié et poursuivi le développement du processus de la distillation solaire. Néanmoins, il n'y a pas d'étude particulière effectuée sur les distillateurs solaires à multiple effet, en particulier l'étude sur l'effet d'un bassin supplémentaire à multiple effet de mèche, à multiple effet de diffusion ou à plusieurs étages. Ceci dit, les travaux élaborés, jusqu'à présent, sont entièrement axés sur l'effet multiple des distillateurs solaires.

I.5.2. Amélioration de la Productivité des distillateurs solaires

On présente une revue des différentes méthodes réalisées pour améliorer la productivité des distillateurs solaires à simple ou à multiple effets, par conséquent, toute amélioration

certaine de la production doit passer par l'activation du phénomène complémentaire de l'évaporation –condensation.

I.5.2.1. Théorie de l'évaporation

Dans les distillateurs solaires, les vapeurs sont produites par un processus d'évaporation qui est un phénomène de surface, contrairement à l'ébullition qui se produit dans tout le liquide. A une température et pression sous le point d'ébullition, la pression de vapeur est faible et la pression à l'intérieur du liquide est égale à la pression atmosphérique plus la pression du liquide. Des bulles de vapeur d'eau ne peuvent donc pas se former. Par contre, au point d'ébullition, la pression de vapeur saturée est égale à la pression atmosphérique, des bulles se forment, et la vaporisation se produit alors dans tout le volume du liquide. Les facteurs contribuant à optimiser l'évaporation des particules d'eau sont donc différents des facteurs liés à l'ébullition. Le phénomène d'évaporation de l'eau s'explique par des molécules situées en surface qui possèdent assez d'énergie cinétique pour s'échapper du liquide. L'énergie nécessaire pour surpasser les forces d'attraction du liquide et s'évaporer s'appelle la chaleur latente d'évaporation. Si le phénomène se produit dans un environnement fermé, l'évaporation se produira jusqu'au point de saturation de la vapeur avec un équilibre entre l'évaporation des molécules et la condensation des vapeurs. La pression de saturation de vapeur dépend de la température de l'eau [40].

I.5.2.2. Facteurs affectant l'évaporation de surface

Plusieurs travaux ont étudié les facteurs affectant l'évaporateur dans les unités de distillation par détection des paramètres naturelles, ou par modification dans le design du distillateur solaire, Sartori [41], en comparant le comportement thermique des distillateurs solaires traditionnels (appareil fermé avec couvercle transparent) aux évaporateurs ouverts (de type bassin ouvert), a trouvé que même si la température était beaucoup plus haute dans les distillateurs solaires, la capacité d'évaporation était plus importante dans les évaporateurs ouverts. Selon le même auteur, les facteurs permettant d'augmenter le phénomène d'évaporation dans un distillateur solaire sont respectivement l'augmentation en conséquence de l'écart de température entre la surface d'évaporation et l'air ambiant, l'augmentation de la vitesse du vent et une faible valeur de l'humidité relative. Une expérience a été réalisée pour affirmer que l'accélération du mouvement de l'air par un ventilateur augmente l'évaporation si en poursuivant le mouvement de l'air chaud provenant de l'évaporation de l'eau dans un distillateur solaire [42], de ce fait la production du distillateur solaire augmente

automatiquement. Suneja et Tiwari [43] ont prouvé que l'augmentation de la profondeur de l'eau induit à une diminution de l'évaporation dans l'unité de distillation, donc il est nécessaire de fournir une quantité d'énergie suffisante pour chauffer l'eau jusqu'à une température d'évaporation. Un autre facteur important qui peut améliorer le phénomène d'évaporation est l'augmentation de la surface de l'évaporation de surface tout en maintenant le même volume d'eau et la même quantité de radiation solaire [44]. Ceci s'explique qu'un élargissement de la surface d'évaporation conduit à fournir plus de quantité de molécules situées à la surface de l'eau et qui sont aptes à s'évaporer.

I.5.2.3. Facteur affectant la condensation.

Le phénomène de condensation dans une unité de distillation est un phénomène complémentaire inévitable qui est déduit à partir de la basse température de la vitre, ou plutôt de la plus grande différence possible entre la température des vapeurs et celle de la vitre, la condensation est restée comme une préoccupation majeure pour la plupart des chercheurs.

Sartori [41], le confirme par le résultat qu'il a trouvé et indiquant que l'effet de cette différence de température influe sur le taux de distillation.

Suneja et tiwari [43], dans leurs travaux, ont étudié l'augmentation dans le taux de condensation de la vitre par l'abaissement de sa température, et ce en faisant couler de l'eau fraîche sur la partie extérieure de la vitre, où une augmentation de la production d'eau distillée a été constatée. Cooper [45] a conclu dans son expérience qu'une augmentation de la vitesse du vent fait augmenter la condensation par l'abaissement de la température de la vitre, où une augmentation de l'eau distillée a été obtenue. D'autres travaux ont mis en évidence que la condensation peut aussi être optimisée par la modification de l'angle d'inclinaison de la vitre [46, 47].

I.5.2.4. Distillateurs avec évaporateur et condenseur séparés

Pour rendre les unités de distillation plus performantes, plusieurs études ont vu la nécessité de séparer la phase d'évaporation de celle de la condensation [48,49].

I.6. Application aux différents types de distillateurs solaire

I.6.1. Distillateur solaire à simple bassin

Dans un distillateur solaire conventionnel simple de type inclinée, le bassin reçoit le rayonnement solaire à travers une couverture transparente, qui est par la suite absorbé par la plaque absorbante au fond du bassin et converti en chaleur qui sera transférée à l'eau qui

s'échauffe puis avec le temps elle s'évapore, cette vapeur chaude monte saturée, puis subit un mouvement circulatoire, en raison de la différence de température entre la surface de l'eau et celle de la couverture inférieure, avant d'atteindre la vitre refroidie d'où sa condensation, puis elle glisse vers le bas de la vitre d'où elle est recueillie à l'aide d'un drain [34]. Dans ce type de distillateur à simple effet, la chaleur latente de condensation est épuisée avec l'expiration de l'eau distillée (l'évacuation) (figure 1.11).

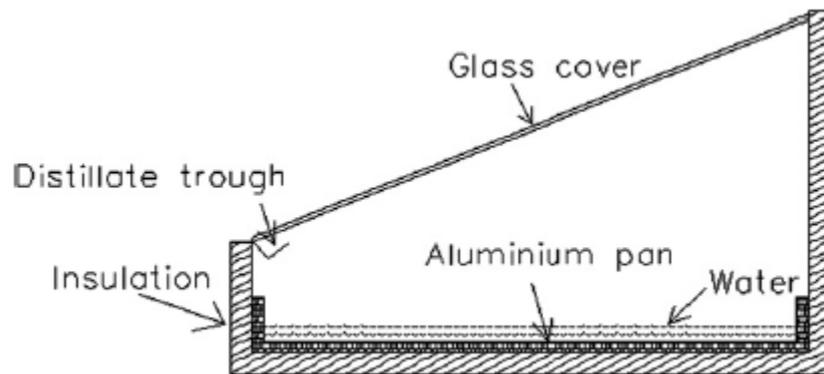


Figure I.11 : Distillateur solaire conventionnel simple.

I.6.2. Distillateur solaire à multiple bassins (Multi bassin)

La faible efficacité de la plupart des distillateurs solaires à simple effet classiques est due à une mauvaise dissipation de la chaleur latente de la vapeur qui se condense à la surface de condensation. Dans le distillateur à multiple bassins, la chaleur latente de vaporisation libérée par la surface de la face intérieure de la vitre est utilisée pour chauffer l'eau du bassin supérieur plutôt que d'être perdue vers l'extérieur. Par conséquent, elle augmente le taux d'évaporation et de condensation dans ce type de distillateur à double effet. Le bassin, au niveau du haut, est constitué d'un matériau transparent (généralement en verre) pour permettre au rayonnement d'atteindre le premier bassin en bas du distillateur.

I.6.3. Distillateur solaire passif à multiple effets

Dans ce type de distillateur solaire, la productivité est augmentée par l'augmentation du nombre d'effets (étages). Al Mahdi [50] a effectué une étude sur l'effet du nombre de bassins sur la productivité journalière concernant ce type de distillateurs solaires où il a été constaté que le distillateur solaire à double bassin a donné un pic plus élevé dans la productivité. Cependant, les distillateurs solaires à triples et quadruples bassins continuent à produire des quantités appréciables de distillat durant la nuit, ce qui conduit à des productivités journalières plus élevées. Néanmoins, si on fournissait un bassin en plus que les quatre existants, cela ne

donnerait aucun effet significatif sur la productivité. Sodha et al. [51] ont présenté effectuée une étude sur un distillateur solaire à double bassins à travers l'examen de ses performances et ce pour différents systèmes et conditions climatiques dont les résultats ont indiqué que le distillateur solaire à double bassins donne une performance plus supérieure à celle d'un seul bassin de l'ordre de 36 %. En outre, la productivité du même distillateur augmente rapidement avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant jusqu'à 4 cm, et au delà de cette valeur elle commence l'augmentation devient lente. Une Etude expérimentale sur l'effet de la zone d'évaporation sur le rendement a montré un gain de l'ordre de 19,6 % lorsque la dite zone est multipliée par quatre, et un gain asymptotique (zone infinie) de l'ordre de 30,2% [52]. L'étude suggère aussi que ces types de distillateurs solaires avec des surfaces d'évaporation élargies, peuvent utiliser l'énergie thermique à moindre coût et ce à partir de sources ayant des températures relativement faibles telles que les étangs solaires.

Le principal facteur qui influe sur le taux de la production d'un distillateur solaire à double effet est la température de la surface de condensation de la vitre, où, en effet, la réduction de la température de la vitre conduit vers une augmentation de la productivité. Le processus de l'écoulement de l'eau au dessus de la couverture en verre induit un bon effet sur le rendement et l'efficacité du système (figure 1.12) [53]. Ainsi une faible température de la surface de la vitre fait augmenter la circulation de l'air à l'intérieur du distillateur solaire tout en améliorant le transfert de chaleur par convection et par évaporation entre l'eau du bassin et la vitre, de même qu'on peut constater que le refroidissement de la surface inférieure de la vitre fait augmenter la condensation [54].

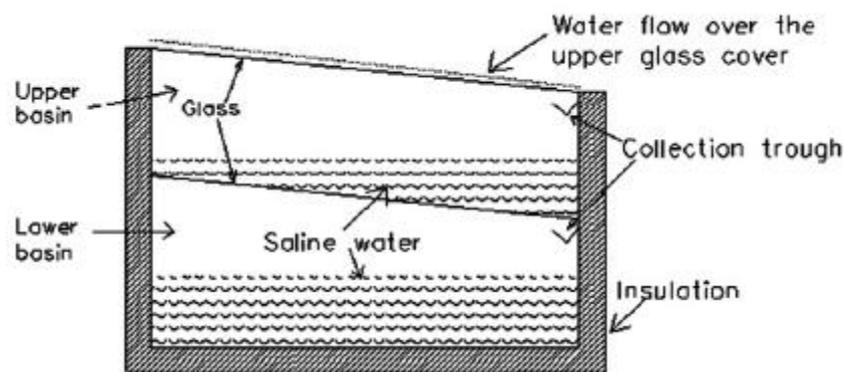


Figure I.12 : Distillateur solaire à double effets (l'eau s'écoule sur la couverture supérieure) [53].

La température de la couverture en verre est réduite et la productivité est augmentée soit par un écoulement continu [55] ou par écoulement intermittent de l'eau de refroidissement non traitée (à l'état brut) sur la couverture [56, 57]. L'eau de refroidissement gagne de la chaleur latente à partir de la condensation de l'eau et la régénère dans le bassin. Certains résultats ont montré que l'écoulement de l'eau fait augmenter le taux de production de 20% [58]. D'autres ont montré résultats que l'utilisation d'un film d'eau en écoulement fait augmenter l'efficacité du distillateur solaire de plus de 20% [59]. Afin d'utiliser l'énergie thermique de l'eau en écoulement, une vitre supplémentaire est prévue au dessus de la couverture principale, il se produit, par conséquent, un effet supplémentaire dans le distillateur solaire conduisant à une augmentation de la productivité. La Régénération de l'eau au niveau de ce type de distillateur solaire accompagnée d'une faible profondeur d'eau conduit à une productivité plus élevée [60]. Dutt et al. [61] ont étudié l'effet de rajout de colorant dans le distillateur solaire à double bassins, où ils ont constaté que l'addition du colorant fait augmenter l'efficacité du système de 10% et que le coefficient de transfert de chaleur par évaporation devient une fonction variable très fortement dépendante de la température, tandis que les coefficients de transfert de chaleur par convection et par rayonnement varient peu avec la température.

La performance du type de distillateur à multiples bassins est quasiment une fonction fortement dépendante de la masse d'eau utilisée dans le bassin. La réduction de la masse d'eau dans le bassin fait augmenter la production de distillat. Tiwari et al. [62] ont étudié la performance d'un distillateur solaire à double bassin et ils ont constaté que sa production totale est fortement dépendante de la profondeur de l'eau au niveau du bassin inférieur. Pour une profondeur de l'eau amoindrie, le rendement a été amélioré, mais le processus de production de la distillation a cessé après le coucher du soleil. Pour plus grandes profondeurs d'eau, la production de distillat est réduite, mais le processus de distillation continue à fonctionner même après le coucher du soleil.

Yeh [63] a étudié expérimentalement un type de distillateurs solaires à double effet, surélevé d'un côté vers le haut (figure I.13) et est placé avec une inclinaison de 10° par rapport à la surface horizontale. Il a constaté que cet emplacement est plus efficace qu'un emplacement de vers le bas. Une autre étude a été menée par Hamdan et al. [64] sur la performance des distillateurs solaires respectivement à simple effet (pyramide), à double et à triple effets, où les résultats obtenus ont montré que la meilleure efficacité journalière maximale est revenue au distillateur à triple effets suivie par celle du distillateur à double effets et ensuite vient le distillateur à simple effet avec moins d'efficacité.

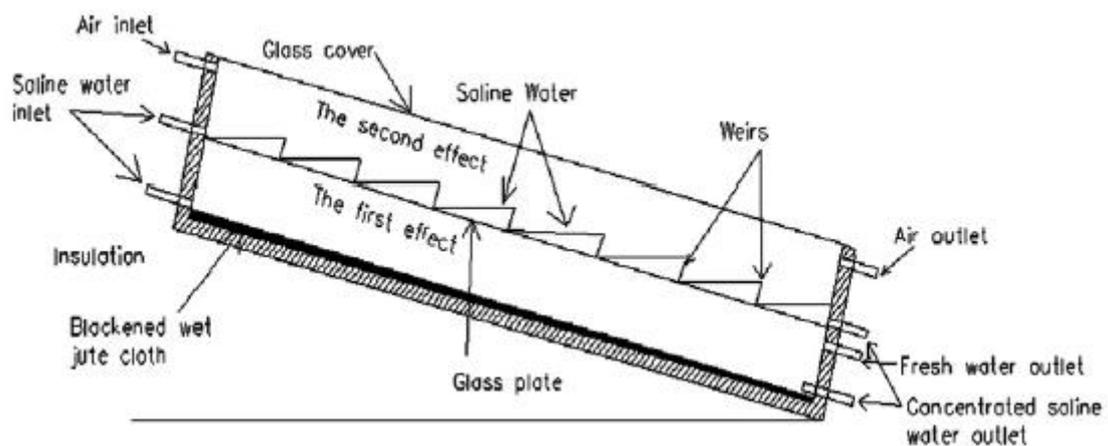


Figure I.13 : Distillateur solaire à double effet surélevé [63].

La figure (1.14) montre le type de distillateur solaire à double effets, qui est conçu et étudié par Cappelletti [65], et dont le bassin supérieur ayant la forme 'V'. L'eau condensée du bassin inférieur est recueillie à son milieu. Le résultat de cette expérience montre que l'efficacité obtenue est de l'ordre de 16%, en raison d'une faible température de l'eau au niveau du bassin (environ 50 °C).

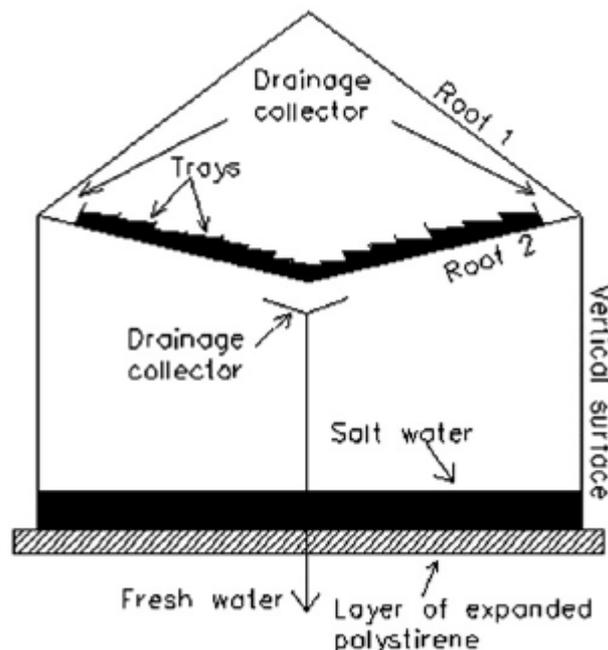


Figure I.14 : Distillateur solaire à double effets (bassin supérieur prend la forme d'un 'V') [65].

Al- Hinai et al. [66] ont élaboré une étude comparative sur l'effet des paramètres qui influent sur un distillateur solaire de type asymétrique et à double effets (figure I.16), et sur un

distillateur solaire symétrique à simple effet (figure 1.15). Ils ont constaté que les paramètres optimums obtenus sont : une épaisseur de l'isolant de 0.10 m et un angle d'inclinaison de la couverture en verre de 23° et avec une valeur minimale de la profondeur de l'eau ont donnés des productions de l'ordre de $4.15\text{kg/m}^2/\text{jour}$ et de $6\text{ kg/m}^2/\text{jour}$, pour respectivement les distillateurs solaires à simple et à double effet ont été obtenues.

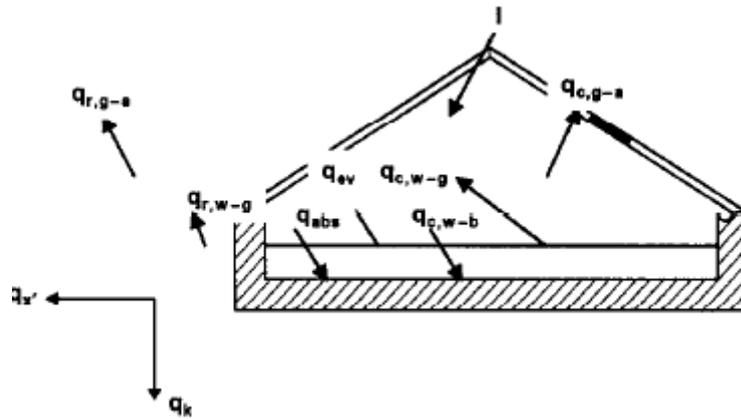


Figure I.15 : Distillateur solaire symétrique à double pente

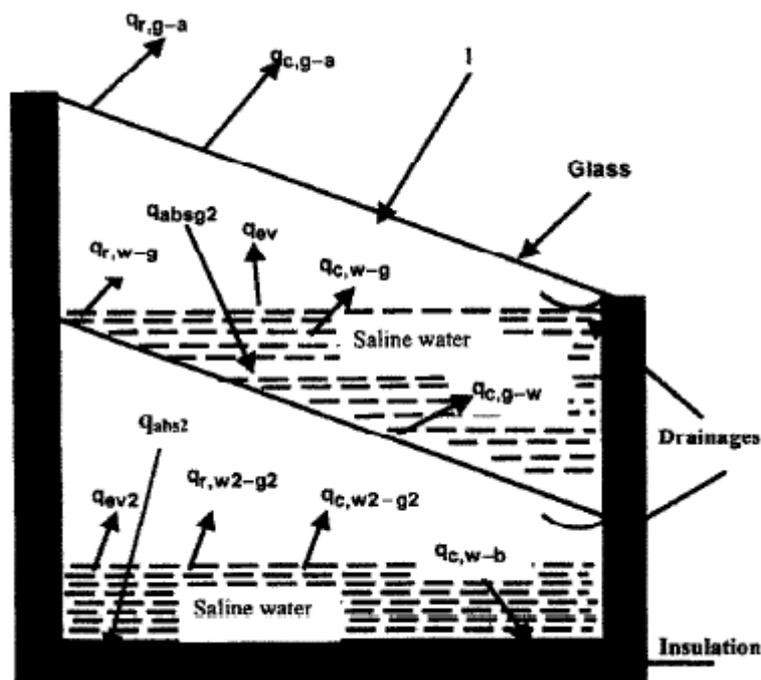


Figure I.16 : Distillateur solaire type asymétrique à double effets.

Fukui et al. [67] ont mené une étude théorique sur un type de distillateur à multiple effets où ils ont conclu que l'utilisation de ce type de distillateur améliore la productivité. Dans une autre étude expérimentale sur la performance de deux types de distillateurs à simple bassin et à double bassins, les résultats ont montré qu'une augmentation du taux de la

production est obtenue par le distillateur solaire à double effets, ils ont en plus constaté que l'isolation a un effet significatif sur la productivité, en particulier pour le type à double bassins [68, 69].

Kumar et al. [70] ont étudié l'effet d'un rajout d'un bassin supplémentaire au type de distillateur à double pente. Les résultats obtenus montrent que : (i) la température de l'eau et celle de la vitre diminuent avec l'augmentation de la capacité thermique de la masse d'eau dans le bassin d'où le rendement diminue également. (ii) La production journalière augmente avec la diminution de la capacité calorifique de la masse d'eau dans le bassin supérieur grâce à une meilleure utilisation de la chaleur latente de vaporisation. (iii) Le rendement journalier du bassin inférieur est plus élevé que celui du bassin supérieur. (iv) L'efficacité du distillateur solaire à double bassins est sensiblement plus élevée que celle d'un distillateur solaire à bassin unique. (v) Il existe une variation significative de l'efficacité avec l'augmentation de la température de l'eau du bassin inférieur de l'ordre de 30 °C à 38 °C.

Rajaseenivasan et al. [71] ont conçu un type de distillateur solaire à double bassins avec double pente (voir figure I.17) où les résultats obtenus ont été comparés avec ceux d'un distillateur solaire conventionnel à simple bassin et à double pentes. Le bassin supérieur du premier distillateur est divisé en trois compartiments (de chaque côté) en vue d'une répartition uniforme de la masse d'eau sur toute la surface de la partie supérieure du bassin. Les tests de cette expérience ont été effectués avec différentes profondeurs d'eau au niveau du bassin, construit en acier léger permettant ainsi le stockage de l'énergie, d'un tissu en coton noirci, de la toile de jute (en fibre) et de morceaux de coton des déchets en tant que matière de mèche et d'un petit morceau en argile comme matériaux poreux. Comme résultat, la productivité de ce distillateur solaire à double bassins avec des matériaux de stockage d'énergie dans le bassin Inférieur était plus élevée de 169,2 % que le distillateur solaire conventionnel classique.

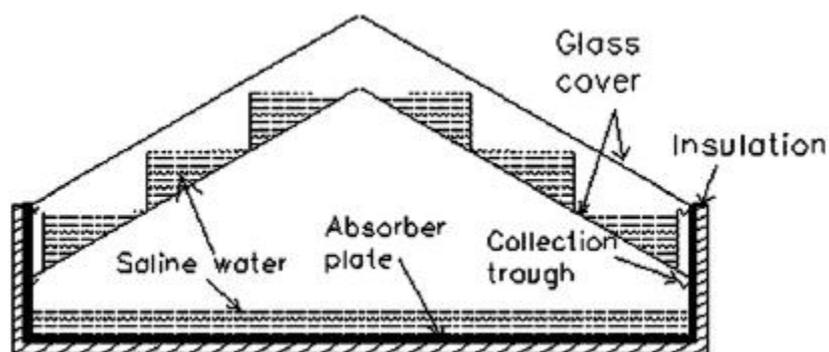


Figure I.17 : Distillateur solaire à double effet, à double pente [71].

I.6.4. Distillateur Multi-bassin inversé

Dans ce type de distillateur solaire, la température de l'eau augmente en inversant l'absorbeur afin de réduire la perte de chaleur par le fond [72]. Inverser l'absorbeur dans ce type de distillateur a une production qui est double que celle issue d'un distillateur solaire classique.

Sangeeta et Tiwari [73] ont étudié l'effet de la profondeur de l'eau sur ce type de distillateur solaire inversé (figure I.18). Ils ont conclu que le rendement total est au maximum pour une plus faible profondeur d'eau dans le bassin inférieur.

Sangeeta et al. [74] ont réalisé une étude paramétrique sur un distillateur solaire inversé à double effets. Les résultats montrent une augmentation dans la température initiale de l'eau de 22 °C à 35 °C, une augmentation dans le rendement de l'absorbeur inversé d'environ 10%. Ils ont également constaté que le rendement de ce même absorbeur inversé d'un distillateur à double bassins a augmenté d'environ 99 % avec l'augmentation du pouvoir d'absorption de l'absorbeur de 0,55 à 0,95.

Avec une même conception inversée, des travaux de recherche ont conclu que lors de l'utilisation d'un distillateur solaire à triple effets inversé la production est meilleure que celle issue d'un distillateur solaire classique à triple effet [75]. A cet effet, le rendement journalier a augmenté de manière significative lorsque le nombre d'effets change de un à trois. Dans ce type de distillateur solaire inversé, lorsque le nombre de bassins est augmenté au delà de sept, seulement une légère augmentation du rendement est aperçue. De plus, le rendement à sept effets atteint environ 4,2 fois que celui d'un distillateur solaire à simple bassin inversé [76].

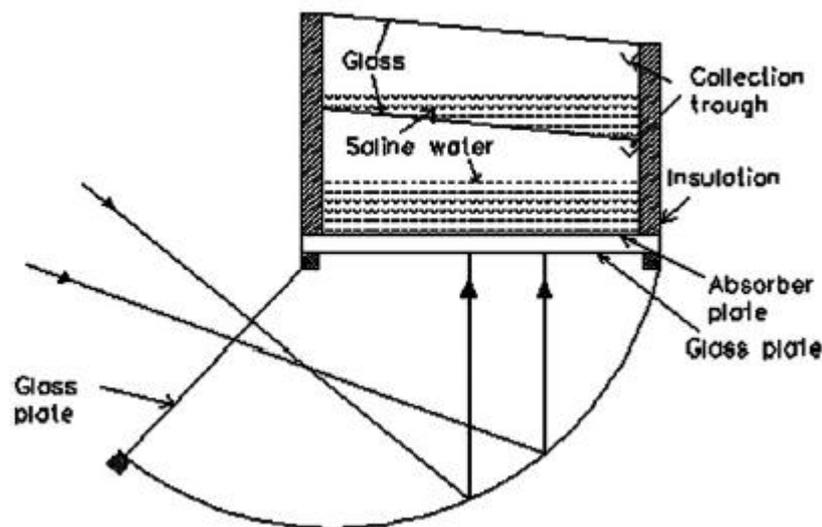


Figure I.18 : Distillateur solaire à Multi-bassins inversé [76].

I.6.5. Distillateur solaire active à multiple bassin

La différence de température entre l'eau de bassin et celle de la condensation de la couverture en verre a un effet direct sur la productivité du distillateur solaire. L'augmentation de la température de l'eau fait augmenter la différence de température entre les surfaces d'évaporation et de condensation. Pour parvenir à une meilleure évaporation et un taux de condensation élevé, la température de l'eau du bassin peut devenir élevée grâce à un apport d'énergie thermique à partir d'une certaine source externe. Cette température de l'eau est augmentée par la fourniture d'énergie thermique supplémentaire venant des capteurs solaires externes vers le bassin du distillateur. L'énergie supplémentaire est fournie surtout au bassin inférieur du distillateur solaire, car il reçoit moins de rayonnement que le bassin supérieur, en raison de la diminution de la transmissivité par le bassin de l'étage.

I.6.6. Distillateur solaire Active à multiple bassin muni d'un capteur plan

Tiwari [77] a étudié l'effet du distillateur solaire à double bassins avec de l'eau qui s'écoule sur la couverture en verre et utilisant un capteur plan pour fournir de l'eau chaude au bassin inférieur. Il a constaté que l'utilisation d'un capteur plan donne un rendement plus élevé de 50% qu'un distillateur solaire normal et à double effets. Il a également observé que le rendement du distillateur reste élevé malgré la déconnexion du capteur pendant les heures non ensoleillées ce qui permet d'éviter les pertes de chaleur à travers le capteur.

Yadav [78] a réalisé un concept d'un distillateur solaire à double effets avec et sans capteur plan (thermosiphon et mode à circulation forcée) (voir figure I.19). Il a conclu que la performance du système en mode à circulation forcée est légèrement meilleure que celle à thermosiphon. Il a également suggéré d'utiliser le mode à thermosiphon dans les endroits où l'électricité n'est pas disponible.

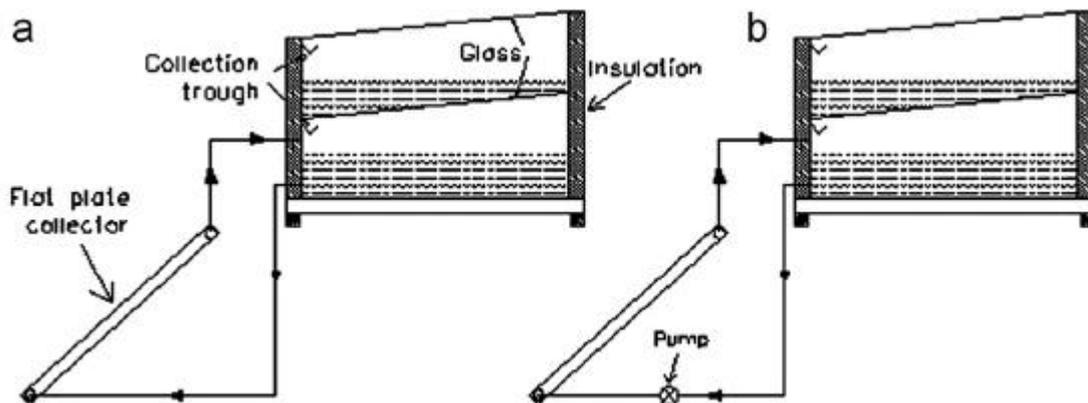


Figure 1.19 : Distillateur solaire type actif, couplé à un capteur par mode de circulation : a) à thermosiphon b) à circulation forcée [78].

Tiwari et Lawrence [79] ont effectué une étude thermique sur un distillateur solaire à double effets, muni d'un capteur plan extérieur. Dans cette étude, l'eau du bassin supérieur est en écoulement au lieu d'être stagnée en masse énorme d'eau. Il en résulte une augmentation des taux d'évaporation qui fait augmenter le rayonnement entrant dans le bassin inférieur. Le rendement journalier augmente avec la diminution du débit d'eau dans le bassin supérieur.

Kumar et Tiwari [80] ont étudié la performance du rendement journalier d'un système de distillation active à double effets avec de l'eau en écoulement. Ils ont obtenu un rendement élevé de 3,34 kg/m²/h dans le bassin inférieur à midi, en raison de la température de l'eau remarquablement élevée à cette heure (95 ° C).

Avec la diminution des masses d'eau dans le bassin inférieur, la température de l'eau d'exploitation est améliorée, ce qui fait augmenter le rendement et l'efficacité. Le rendement journalier augmente avec l'augmentation de la surface des capteurs, ce qui engendre une augmentation de l'énergie thermique dans le bassin. D'autres travaux ont conclu que l'intégration d'un capteur plan au distillateur solaire à double effets avec un débit d'eau circulant sur la couverture en verre de bassin supérieur produit un maximum de distillat [81].

Le distillateur solaire fonctionnant en mode à double effet sans capteur plan n'améliore pas de manière significative la production journalière à cause des difficultés, raisonnables, dues au maintien d'un débit d'eau faible et uniforme sur la couverture en verre (10 ml / min). Al Baharna et al. [82] ont présenté une étude sur la performance d'un le distillateur solaire à triple bassins avec l'intégration d'un capteur solaire. Ils ont constaté alors que la productivité journalière a augmenté de 10,64 kg / jour à 24,48 kg / jour, lorsque le rapport de surface de l'élément chauffant était encore à l'unité malgré que la productivité journalière du distillateur solaire augmente avec l'augmentation de la surface de l'eau chauffée.

I.6.7. Distillateur solaire à double effet avec échangeur de chaleur

Yadav [83] a réalisé une étude sur la performance d'un distillateur solaire à double effet couplé avec un échangeur de chaleur. Il a observé que l'efficacité du système proposé est considérablement inférieure à celle d'un distillateur solaire sans échangeur de chaleur. En plus, le rendement du système est une fortement dépendant des paramètres de l'échangeur de chaleur et où l'efficacité du système augmente considérablement avec l'augmentation du taux de débit massique dans la fourchette de 0 à 20 kg / h.

Cette étude a été aussi développée dans un autre travail de recherche (voir figure I.20), dont le résultat indique que l'efficacité du distillateur solaire à double effet couplé à un échangeur de

chaleur peut être augmentée avec l'augmentation de la longueur du tuyau à l'intérieur du bassin inférieur de 0 - 5 m [84]. Tiwari et Sharma [85] ont étudié aussi ce type de distillation solaire à double effet fonctionnement en mode actif en utilisant un échangeur de chaleur. Le résultat issu de cette étude stipule qu'il y a une augmentation de l'efficacité d'environ 30 % dans le distillateur solaire actif en raison de l'écoulement de l'eau dans le bassin supérieur par contre il y a une légère augmentation de l'efficacité lorsqu'il y a une augmentation de la longueur de l'échangeur de chaleur dans le bassin du distillateur inférieur.

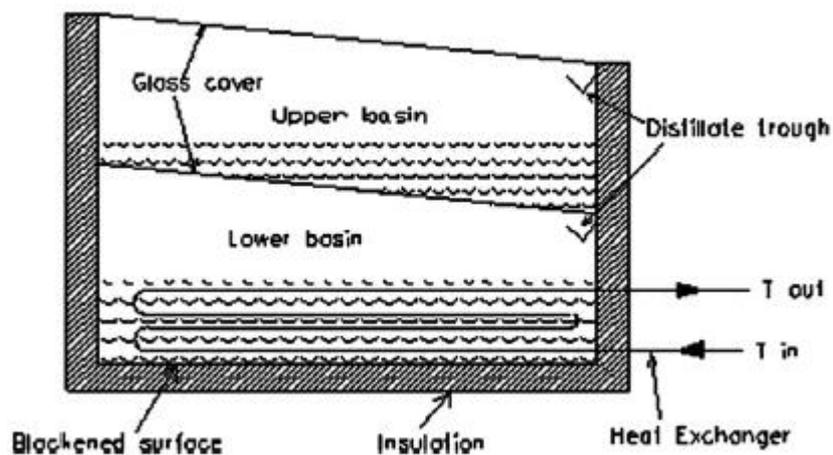


Figure I.20 : Distillateur solaire à double effet avec échangeur de chaleur [85].

I.6.8. Distillateur solaire avec condenseur supplémentaire

Dans un distillateur solaire conventionnel à simple effet, la surface intérieure de la couverture en verre n'est disposée que pour la condensation et la différence de température à travers l'épaisseur de la vitre est très faible. Par conséquent, le taux de condensation est faible. Ceci rend le distillateur inefficace et c'est ainsi que le taux de condensation peut être augmenté en fournissant un condenseur supplémentaire. Du fait que la fourniture d'une surface supplémentaire de condensation permet l'augmentation de la capacité thermique de la zone d'évaporation, qui est due à l'augmentation de la chaleur latente de condensation utilisée par l'eau dans le bassin supérieur au niveau de la zone considérée.

Fath [86] a étudié la performance d'une unité de distillation solaire à double effets, dans laquelle la vapeur venant à partir du premier effet (1^{er} bassin) est purgée dans le second effet (second bassin) (voir figure I.21), puisque le second effet de la couverture à ailettes a une surface extérieure pour la maintenir au niveau de la température ambiante, et une surface intérieure réfléchissante pour minimiser les pertes par rayonnement. La productivité

journalière observée est de $10.7\text{kg/m}^2/\text{j}$, et ce pour les conditions climatiques de la ville de Dhahran, en Arabie Saoudite.

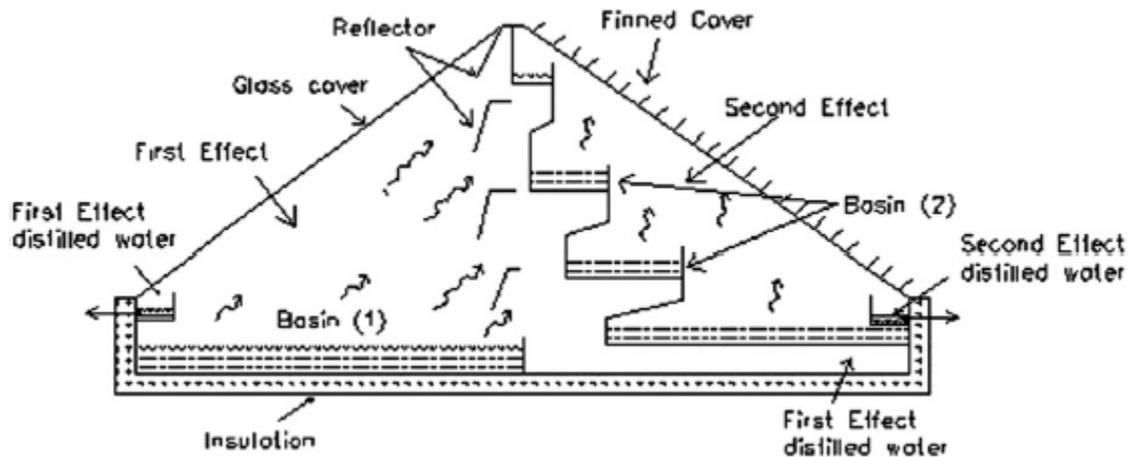


Figure I.21 : Distillateur solaire avec condenseur supplémentaire [86].

I.6.9. Distillateur solaire avec condenseur séparé

Une étude de modélisation a été réalisée sur la performance d'un autre type de distillateur solaire passif, muni d'un condenseur séparé [87]. Le système dispose d'un bassin (1) dans la chambre d'évaporation et deux autres bassins (2 et 3) dans la chambre de condensation, en plus d'une couverture en verre placée au dessus du bassin d'évaporation et une couverture de condensation opaque sur le bassin (3) (figure I.22). La partie supérieure de la couverture de condensation a été protégée du rayonnement solaire pour garder la couverture relativement humide. La vapeur d'eau du premier effet se condense sous la couverture en verre tandis que le reste s'écoule dans le condenseur, par purge et diffusion, et ensuite se condense en double dans le bassin (2) par récupération. Les résultats obtenus montrent que la productivité du distillat de ce type de distillateur solaire est de 62% plus élevé que celle issue d'un distillateur solaire conventionnel classique.

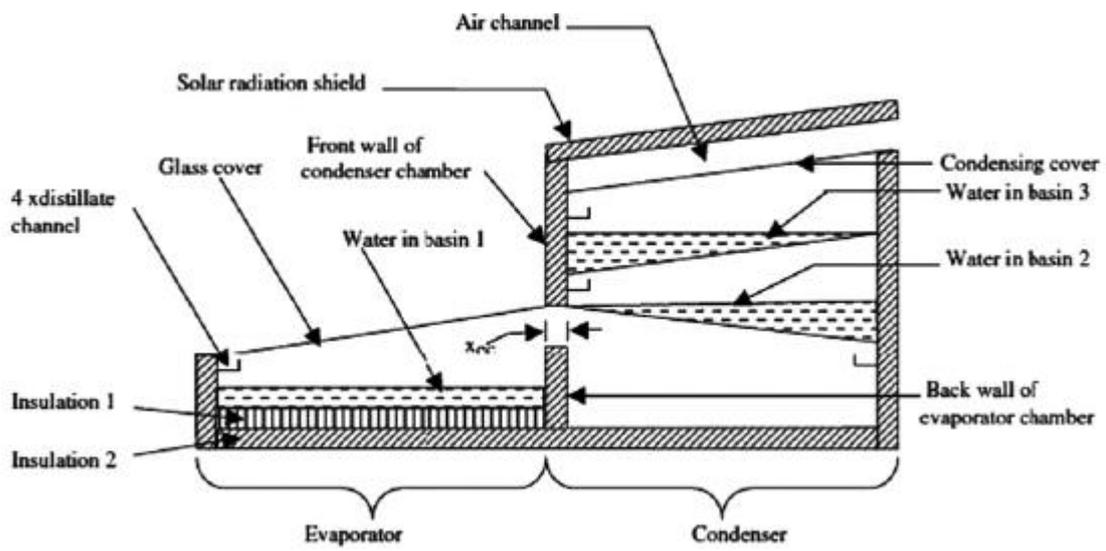


Figure I.22 : Distillateur solaire avec condenseur séparé [87].

Chapitre II : Gisement solaire et Thermique solaire

Introduction

L'énergie solaire dont le gisement solaire constitue le plus grand potentiel énergétique que nous disposons sur terre, il est constant à très long terme (plusieurs millions d'années). L'idée d'exploiter cette énergie, pour la conversion thermodynamique, est bien relativement ancienne.

Dans ce contexte, la conversion de l'énergie solaire en énergie photo-thermique trouve particulièrement un ressort remarquable dans divers domaines tels que : la thermoélectricité, la magnéto-électro-dynamique, la thermomécanique ou encore la thermo-chimie et la thermo-solaire ainsi que dans le domaine de dessalement de l'eau saumâtre utilisant l'énergie solaire. Le recours à des systèmes photo-thermiques adéquats représente une solution pour concilier les exigences des secteurs de l'énergie, de l'industrie et de l'environnement.

Le propos de ce chapitre est, dans une première partie, consacré au gisement solaire qui comporte essentiellement la description de la source de l'énergie solaire 'le soleil', les données astronomiques du soleil-terre, ainsi que les paramètres pouvant influencer l'énergie captée par un système photo-thermique et qui doivent être maîtrisés au préalable tels que : le mouvement terre-soleil, la position du soleil par rapport à la terre et l'orientation du distillateur solaire. Ensuite, nous exposons le rayonnement solaire comme énergie émise par le soleil qui nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques, nous élucidons sa nature ainsi que sa composition, nous évoquons aussi la répartition du rayonnement solaire à l'échelle extraterrestre et au sol éventuellement, où pour ce dernier nous mettons en évidence le rayonnement solaire capté par une surface horizontale et une surface inclinée. Dans ce contexte, nous étudions le cas d'un rayonnement solaire global reçu par un distillateur solaire.

La deuxième partie est consacrée à l'intérêt bénéfique dans l'utilisation de l'énergie solaire, la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique et leurs domaines d'application. Nous mettons aussi l'accent sur les principaux phénomènes intervenant dans la conversion thermique de l'énergie utilisant des systèmes solaires, en d'autres termes les mécanismes de transfert de chaleur et de masse qui s'imposent de façon appropriée pour modéliser et évaluer la nature et la quantité de l'énergie solaire mises en valeur.

II.1. Gisement solaire

II.1.1. Le soleil : Genèse de l'étoile et structure :

Le Soleil est une étoile constituant la source du gisement solaire, il est situé à une distance moyenne d'environ 150 millions de kilomètres de la terre, cette étoile est énorme possédant un diamètre $d = 1.391 \cdot 10^3$ km, sa masse $M_s = 2 \cdot 10^{30}$ kg, son rayon est de l'ordre de 109 fois celui de la terre (soit 696 000 km) et sa masse est de 333.000 fois celle de notre planète. Vu de notre planète, sa densité moyenne au centre est de $76 \cdot 10^3$ kg/m³ au centre, la masse du soleil représente 99,85 % la masse totale du système solaire et $33 \cdot 10^4$ fois celle de la terre. La température au centre du soleil est de l'ordre de 10^7 K, tandis que sa température à la surface est 5760 K [88]. Le soleil se présente sous la forme d'un disque assez homogène, mais en réalité c'est une sphère gazeuse non homogène constituée par la majeure partie d'hydrogène (80 % H₂, et d'hélium avec 19 % He, 1 % autres éléments). Le soleil est formé de trois régions principales (figure 2.1) [89] :

- L'intérieur: le noyau où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire, la température atteint plusieurs millions de degré et la pression un milliard d'atmosphères.
- La photosphère qui est une couche très mince (environ 300 km), elle est responsable du rayonnement que nous recevons.
- La chromosphère et couronne solaire : c'est la région à faible densité où la matière est très dénuée.

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau, deux cycles ont été imaginés pour décrire les étapes conduisant à cette fusion.

- Le cycle proton – proton fournit 90 % de l'énergie solaire, il y a émission de positons β^+ (rayonnement bêta), de neutrinos (ν_e) et de photons γ (rayonnement électromagnétiques).
- Le cycle de carbone (ou cycle de Bethe), fournit les 10 % restants. Les deux cycles sont résumés par l'équation :



Quatre protons se fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium avec émission de deux positons β^+ , de deux neutrinos ν_e , accompagnés d'une énergie égale à 26 MeV (1MeV = $1.6 \cdot 10^{-13}$ joules).

L'énergie émise par le soleil par seconde est donc d'environ 3.851.020 MW, ce qui correspond à une perte de sa masse par unité de temps de l'ordre de 428.109 kg /s. Le processus mis en jeu est bien compris depuis la célèbre relation d'Albert Einstein ($E = mc^2$) qui montre que toute disparition de la masse (m) entraîne une production d'énergie égale au produit de cette masse par le carré de la vitesse de la lumière. Le soleil fournit donc une

puissance équivalente à celle de 41.017 réacteurs nucléaires, qui est un chiffre véritablement astronomique. Cependant, seule une petite partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil, environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable d'environ $1,9 \times 10^{11}$ MW. Le système terre-atmosphère réfléchit environ 30 % de l'énergie solaire interceptée et absorbe les 70 % restants qui sont presque intégralement transformés en chaleur [90-92].

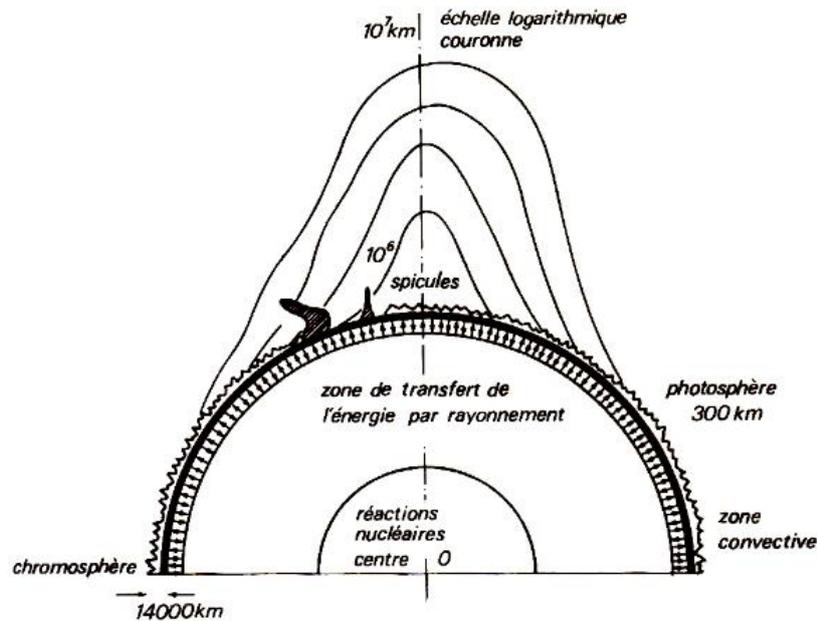


Figure II.1: Coupe schématique et structure du soleil [89].

II.1.2. Données astronomiques et liaison soleil - terre :

La terre tourne autour du soleil en 365 jours, 5 heures, 48 mn et 46 secondes (année tropique ou équinoxiale) et tourne autour d'elle-même par rapport à un axe nord –sud. L'équateur est incliné par rapport à l'horizon d'un angle compris entre $-23^{\circ} 27'$ en hiver et $+23^{\circ} 27'$ en été, tandis qu'aux équinoxes printemps et automne, il passe à 0° . Le mouvement apparent du soleil dans la sphère céleste constitue un événement important.

II.1.2.2. Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance terre-soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne [93]. La révolution complète de la terre au tour du soleil s'effectue en une année sidérale de 365 jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes [94]. Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles en une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes et 4 secondes. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles, passant par le centre de la terre, est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, l'équateur et l'écliptique forment entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut $23^\circ 27'$ [93]. L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de $23^\circ 27'$ par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre).

II.1.2.3. Mouvement de rotation de la terre

La terre tourne autour de son axe de rotation (pôle nord, pôle sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement.

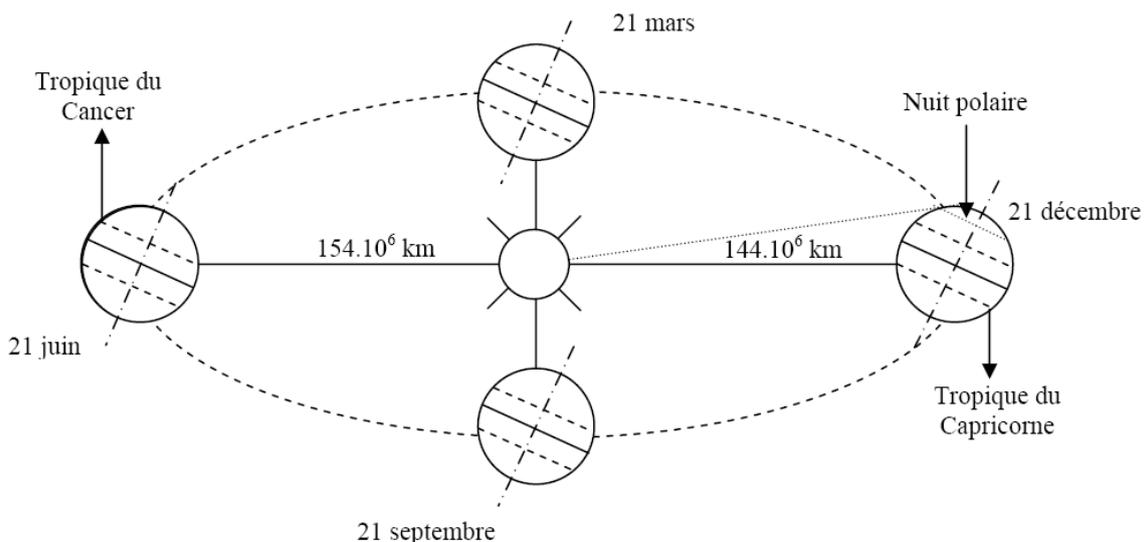


Figure II.4 : Mouvement de rotation de la terre.

II.1.2.4. Mouvement de translation

Le cycle des saisons :

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation sur elle-même et tourne autour du soleil en une période $P_t = 365$ jours 5 h 48 mn et 40s $\approx 365,25$ jours. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie et correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de kilomètres. La terre tourne avec une vitesse moyenne, $V_t = 29,77$ km/s (vitesse maximale en hiver de 30,27 km/s et minimale en été de 29,77 km/s). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons.

Aux équinoxes du printemps et d'automne, les rayons solaires arrivent parallèlement à l'équateur, les journées sont alors égales aux nuits. Au solstice d'hiver l'hémisphère nord connaît les nuits les plus longues et les jours les plus courts car les rayons du soleil arrivent obliquement et n'atteignent pas le pôle nord et c'est l'inverse dans l'hémisphère sud.

Au solstice d'été, l'hémisphère nord reçoit un éclaircissement maximum représentant ainsi les nuits les plus courtes et les journées les plus longues.

La distance terre - soleil varie quotidiennement et ce selon la relation suivante :

$$D_{TS}(N) = 1 - 0.017 \cos \left[\frac{360(N - 2)}{365} \right] \quad (\text{II. 2})$$

N est le numéro du jour de l'année compté à partir du premier janvier (quantième).

- Pour une année civile $N = 365$ jours.
- Pour une année bissextile $N = 366$ jours.

Les valeurs extrêmes de la distance terre-soleil sont données par :

DTS (min) = 0,983 UA vers le 2 janvier (Périgée)

DTS (max) = 1,017 UA vers le 5 juillet (Apogée)

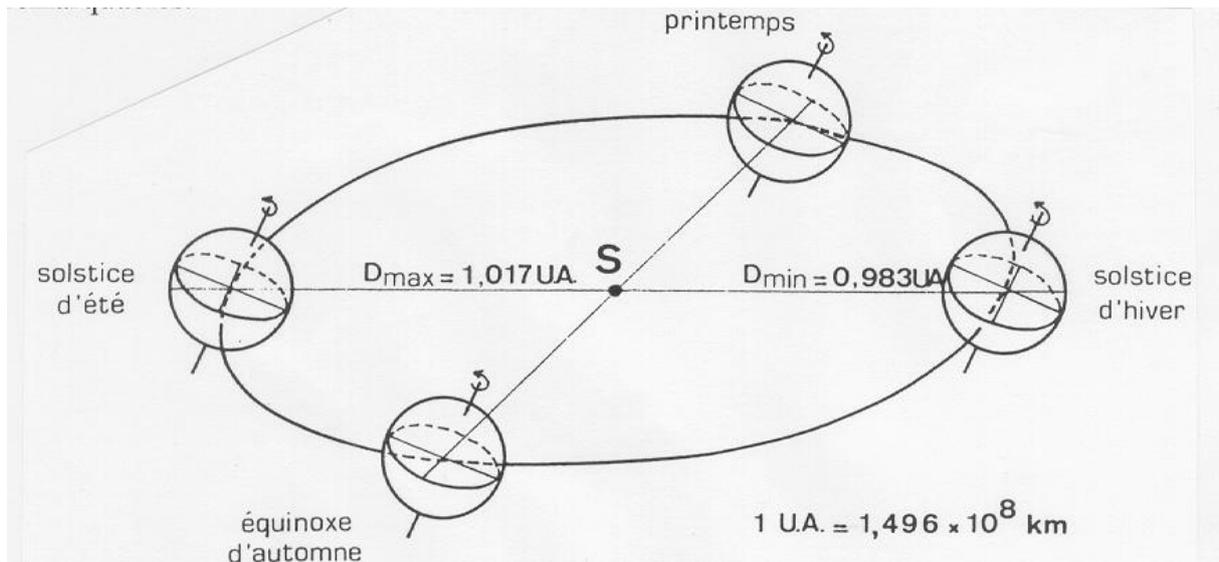


Figure II.5 : Le cycle des saisons tracé par le mouvement de la terre [95].

II.1.2.5. Angles de base soleil - terre.

II.1.2.5.1. Paramètres de position de la sphère terrestre :

Tout point de la sphère terrestre est repéré par deux coordonnées angulaires, appelées coordonnées terrestres [96] à savoir :

- **La latitude (φ) :** Elle permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur et à 90° au pôle nord, elle est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud.
- **La longitude L (λ) :** C'est la mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich en Angleterre). Les lieux qui sont situés à l'est sont comptés avec le signe +. Le grand arc de cercle qui joint le pôle nord, Greenwich et le pôle sud s'appelle méridien origine. Il y a 23 méridiens séparés de 15° chacun, donnant naissance aux 24 fuseaux horaires. La longitude est comptée positivement à l'ouest et négativement à l'est en fonction du méridien d'origine qui est le méridien de Greenwich.
- **Angle zénithal (θ_z) :** C'est l'angle entre le rayonnement solaire et de la ligne perpendiculaire au plan horizontal, le zénith z est l'angle complémentaire de l'altitude pour former un angle de 90° .
- **Altitude (α) :** C'est l'angle entre le rayonnement solaire et un plan horizontal tel que $\alpha = 90 - \theta_z$
- **L'angle d'inclinaison (β) :** C'est l'angle formé entre la surface plane et celle à l'horizontale. Il est considéré comme étant positif pour une surface inclinée vers le sud et négatif pour les surfaces inclinées vers le nord.

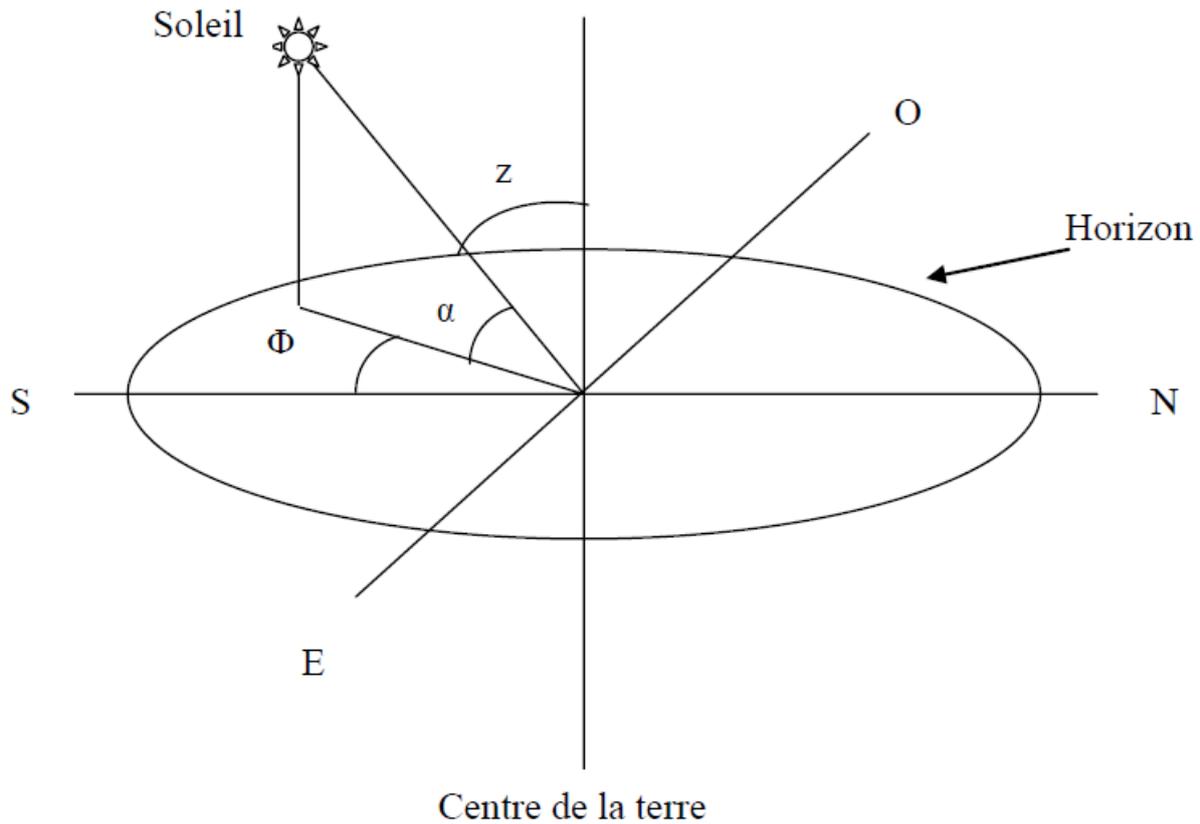


Figure II.6 : Angles de base soleil - terre.

II.1.3. Repérage du soleil

II.1.3.1. Position du Soleil

La connaissance de la position du soleil permet d'estimer l'énergie captée par le champ photo- thermique. L'énergie est ainsi cernée par une plage de variations en fonction du temps (instantanée, horaire, journalière, mensuelle et annuelle) facilitant l'optimisation et le dimensionnement adéquat du système de captation.

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents [97] :

- Par rapport au plan équatorial de la terre.
- Par rapport au plan horizontal du lieu.

Entre ces 4 points δ prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation suivante :

$$\sin\delta = 0.4\sin t \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Avec } t = n \times \frac{360}{365} \quad (\text{II.5})$$

n : indique le nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier.

La déclinaison (δ) étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des équinoxes (0.4° / jour) alors qu'elle est pratiquement stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver.

II.1. 3.2.2. Angle horaire (ω) (noté aussi AH)

C'est l'angle à travers lequel la terre tourne en rotation diurne autour de son axe qui correspond à une augmentation de l'angle horaire de 15° à chaque heure qui s'écoule pour amener le méridien d'un plan directement sous le soleil [91,99] . En d'autres termes, l'angle horaire décrit la course du soleil dans le ciel puisque il mesure le déplacement angulaire du soleil de l'est à l'ouest en passant par le sud du méridien local, donc c'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. L'angle horaire est nul à midi, négatif dans la matinée et positif l'après midi pour l'hémisphère nord et vice versa pour l'hémisphère sud (Tableau II.1). Il varie donc à chaque instant de la journée selon la relation suivante:

$$\omega = (\text{TSV} - 12) \times 15^\circ \quad (\text{II.6})$$

L'angle horaire (ω) varie de -180° à $+180^\circ$

Où : TSV est le Temps Solaire Vrai, exprimé en heures TL est le Temps Local (heures).

Tableau II.1 : Variation de l'angle horaire avec le temps d'une journée normale dans l'hémisphère nord [100].

Temps Local TL (heures)	6	7	8	9	10	11	12
Angle horaire ω , en degré	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
Temps Local TL (heures)	12	13	14	15	16	17	18
Angle horaire ω , en degré	0	+15	+30	+45	+60	+75	+90

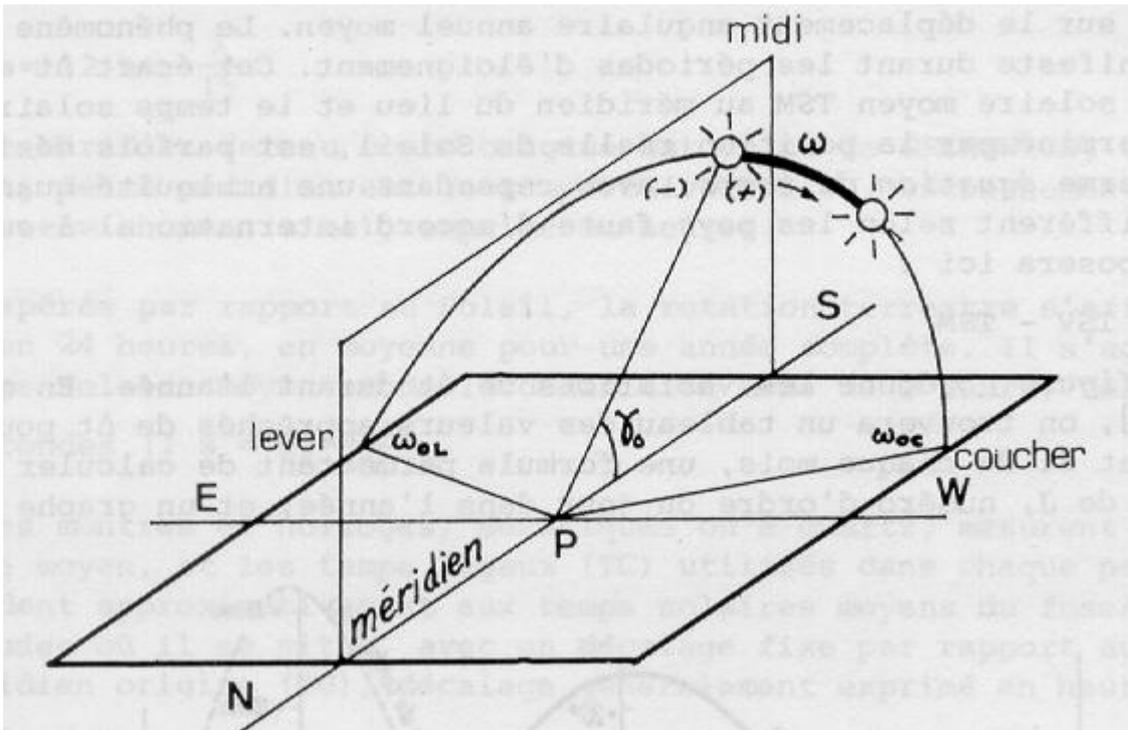


Figure II.8 : Schéma de l'angle horaire (ω) du soleil.

II.1.3.3. Les coordonnées horizontales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude par deux angles (h) la hauteur du soleil et (a) l'azimut du soleil (Figure II.9).

II.1.3.3.1. Hauteur angulaire du soleil 'h'

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin h = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

(II.7)

h : varie entre -90° et $+90^\circ$, on prend pour :

$h > 0$ le jour

$h < 0$ la nuit

$h = 0$ au lever et au coucher du soleil.

Où l'on rappelle que φ , δ et ω sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

-De la hauteur h , on peut déduire les heures du lever et du coucher de soleil. En faisant $h = 0$,

$$\text{On trouve : } \cos \omega_0 = -\operatorname{tg}(\varphi) \times \operatorname{tg}(\delta) \quad (\text{II.8})$$

- Et la durée astronomique du jour s'obtient tout aussi facilement en faisant:

$$D_0 = \frac{2}{15} \text{arc cos}(-\text{tg} \varphi \cdot \text{tg} \delta)$$

(II.9)

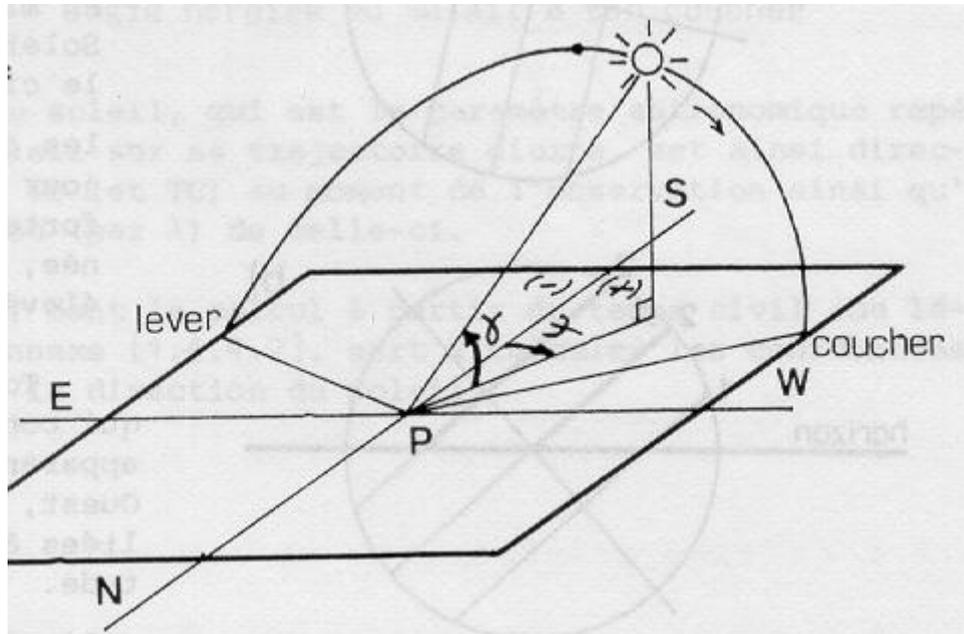


Figure II.9 : Schéma de la hauteur angulaire (h) et azimut (a= γ) du soleil.

II.1.3.3.2. L'azimut du soleil (a) ou (γ)

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil dans un plan horizontal local entre la ligne en direction du sud et la projection de la normale à la surface (plan incliné) du plan horizontal.

L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud [99].

Par convention, l'angle d'azimut solaire est pris négatif si la projection est au (sud – est) et positif si la projection est au (sud – ouest) de l'hémisphère nord et vice versa pour l'hémisphère sud. Le tableau ci-dessous montre les valeurs de l'angle d'azimut pour les différentes orientations des surfaces correspondantes :

Tableau II. 2 : Angle d'azimut solaire (γ) pour différentes orientations d'une surface inclinée dans l'hémisphère nord [100].

Orientation de la surface	Les valeurs de γ (degré)
inclinée vers le sud	0°
inclinée vers le nord	-180°
inclinée vers l'est	-90°
inclinée vers l'ouest	+90°
inclinée vers le sud -est	-45°
inclinée vers le sud-ouest	+45°

L'azimut est relié à l'angle horaire, à la hauteur angulaire et à la déclinaison, à chaque instant de la journée et selon la relation suivante:

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (\text{II.10})$$

Si l'on souhaite exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur h , on peut utiliser la formule suivante :

$$\text{tg } \gamma = \frac{\sin \omega}{\sin \varphi \cdot \cos \omega - \cos \varphi \cdot \text{tg } \delta} \quad (\text{II.11})$$

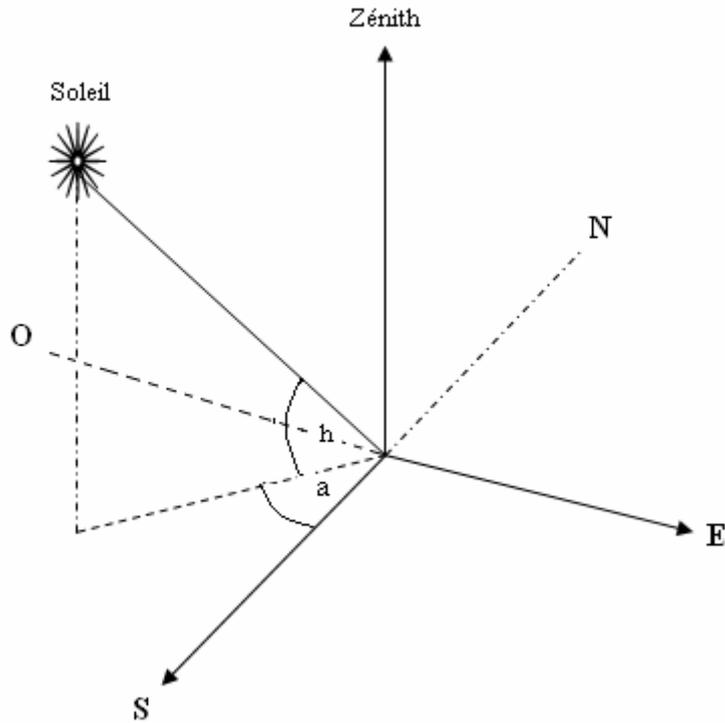


Figure II.10 : Repérage du soleil

II.1.3.4. Liaison entre les coordonnées horaires et les coordonnées horizontales.

Les expressions de Gauss permettent de déterminer la liaison entre les coordonnées horaires et les coordonnées horizontales en un lieu donné de latitude φ . Elles sont données comme suit:

$$\cos h \times \sin \gamma = \cos \delta \times \sin \omega \quad (\text{II.12})$$

$$\cos h \times \cos \gamma = \cos \delta \times \cos \omega \times \sin \varphi - \sin \delta \times \cos \varphi \quad (\text{II.13})$$

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos \omega + \sin \delta \times \sin \varphi \quad (\text{II.14})$$

II.1.3.5. Equation de passage d'un système de coordonnées à un autre

La connaissance de la position du soleil en coordonnées horizontales (h, γ) permet d'obtenir la position du soleil en coordonnées équatoriales (δ, ω) et inversement [97].

$$(h, \gamma) \longrightarrow (\delta, \omega)$$

$$\begin{pmatrix} \sinh \\ \cosh \cos \gamma \\ \cosh \sin \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega \cos \varphi & \sin \omega & \cos \varphi \sin \varphi \\ \cos \omega & \sin \omega \sin \varphi & -\cos \varphi \\ \sin \omega & -\cos \omega & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \\ 0 \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$(\omega, \delta) \longrightarrow (\gamma, h)$

$$\begin{pmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \cos H \\ \cos \delta \sin H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos a \cos \varphi & -\sin a & \cos \varphi \sin \varphi \\ \cos \gamma & \sin a \sin \varphi & \cos \varphi \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cosh \\ 0 \\ \sin h \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

II.1.3.6. Détermination de l'angle d'incidence (θ_i)

C'est l'angle qui se forme entre la direction du rayonnement solaire sur une surface et la direction de la normale de cette même surface. En général, l'angle d'incidence est exprimé par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \cos \theta_i &= (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega + \cos \delta \sin \omega \sin \beta \sin \gamma + \\ &\sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma). \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

- Pour une surface orientée vers le sud, $\gamma = 0$

$$\cos \theta_i = (\cos \varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin (\varphi - \beta) \quad (\text{II.18})$$

- Pour un plan horizontal en direction du sud, $\gamma = 0$, $\beta = 0$, $\theta_i = \theta_z$ (angle Zénithal)

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \quad (\text{II.19})$$

- Pour une face d'une surface vertical orientée vers le sud, $\gamma = 0$, $\beta = 90^\circ$:

$$\cos \theta_i = -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \cos \omega \sin \varphi \quad (\text{II.20})$$

L'équation (II.19) est résolu pour l'angle horaire au coucher du soleil,

$$\omega = \omega_s \text{ for } \theta_z = 90^\circ : 0 = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \delta \sin \varphi \quad ,$$

On obtient l'angle horaire au coucher du soleil, tel que :

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\text{tg } \varphi \text{ tg } \delta) \quad (\text{II.21})$$

L'angle total entre la période du lever et du coucher du soleil est exprimé par la relation suivante :

$$2\omega_s = 2\cos^{-1} (-\text{tg } \varphi \text{ tg } \delta) \quad (\text{II.22})$$

Puisque 1 heure est équivalent à 15° , le nombre d'heures (N) de toute la journée jusqu'au coucher du soleil est obtenu par la relation suivante :

$$N = (2/15) \cos^{-1} (-\text{tg } \varphi \text{ tg } \delta) \quad (\text{II.23})$$

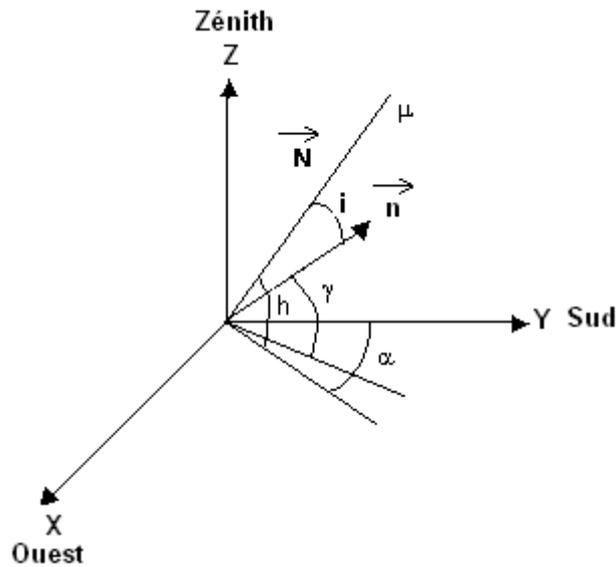


Figure II.11: Représentation de l'angle d'incidence.

II.1.4. Les temps solaires

II.1.4.1. Durée du jour

C'est le temps qui sépare le lever du coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donnent une hauteur h du soleil nulle sont le lever et le coucher du soleil. Au moment du lever et du coucher du soleil, la valeur de la hauteur du soleil, $h = 0$,

La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire [97] :

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos \omega + \sin \delta \times \sin \varphi = 0 \quad (\text{II.24})$$

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi (\cos \omega + \text{tg} \delta \text{tg} \varphi) = 0 \quad (\text{II.25})$$

$$\cos(\omega)_{C,L} = -\text{tg} \delta \text{tg} \varphi, \quad \omega_C = 0, \quad \omega_L < 0; \quad \omega_C = -\omega_L \quad (\text{II.26})$$

La durée du jour (D_j) est donnée en heures par l'équation :

$$D_j = \frac{\omega_C - \omega_L}{15} \quad (\text{II.27})$$

$$\text{Avec : } D_j(h) = \frac{2}{15} \text{arc}(-\text{tg} \delta \text{tg} \varphi) \quad (\text{II.28})$$

II.1.4.2. Temps solaire et l'équation du temps

C'est le temps qui est basé sur le mouvement apparent angulaire du soleil à travers le ciel dénotant le temps solaire. La différence entre le temps solaire et le temps solaire standard est l'écart Δt entre le Temps Solaire Local (TSL) et Temps Solaire Vrai (TSV) qui est désigné sous le terme d'équation du temps [101].

$$\text{Temps solaire} - \text{Temps Standard} = 4 (L_{st} - T_{loc}) + E \quad (\text{II.29})$$

L_{st} : c'est le méridien standard du temps local d'une zone.

T_{loc} : c'est la longitude de la localité en question.

E : représente l'équation du temps (en minutes), l'expression est proposée par Duffie et Beckman [102] :

$$E = 229,2. (0,000075 + 0,001868.\cos B - 0,032077.\sin B - 0,014615.\cos 2B - 0,04089.\sin 2B). \quad (II.30)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (II.31)$$

n : jour de l'an

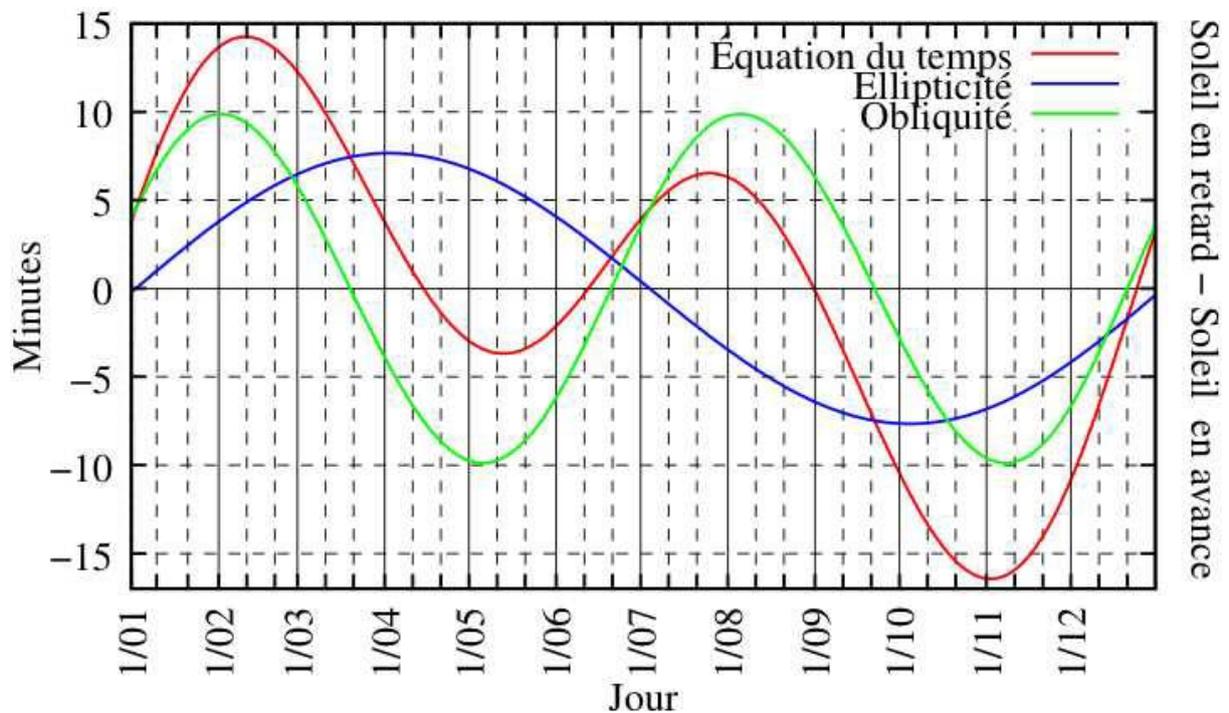


Figure II.12: Diagramme des variations annuelles de l'équation du temps [15,102].

II.1.4.3. Temps Universel

Le Temps Universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil au méridien origine, c'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine), appelé (GMT):

$$TU = TSM - L/15 \quad (II.32)$$

L : La longitude, exprimée en degré

II.1.4.4. Temps solaire Local

La différence entre le temps solaire local et le temps universel est appelée correction de longitude, elle est donnée par la formule suivante:

$$\text{TSL} = \text{TU} + \lambda / 15 \quad (\text{II.33})$$

Chaque pays possède un temps local qui est calculé par rapport à TU (origine Greenwich).

$$\text{TSL} = \text{TU} + \Delta\text{H} \quad (\text{II.34})$$

ΔH : représente le décalage horaire.

II.1.4.5. Temps solaire Vrai (T. S .V)

Le Temps Solaire Vrai représente l'intervalle de temps compris entre deux passages consécutifs du soleil au même méridien. Il est très variable car la vitesse du soleil sur l'écliptique est variable, diminuant du périhélie à l'aphélie pour augmenter, au contraire, de l'aphélie, au périhélie d'une part et du fait de l'obliquité de l'écliptique d'autre part.

La position du soleil dans le ciel à un angle horaire (ω) à un instant donné, nous renseigne du Temps Solaire Vrai (T.S.V). En réalité, c'est le Temps Solaire Local corrigé par l'équation du temps qui est une donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil, il est exprimé par la relation suivante:

$$\text{TSV} = \text{TSL} + \Delta t \quad (\text{II.35})$$

Pour un lieu de longitude λ , il existe une correspondance directe entre l'angle horaire ω , le Temps Solaire Vrai (T.S.V), le Temps Solaire Local (T.S.L) et le Temps Universel (T.U), tel que:

$$\omega = 15^\circ \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.36})$$

$$\omega = 15 \cdot (\text{TU} + \lambda / 15 + \Delta t - 12) \quad (\text{II.37})$$

II.1.4.6. Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Le jour solaire moyen est la moyenne d'un très grand nombre de jours solaires vrais. Le temps moyen a été imaginé pour remédier à l'inégalité des jours solaires vrais. Il est réglé sur l'hypothèse de deux soleils fictifs; le premier, parcourant l'écliptique d'un mouvement uniforme, ce qui corrige l'inégalité de la vitesse du soleil vrai, et passant en même temps que ce dernier au périhélie et à l'aphélie; le second, le soleil moyen, parcourant l'équateur avec la même vitesse que le premier parcourant l'écliptique, ce qui corrige l'obliquité de celle-ci, et passant en même temps que lui à l'équinoxe. Le mouvement du soleil moyen et, du fait que le soleil moyen parcourt l'équateur avec une vitesse constante, l'intervalle entre deux passages

consécutifs de ce soleil au méridien d'un même lieu est appelé jour solaire moyen (également appelé jour moyen) est aussi constant. On introduit la notion de Temps Solaire Moyen (T.S.M), qui varie par rapport au T.S.V, où le terme correctif (ET) désigne l'équation du temps :

$$T.S.M = T.S.V - ET \quad (II.38)$$

II.1.5. Energie solaire et rayonnement solaire

II.1.5.1. Origine de l'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie du rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière parvenant sur la surface de la terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre. L'énergie solaire est disponible en tout point du globe terrestre alors que les autres énergies conventionnelles sont concentrées en certaines sources (gisements pétroliers, centrales électriques). L'énergie solaire ne nécessite pas d'être transportée vers les centres d'utilisation, cette dispersion est un avantage mais elle est contrariée par le fait que la puissance incidente par unité de surface est faible. Les réserves terrestres en combustibles fossiles et nucléaires ne représentent même pas 20 % de l'énergie envoyée par le soleil en une année. Cette énergie, d'origine nucléaire extra-terrestre résultant des réactions chimiques, équivaut à $3,47 \cdot 10^{24}$ GWh, le soleil est inépuisable à l'échelle humaine bien que sa masse diminue de 5 millions de tonnes par seconde [103]. La terre est considérée ici comme une sphère ayant un diamètre égal à $1,27 \cdot 10^7$ m donc 100 fois plus petit que celui du soleil. Elle est entourée de l'atmosphère où la pression de l'air diminue quand l'altitude augmente. La puissance solaire est de l'ordre de 1 kW/m^2 au niveau du sol [88]. En ce qui concerne l'Algérie, nous avons au nord du pays $1.700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour 2.600 heures d'ensoleillement, dans les hauts plateaux $1.900 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour 3.000 heures d'ensoleillement et au sud $2.200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour 3.400 heures d'ensoleillement. La dispersion fait que l'énergie solaire est disponible, c'est une énergie qui couvre les besoins décentralisés et est à la portée des populations rurales [103].

II.1.6. Rayonnement solaire

II.1.6.1. Nature et composition :

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière et dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour

l'atmosphère. Cependant, toute la gamme des rayonnements électromagnétiques se compose essentiellement de rayon ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. Voir aussi la constitution de cette lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98 % d'énergie est comprise entre $\lambda' = 0.25 \mu\text{m}$ et $\lambda' = 4 \mu\text{m}$, le reste représente 1% au dessus et 1% au dessous de cet intervalle (Figure II.13) [89].

Le rayonnement solaire est représenté par la lumière visible (LV : 0.4 - 0.8 μm) et de la lumière invisible [(UV : 0.25 - 0.4 μm) et (IR : 0.8 - 4 μm)]. L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie sur toutes les longueurs d'ondes, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde λ'_m donnée par la loi de Wien : $\lambda'_m T = 2.898 \mu\text{m K}$ pour $T = 5.777 \text{ K}$ et $\lambda'_m = 0.5 \mu\text{m}$. L'analyse du spectre du rayonnement solaire montre une ressemblance avec celui d'un corps noir de même surface et porté à une température de 5.800 K dans l'intervalle du spectre (0.25 μm - 4 μm) et peut donc être décrit par la loi de Planck. Le maximum d'émission est dans le jaune ($\lambda = 570 \text{ nm}$), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible et pour moitié dans l'infrarouge, avec 1 % d'ultraviolets. Arrivé au niveau de la mer, c'est à dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, une partie du rayonnement solaire a été absorbée. On peut repérer notamment sur le spectre ci-dessous les bandes d'absorption de l'ozone (qui absorbe une partie importante des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau (Figure II.14)[104].

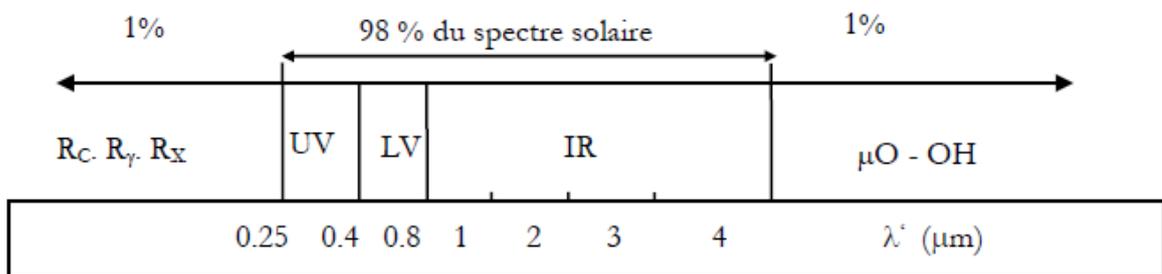


Figure II.13: Composition du rayonnement [89].

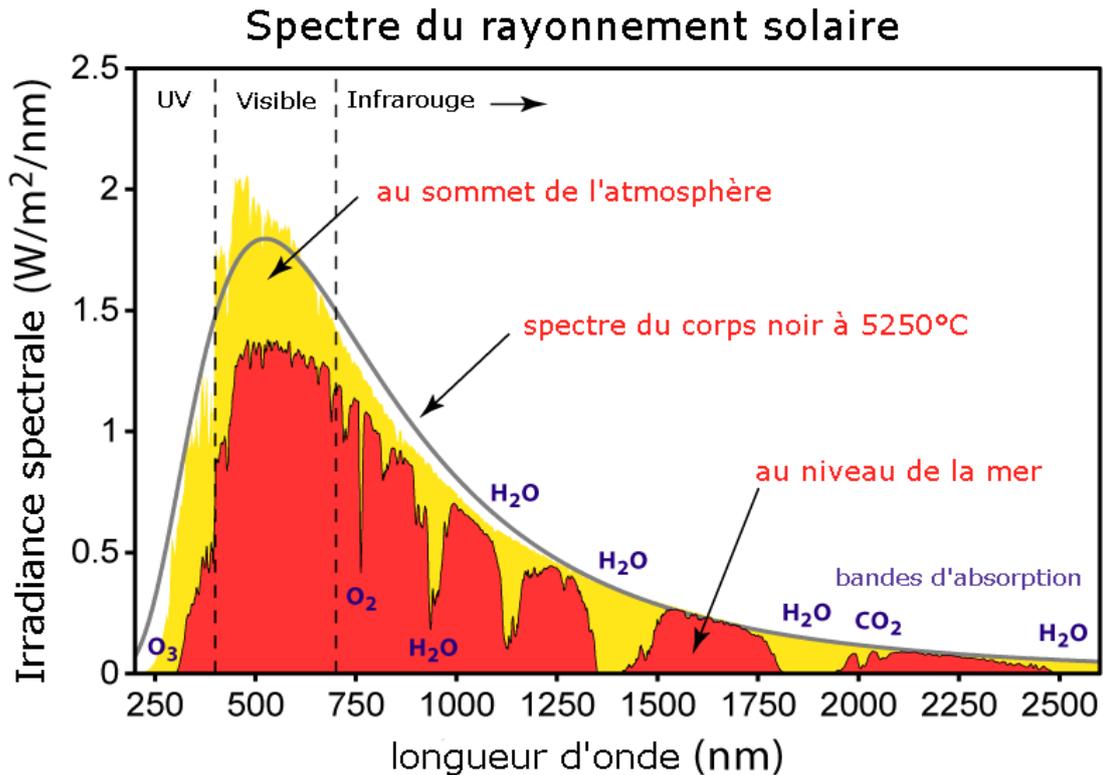


Figure II.14 : Répartition du Spectre du rayonnement solaire hors atmosphère et au niveau du sol [104].

II.1.6.2. Caractéristiques du rayonnement solaire :

Plusieurs lois ont été décrites pour définir les caractéristiques du rayonnement solaire :

II.1.6.2.1. Loi de Plank

Selon la loi de Plank, le rayonnement solaire est constitué de la gamme de radiation comprise entre 0.1 m et 24 m, qui correspond au spectre du rayonnement émis par un corps noir porté à une température de 588 K. Cette loi donne la répartition suivant la longueur d'onde (λ) du flux émis d'un corps noir à la température (T). La loi de Plank s'obtient en établissant la relation entre la densité volumique d'énergie électromagnétique des champs rayonnés et le flux partant ou incident ; elle caractérise l'émittance monochromatique du corps noir à la longueur d'onde (λ) et à la température (T) soit :

$$dF_{emis}^{CN} = \frac{2\pi h C^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{KB\lambda T}} - 1} \times d\lambda \quad (II.39)$$

h : Constante de Plank = 6.63×10^{-34} (J. s).

K_B : Constante de Boltzman = 1.38×10^{-23} (J/K).

C : vitesse de la lumière = 3.00×10^8 m/s.

λ : longueur d'onde.

T : Température du corps opaque (K).

La théorie corpusculaire de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence (ν) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire (E) est directement proportionnelle à cette fréquence.

$$E = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{II.40})$$

Où h : est la constante de Planck, c : la vitesse de la lumière et λ : la longueur d'onde.

De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques; la plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge. 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et 4 μm . Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité à 2,5 μm environ [90,91].

II.1.6.2.2 Loi de Wien

La loi de Wien dite loi de déplacement découle directement de la loi de Planck, pour une température donnée, elle donne la valeur de la longueur d'onde (λ_m) où le flux est maximal :

$$\lambda_m \times T = 3000 \mu\text{m} \times K \quad (\text{II.41})$$

II.1.6.2.3 Loi de Stéphane

Elle donne l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de la température absolue, elle est obtenue en intégrant la loi de Planck sur l'ensemble du spectre rayonné :

$$F_{emi}^{CN} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B \lambda T}} - 1} d\lambda = \sigma \times T^4 \quad (\text{II.42})$$

Avec : $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$

II.1.6.3. Rayonnement solaire et position du soleil

A tout moment et à n'importe quel endroit donné, la connaissance de la position du soleil est nécessaire pour le calcul de la composante du rayonnement solaire incident sur une surface inclinée et pour la détermination des angles formés sur la surface considérée qui dépend des propriétés optiques de matériaux transparents choisis [105, 106]. La liaison soleil-rayonnement solaire et surface réceptrice détermine la position du soleil qui peut être

spécifiée par les angles formés tel que : le zénith (θ_z), la déclinaison (δ), l'azimut (γ_s) et l'angle horaire (ω) [107]. C'est ainsi que le rayonnement solaire incident forme un angle zénithal (θ_z) sur la normale du plan horizontal et un angle d'incidence (θ_i) avec la normale d'un plan incliné. Il convient également de mentionner que la déclinaison (δ) est l'angle entre les rayons du soleil et le plan équatorial, ce paramètre est positif dans l'hémisphère nord et négatif dans l'hémisphère sud. En plus de l'angle d'azimut solaire qui est mesuré à partir de la projection du rayonnement solaire sur un plan horizontal vers l'hémisphère sud, il est négatif dans la position sud-est et est positif dans la position sud-ouest [15]. En relation, la terre doit tourner d'un angle horaire ' ω ' pour amener le méridien d'un observateur à un point spécifique en lien direct avec les rayons du soleil, en plus, ' ω ' est négatif le matin, égale à zéro à midi solaire et positif dans l'après-midi [108]. Les différents angles solaires sur une surface sont représentés dans la figure (II.15) [109].

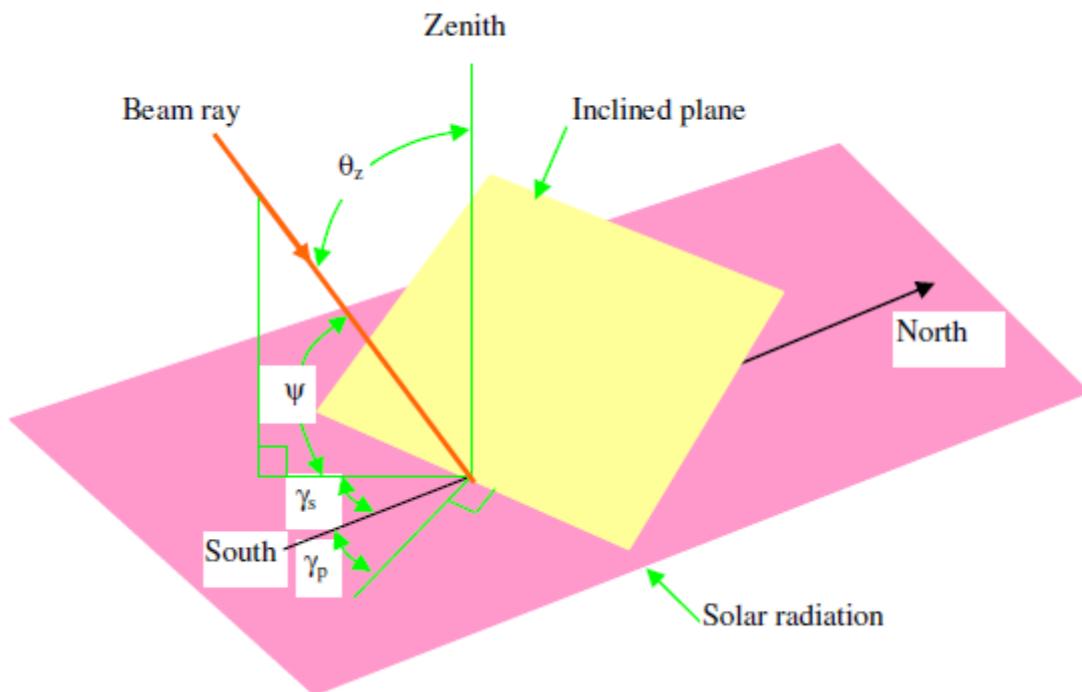


Figure II.15 : Schéma de diffusion et de captage du rayonnement solaire direct sur une surface inclinée, formant les angles solaires (dans l'hémisphère nord) [109].

II.1.6.4. Emission du rayonnement solaire

Il est intéressant de remarquer que sur le plan d'émission du rayonnement, le soleil se comporte de façon similaire à un corps noir, à une température qui avoisine 6.000 K. La terre et son atmosphère jouent un rôle de transformateurs de l'énergie solaire, qu'elles reçoivent principalement sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'ondes et qu'elles réémettent vers l'espace essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge [90,91]. Les photons ne sont pas émis en même quantité par le soleil quelle que soit la longueur d'onde. Si l'on mesure l'énergie associée à chaque gamme de longueurs d'onde dans le rayonnement solaire, on observe que celle-ci est très faible pour des longueurs d'onde inférieures à 0,2 μm et pour des longueurs d'onde supérieures à 4 μm , mais aussi qu'elle passe par un maximum autour de 0,5 μm correspondant au jaune (qui est bien la couleur dominante de l'astre solaire) (Figure II.16.).

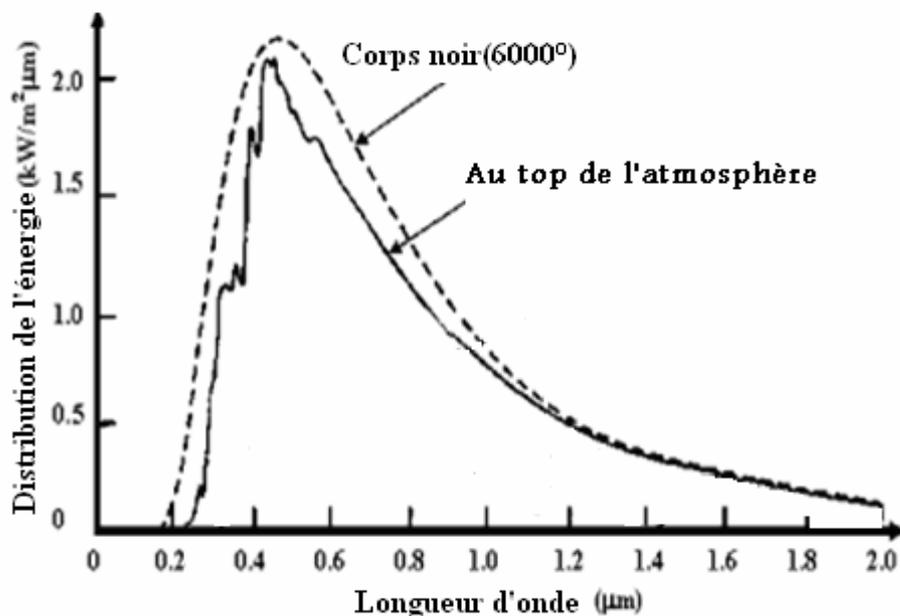


Figure II.16 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère [90,91].

II.1.7. Répartition du rayonnement solaire

II.1.7.1 Rayonnement solaire hors atmosphère

L'orientation de l'orbite de la terre autour du soleil se rapproche de la même distance terre-soleil qui ne varie que de 1,7 % et que le rayonnement solaire hors de l'atmosphère de la terre est presque d'intensités fixes. Le flux énergétique reçu par seconde par une surface de la

zone de l'unité en attente normale à la direction des rayons du soleil à la distance moyenne terre-soleil, en dehors de l'atmosphère, est pratiquement constant tout au long de l'année. La valeur de la constante solaire est désormais adoptée à 1.367 W/m^2 . Cependant, ce rayonnement extraterrestre subit la variation due au fait que la terre tourne autour du soleil, pas en orbite circulaire, mais suit une trajectoire elliptique. L'intensité du rayonnement extraterrestre I_{ext} mesurée sur un plan perpendiculaire à l'irradiation sur le nième jour de l'année est donnée en termes de la constante solaire (I_{sc}) par la relation ci-dessous [102]. Cette équation n'est valable que pour les surfaces de réception perpendiculaires aux rayons du soleil, autrement dit, pour un zénith de 0° soit :

$$I_{ext} = I_{sc} \left[1.0 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \quad (\text{II. 43})$$

$I_{EXT}(j)$: Rayonnement solaire extraterrestre au jour j sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil (W/m^2).

I_{CS} : Constante solaire (1.367 W/m^2).

n : nombre de jour de l'année compté à partir du 1^{er} Janvier.

- Rayonnement solaire extraterrestre sur une surface horizontale

Le Rayonnement solaire extraterrestre représente la quantité théorique de l'énergie solaire qui serait en disposition pour être utilisée sur la surface d'un plan horizontal de la terre. En réalité, le rayonnement solaire est atténué lorsqu'il passe à travers la matière particulaire entourant la terre, ce qui entraîne une diminution de son intensité lorsqu'il est mesuré sur la surface d'un plan terrestre. À n'importe quel moment donné dans la journée, le rayonnement solaire extraterrestre (I_0) incident sur un plan horizontal est donné par la relation suivante [110] :

$$I_0 = I_{sc} \left[1.0 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (\text{II. 44})$$

Où : I_{sc} est la constante solaire et « n » représente le jour de l'année. Le nombre de jours moyen recommandé pour chaque mois et la détermination des valeurs de n jour par mois est illustré dans le tableau ci-dessous [102].

Tableau II. 3 : Les jours moyens recommandés pour chaque mois de l'année [102].

Mois	n pour ith jour du mois
Janvier	i
Fevrier	$31+i$
Mars	$59+i$
Avril	$90+i$
Mai	$120+i$
Juin	$151+i$
Juillet	$181+i$
Aout	$212+i$
Septembre	$243+i$
Octobre	$273+i$
Novembre	$304+i$
Décembre	$334+i$

A partir de l'équation (2.45) et par substitution de l'expression de $\cos\theta_z$ on a :

$$I_0 = I_{sc} \left[1.0 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi) \quad (\text{II.45})$$

Pour calculer le rayonnement solaire journalier, il est souvent nécessaire d'avoir l'intégration de l'expression du rayonnement solaire sur une surface horizontale, sur la période étendue du lever jusqu'au coucher du soleil tandis que le rayonnement extraterrestre horaire sur une surface horizontale, il peut être calculé par l'intégration de l'équation ci-dessous (II.46), pendant une période définie entre les angles horaires allant de ω_1 et ω_2 heures (où ω_2 est plus grand). En résumé, dans les études du système de l'énergie solaire par modélisation et expérimentales, les données du rayonnement horaire (I) et journalier (H) est parfois requis par intégration des valeurs du rayonnement solaire extraterrestre horaire (I_0) et journalier (H_0) sur une surface plane sont utilisées dans un tel calcul [102 ,111].

Avec : I_{sc} en Watt/m² et H_0 en Joules / m², donc :

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} I_{sc} \left[1.0 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \times \left(\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \left(\frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \right) \sin \delta \sin \varphi \right)$$

(II.46)

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} I_{sc} \left[1.0 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \times \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{2\pi \omega_s}{360} \right) \sin \delta \sin \varphi \right)$$

(II.47)

II.1.7.2 Le rayonnement solaire au sol

II.1.7.2.1 Le rayonnement solaire sur une surface plane horizontale et inclinée

Le rayonnement solaire global incident atteignant une surface de la terre en passant par l'atmosphère est parfois désigné sous le nom de rayonnement solaire global qui représente le rayonnement solaire direct, le rayonnement solaire diffus et le rayonnement solaire réfléchi par le sol et l'environnement.

II.1.7.2.1.1 Rayonnement solaire direct (I_D)

C'est le rayonnement qui se propage le long de la ligne reliant la surface de réception et le soleil.

II.1.7.2.1.2 Le rayonnement solaire diffus (I_d)

C'est le rayonnement solaire diffusé par les aérosols, les poussières et les molécules, il n'a pas une direction unique. Normalement, le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus sont raccordés par rapport à une surface horizontale. Dans ce cas, on utilise les expressions qui suivent et qui concernent la projection des rayonnements solaires direct et diffus sur cette même surface, soit:

$$I_D = I_N \cos \theta_z \quad (\text{II.48})$$

$$I_d = (1/3) [I_{\text{ext}} - I_N] \cos \theta_z \quad (\text{II.49})$$

I_N : est l'intensité du rayonnement sur la normale dont l'expression:

$$I_N = I_{\text{ext}} \cdot \exp [-T_R / (0.9 + 9.4 \sin \alpha)] \quad (\text{II.50})$$

T_R : Le facteur de turbidité qui est illustré dans le Tableau ci-dessous selon la nature du terrain et le climat de chaque mois de l'année.

Tableau II.4 : Facteur de turbidité pour différents mois de l'année et différentes régions [100].

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Régions												
Montagne	1.8	1.9	2.1	2.2	2.4	2.7	2.7	2.7	2.5	2.1	1.9	1.8
Terre Plate	2.2	2.2	2.5	2.9	3.2	3.4	3.5	3.3	2.9	2.6	2.3	2.2
Agglomération	3.1	3.2	3.5	3.9	4.1	4.2	4.3	4.2	3.9	3.6	3.3	3.1

N.B : Pour les conditions de nuage TR = 10.0

II.1.7.2.1 .3 Le rayonnement solaire global :

Après avoir pris connaissance du rayonnement solaire direct et diffus sur une surface horizontale, Liu et Jordan [112].ont donné une formule qui détermine le rayonnement solaire total (global) sur une surface possédant une orientation arbitraire tel que :

$$I_T = I_D R_D + I_d R_d + \rho R_r (I_b + I_d) \quad (\text{II.51})$$

Où : R_D , R_d et R_r sont connus comme des facteurs de conversion pour respectivement le rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi, tandis que 'ρ' c'est le coefficient de réflexion de la terre pour respectivement un terrain ordinaire et un terrain couvert ($\rho = 0,2$ et $0,6$). Les expressions de ces paramètres sont définies comme suit:

R_D : est défini comme le rapport du flux de rayonnement direct sur une surface inclinée par rapport à une surface horizontale.

Le flux de rayonnement direct incident sur une surface horizontale (I_D) est donné par:

$$I_D = I_N \cos \theta_z \quad (\text{II.52})$$

Par contre, le rayonnement direct incident sur une surface inclinée (I'_D) est :

$$I'_D = I_N \cos \theta_i \quad (\text{II.53})$$

Où : θ_z et θ_i sont respectivement les angles d'incidence sur les surfaces horizontales et inclinées, et I_N est l'intensité du rayonnement solaire direct. L'expression R_D , pour un rayonnement solaire direct, peut être obtenue par la relation suivante:

$$R_D = \frac{I'_D}{I_D} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} \quad (\text{II.54})$$

Suivant l'orientation de la surface inclinée, les expressions de $\cos \theta_i$ et $\cos \theta_z$, prennent respectivement la forme des équations (II.18) et (II.19).

La variation de R_b avec le nième jour de l'année pour différentes latitudes et inclinaisons et différents angles horaires est considérée, c'est ainsi que ce facteur (R_b) a un effet significatif à une latitude élevée pour une valeur minimale de n , comme il dépend également de manière significative d'un angle d'inclinaison élevé (β) et devient moins important à la plus faible valeur de (β). La valeur maximale de (R_b) est subordonnée à une exigence d'une faible valeur de n . Un effet similaire est vérifié pour un angle horaire donné, cependant la tendance (R_b) est à sa valeur minimale pour n élevé, indépendamment de toute valeur de (ω) qui est en accord avec son mouvement durant les premières heures de la matinée ou celle d'une soirée prolongée [100].

R_d : c'est la proportion du flux de rayonnement diffus en projection sur la surface inclinée par rapport à une surface horizontale.

Ce facteur de conversion dépend de la distribution du rayonnement solaire diffus au dessus du ciel et sur une portion de ciel vu par la surface. Il est, cependant, largement admis que le ciel est une source isotrope de rayonnement diffus. Si $(1 + \cos \beta) / 2$ soit le facteur de forme de rayonnement pour une surface inclinée par rapport au ciel, nous avons donc:

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (\text{II.55})$$

R_r : Facteur de conversion du rayonnement réfléchi : La composante réfléchie provient principalement de la terre et d'autres objets environnants, si le rayonnement réfléchi est considéré comme diffus et isotrope, alors la situation est opposée à celle dans le cas précédant.

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{II.56})$$

II.1.7.2.1.4 Cas particuliers

Le cas mentionné ici indique que les composants du rayonnement direct et diffus subissent la réflexion de la terre et de l'environnement. A partir de l'équation (II.51) et pour $\beta = 90^\circ$, $R_d = R_r = 0,5$, indiquant que la moitié du rayonnement diffus et la moitié du rayonnement total réfléchi est reçu par un plan vertical.

Pour un plan horizontal, on peut déduire, à partir de l'équation (II.55), que $R_d = 1$, dont la plus grande partie du rayonnement diffus est reçu par un plan horizontal. Dans ce cas, $\beta = 0$ et $R_r = 0$, indiquant que le plan horizontal ne peut pas recevoir un rayonnement réfléchi.

Le rapport effectif de l'énergie solaire incidente sur une surface, par rapport à celle sur une surface horizontale, R' est:

$$R' = \frac{I_t}{I_b + I_d} = \frac{I_b R_b + I_d R_d}{I_b + I_d} + \rho R_r \quad (\text{II.57})$$

II.1.7.3 Atténuation du rayonnement solaire par la couverture d'un distillateur solaire

Le rayonnement solaire global correspond au flux solaire capté par la surface de la couverture en verre d'un distillateur solaire au niveau du sol, après avoir subi des altérations et des atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère. La vitre du distillateur est caractérisée par des propriétés optiques telles que la réflexion (ρ), l'absorption (α) et la transmission (τ) des parties du rayonnement solaire. La somme des proportions du rayonnement réfléchi, absorbé et transmis à travers la vitre est égale à l'unité et les fractions citées, sont influencées par les propriétés optiques du rayonnement solaire incident [113]. La longueur d'onde (λ) et la direction (θ) du rayonnement influent particulièrement sur la grandeur de l'atténuation, donc les coefficients de réflexion (ρ), d'absorption (α) et de transmission (τ) peuvent être exprimées par la relation suivante :

$$\alpha(\lambda, \theta) + \rho(\lambda, \theta) + \tau(\lambda, \theta) = 1 \quad (\text{II.58})$$

La majeure partie du rayonnement solaire reçu par la surface de la terre est dans une gamme de longueurs d'onde de 0,29 à 3×10^{-6} m [114,115]. Néanmoins, de nombreux types de vitrages ont une faible sélectivité spectrale dans le spectre solaire [113]. Compte tenu de ceci, seulement leur dépendance angulaire peut être prise en compte comme représenté sur la figure (II.17).

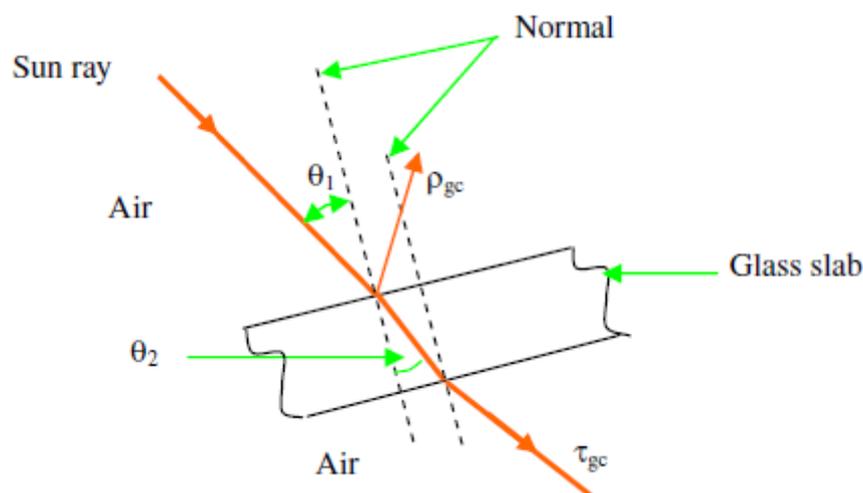


Figure II .17 : Propagation du rayonnement solaire à travers l'air et la couverture en verre d'un distillateur solaire [102].

II.1.8. La loi relative au passage du rayonnement à travers un milieu transparent

II.1.8. 1 Loi de Snell-Descartes pour la réfraction

Lorsqu'une onde électromagnétique (lumière) provenant d'un milieu arrive à la couche limite d'un autre milieu, elle change aussi bien la vitesse que la direction de sa trajectoire. Le rayon est réfracté. La loi de Snell-Descartes de la réfraction exprime le changement de direction d'un faisceau lumineux lors de la traversée d'une paroi, séparant deux milieux différents figure (II.18). Chaque milieu est caractérisé par sa capacité à ralentir la lumière, modélisé par son indice de réfraction n qui s'exprime sous la forme suivante :

$$n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{II.59})$$

La loi de la réfraction s'énonce ainsi ;

Le rayon réfracté est dans le plan d'incidence ;

La relation liant les indices de réfraction n_1 et n_2 de chacun des milieux et les angles incident θ_1 et réfracté θ_2 sont liés par la relation dite de Snell-Descartes :

$$n_1 \times \sin(\theta_1) = n_2 \times \sin(\theta_2) \quad (\text{II.60})$$

Pour $n_1 > n_2$ (et respectivement $n_1 < n_2$), le rayon réfracté (ou incident) se rapproche plus rapidement du dioptré que le rayon incident (ou réfracté). Quand le rayon réfracté (ou incident) se retrouve mathématiquement sur le dioptré (sa limite) il y a alors réflexion totale.

C_1 : Vitesse de la lumière dans le milieu 1 (le vide ou l'air).

C_2 : Vitesse de la lumière dans le milieu 2.

θ_1 : Angle d'incidence.

θ_2 : Angle de réfraction.

n_1 : Indice de réfraction du milieu 1.

n_2 : Indice de réfraction du milieu 2.

n : Indice de réfraction de la combinaison des milieux 1 et 2.

Le rayonnement lumineux est dit incident, avant d'avoir rencontré la surface réfractante (appelée dioptré), il est dit réfracté après.

Le point de rencontre du rayon incident et du dioptré est appelé point d'incidence.

Le plan contenant le rayon incident et la normale au dioptré, au point d'incidence est dit plan d'incidence.

L'angle orienté (θ_1) pris entre la normale au point d'incidence et le rayon incident est dit angle d'incidence.

L'angle orienté (θ_2) pris entre la normale au point d'incidence et le rayon réfracté est dit angle de réfraction.

Les angles (θ_1 et θ_2) sont positifs s'ils sont orientés dans le sens trigonométrique, sinon ils sont négatifs.

Soit (n_1) l'indice de réfraction du milieu dans lequel se propage le rayon incident et (n_2) celui du milieu dans lequel se propage le rayon réfracté.

L'indice de réfraction d'un milieu déterminé (n_1, n_2) est égal au rapport entre la vitesse de la lumière sous vide et celle de ce milieu. Il est toujours plus grand que 1. L'indice de réfraction pour la combinaison de deux milieu (ex : Air/verre) est le rapport des vitesses de ces deux milieux.

Tableau II. 5 : Représentation des indices de réfraction de quelques substances.

Désignation du produit	Indice de réfraction (n)
L'air	1.0003
L'eau	1.333
Le verre	1.526

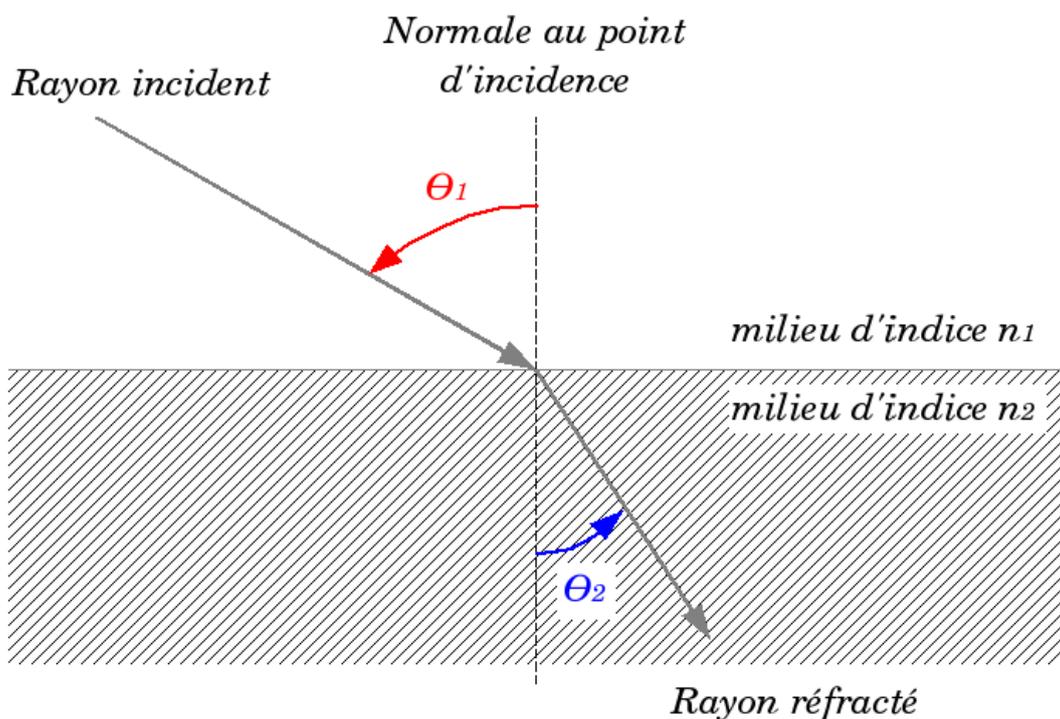


Figure II.18 : Schéma de la réfraction : le faisceau du rayonnement solaire est dévié selon la loi dite de Snell-Descartes.

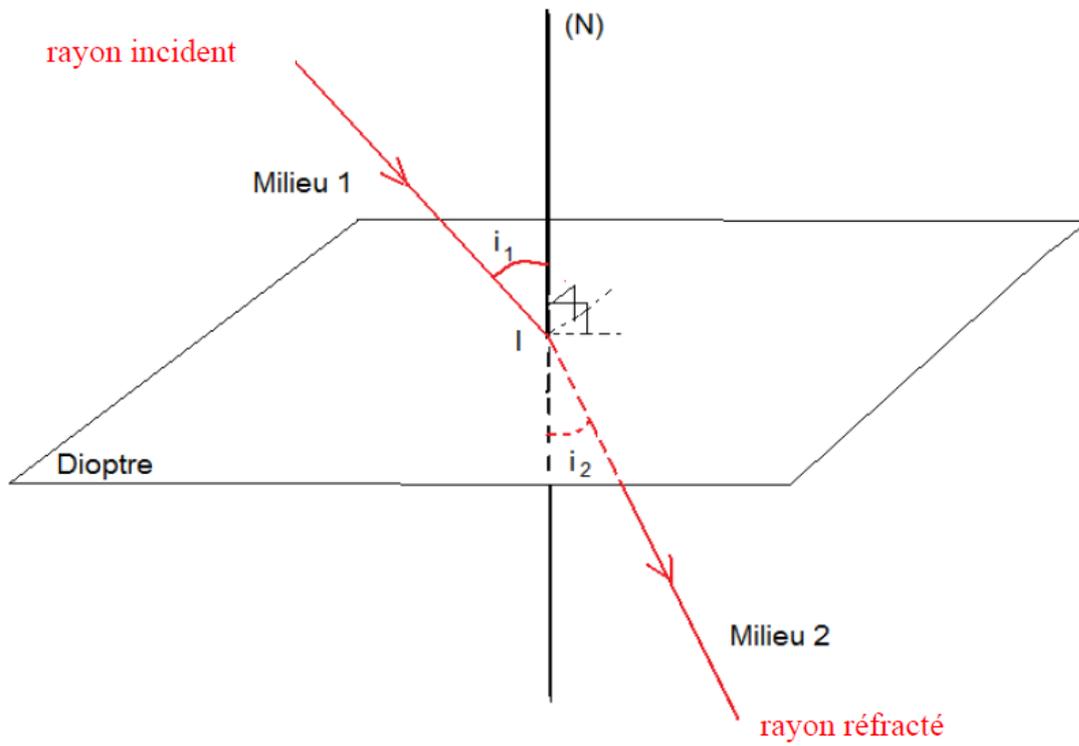


Figure II.19 : Les éléments d'un milieu réfractant

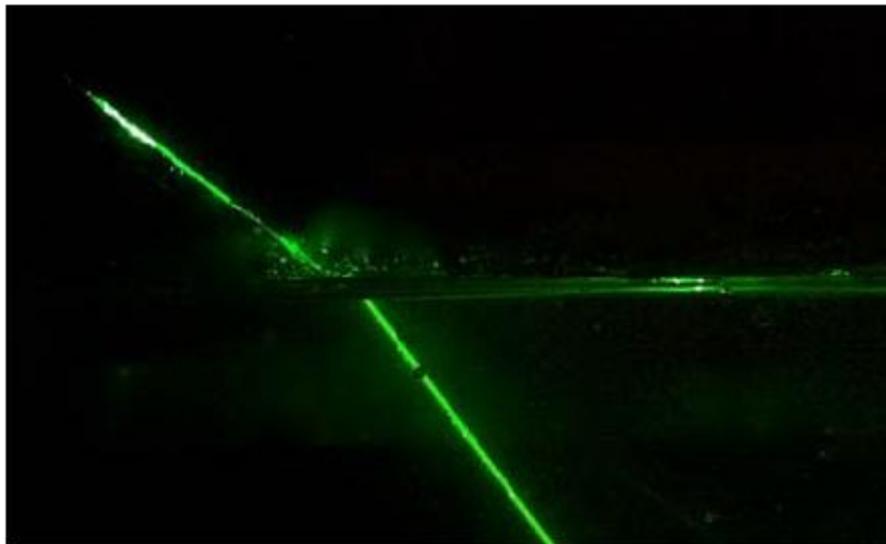


Figure II.20 : Réfraction de la lumière à la surface de l'eau

Le rayon lumineux est dit incident avant d'avoir rencontré la surface réfléchissante, il est dit réfléchi après. Le point de rencontre du rayon incident et de la surface réfléchissante est appelé point d'incidence. La droite orthogonale à la surface réfléchissante au point d'incidence est appelée normale (à la surface réfléchissante). Le plan contenant le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante au point d'incidence est dit plan d'incidence. L'angle orienté (θ_1) pris entre la normale au point d'incidence et le rayon incident est dit angle d'incidence. L'angle orienté (θ_2) pris entre la normale au point d'incidence et le rayon réfléchi est dit angle de réflexion. Les angles (θ_1) et (θ_2) sont positifs si orientés dans le sens trigonométrique, négatifs sinon. Remarque : certains auteurs utilisent d'autres conventions. La loi de la réflexion s'énonce ainsi :

- le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence,
- les angles incidents et réfléchis sont égaux en valeurs absolues, θ_1 et θ_2 vérifient :

$$\theta_2 = -\theta_1$$

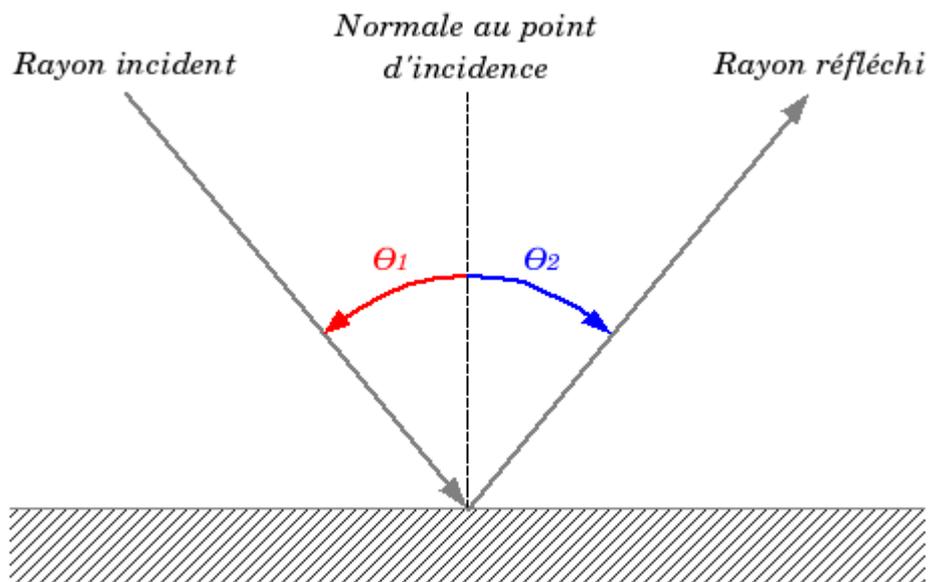


Figure II.21 : Schéma de principe de la loi de la réflexion : les faisceaux incidents et réfléchis forment avec la normale le même angle, qu'il faut orienter correctement.

II.1.8.2 Le rayonnement polarisé et non polarisé

Le Rayonnement solaire incident est polarisé quand il se propage à travers un matériau transparent [115]. Les composants perpendiculaires et parallèles de rayonnement non polarisé sont polarisés différemment par le matériau transparent. Ce résultat est traduit par des différences dans la réflectance, la transmittance et de coefficients d'absorption du matériau de la couverture en verre pour les deux composantes cités auparavant. Le facteur de transmission de la couverture peut être calculé en intégrant la dépendance angulaire de l'atténuation solaire [116]. Pour la composante perpendiculaire du rayonnement non polarisé, la réflectance (ρ_n), le coefficient d'absorption (α_n) et celui de la transmission (τ_n) sont calculés comme suit [102]:

$$\tau_{ab} = e^{(-Kx_{gc}/\cos\theta_2)} \quad (\text{II.61})$$

$$\alpha_n = (1 - \tau_{ab}) \left(\frac{1-r_n}{1-r_n\tau_{ab}} \right) \quad (\text{II.62})$$

$$r_n = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{II.63})$$

$$\tau_n = \frac{\tau_{ab}(1-r_n)^2}{1-(r_n\tau_{ab})} \quad (\text{II.64})$$

Des équations similaires sont utilisées pour calculer les valeurs correspondantes à l'absorbance, la réflectance et à la transmittance de la composante parallèle de rayonnement solaire non polarisé, avec n qui est remplacé par r_{pr} , tel que :

$$r_{pr} = \frac{tg^2(\theta_2 - \theta_1)}{tg^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{II.65})$$

Les propriétés optiques angulaires requises, dépendant d'une seule couverture transparente en verre, sont obtenus à partir des expressions suivantes :

$$\alpha = \frac{(\alpha_n + \alpha_{pr})}{2} \quad (\text{II.66})$$

$$\tau = \frac{(\tau_n + \tau_{pr})}{2} \quad (\text{II.67})$$

$$\rho = \frac{(\rho_n + \rho_{pr})}{2} \quad (\text{II.68})$$

Le facteur de réflexion pour une seule couverture en verre peut être donné par l'expression suivante :

$$\rho \cong \tau_{ab}^{-\tau} \quad (\text{II.69})$$

Il convient de mentionner que les valeurs de ρ et τ à une incidence normale ($\theta_1 = 0$) sont couramment utilisées pour différents matériaux transparents avec des épaisseurs spécifiées.

Avec plus de détail, la transmittance est formée par des composantes parallèles et perpendiculaires du rayonnement incident non polarisé et qui peuvent être interprétées [102] :

$$\tau_{\perp} = \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \quad (\text{II.70})$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} \quad (\text{II.71})$$

Dans le cas de La réflexion, les composantes parallèles et perpendiculaires du rayonnement incident non polarisé sont ainsi obtenues :

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{II.72})$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (\text{II.73})$$

La transmittance avec absorption perdue à travers la couverture en verre est estimée par:

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{k_{\text{ext}}L}{\cos\theta_2}\right) \quad (\text{II.74})$$

A partir de la loi de Snell-Descartes, on obtient :

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1\right) \quad (\text{II.75})$$

II.1.9 Application : Rayonnement solaire global reçu par un distillateur solaire

Le rayonnement solaire global atteignant la surface de l'unité de distillation solaire, au niveau du sol, est subdivisé en deux grandes parties, une partie du rayonnement solaire est directe, une autre partie est diffuse par réflexion, c'est ainsi que l'expression globale du rayonnement solaire global s'obtient :

$$I_G = I_D + I_d \quad (\text{II.76})$$

II.1.9.1 Rayonnement solaire direct

La relation suivante exprime l'intensité du flux de rayonnement direct reçu par une surface de la vitre d'un distillateur solaire :

$$I_D = I_{D,h} \times \cos(i) \quad (\text{II.77})$$

$I_{D,h}$: correspond au rayonnement solaire direct sur un plan horizontal :

$$I_{D,h} = I_0 \times C \times \tau_D \quad (\text{II.78})$$

$$C = \left[1 + 0.034 \times \cos \left(\frac{360 \times n}{365} \right) \right] \quad (\text{II.79})$$

τ_D : représente la transmissivité totale de la couche atmosphérique, pour le rayonnement direct :

$$\tau_D = a \times \exp \left(\frac{-b}{\sinh} \right) \quad (\text{II.80})$$

Les paramètres a et b représentent les coefficients de trouble du ciel dont leurs valeurs sont données dans le tableau ci- dessous :

Tableau II.6 : Valeurs des coefficients de trouble (a) et (b).

Paramètres	Ciel dégagé	Conditions Normales	Zones industrielles
a	0,87	0,88	0,91
b	0,17	0,26	0,43

II.1.9.2 Rayonnement solaire diffus

Le flux diffus reçu par la vitre provient du rayonnement émis par la voûte céleste et de celui émis par le sol.

$$I_d = I_{d,c} + I_{d,s} \text{ (w/m}^2\text{)} \quad (\text{II.81})$$

• $I_{d,c}$: intensité émise par la voûte céleste qui atteint le capteur :

$$I_{d,c} = I_{d,h} \times (1 + \cos \beta) / 2 \quad (\text{II.82})$$

• $I_{d,h}$: intensité du rayonnement diffus par rapport à l'horizontale :

$$I_{d,h} = I_0 \times C \times \sin h \times \tau_d \quad (\text{II.83})$$

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos \omega + \sin \delta \times \sin \varphi \quad (\text{II.84})$$

β : l'angle d'inclinaison de la vitre

• τ_d : la transmissivité totale de la couche atmosphérique pour le rayonnement diffus :

$$\tau_d = (0,2710 - 0,2939) \times \tau_D \quad (\text{II.85})$$

• $I_{d,s}$: intensité en provenance du sol et atteignant le capteur :

$$I_{d,s} = \rho \times ((1 - \cos \beta) / 2) \times (I_{dh} \times \sin h + I_{dh}) \text{ (w/m}^2\text{)} \quad (\text{II.86})$$

ρ : caractérise l'équivalence du facteur de réflexion, on l'appelle aussi l'albédo d'une surface, il est égal au rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie totale reçue sous forme de rayonnement.

Suivant la nature du sol on trouve les valeurs de l'albédo solaire [96] :

Tableau II.7 : Valeurs de l'albédo du sol (ρ) [96].

Nature du sol	Neige fraîche	Sol rocheux	Sol cultivé	foret	étendue d'eau
Valeur de ρ	0.8 – 0.9	0.5 -0.7	0.07- 0.14	0.06-0.2	0.05

II.1.10 Puissances absorbées par les différents composants du distillateur solaire :

II.1.10.1 Puissance absorbée par la vitre

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_G = I_D \times \alpha_{GD} + I_d \times \alpha_{Gd} \quad (\text{II.87})$$

• α_{GD} : coefficient d'absorption pour le rayonnement direct, exprimé par la relation :

$$\alpha_{GD} = 1 - r_D - \tau_D \quad (\text{II.88})$$

• τ_D : coefficient de transmission global du rayonnement direct, il est calculé par la formule :

$$\tau_D = \tau_r \times \tau_a \quad (\text{II.89})$$

• τ_r : coefficient de transmission du à la réflexion :

$$\tau_r = 1 - r_D / 1 + r_D \quad (\text{II.90})$$

• τ_a : coefficient de transmission du à l'absorption :

$$\tau_a = \exp [-K_G \times e_G / \cos \theta] \quad (\text{II.91})$$

K_G : coefficient d'extinction du verre [m^{-1}] ;

e_G : épaisseur de la vitre (m) ;

θ : angle de réfraction du rayon au niveau de la vitre ;

r_D : caractérise la réflectivité de la vitre, donné par l'expression :

$$r_D = r_N + r_P / 2 \quad (\text{II.92})$$

$$r_N = \sin^2(\theta - i) / \sin^2(\theta + i) \quad (\text{II.93})$$

$$r_P = \tan^2(\theta - i) / \tan^2(\theta + i) \quad (\text{II.94})$$

i et θ sont reliés par la relation de snell – Décartes [9] :

$$n_1 \times \sin i = n_2 \times \sin \theta \quad (\text{II.95})$$

n_1 : indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon incident ;

n_2 : indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon réfracté ;

- α_{Gd} : coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus, se calcul comme celui du rayonnement direct pour les différents angles d'incidence i à chaque heure de la journée soit :

$$\alpha_{Gd} = 1 - rd - \tau d \quad (\text{II.96})$$

II.1.10.2 Puissance absorbées par la nappe d'eau

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_W = I_D \times \alpha_{WD} + Id \times \alpha_{Wd} \quad (\text{II.97})$$

- α_{WD} : coefficient d'absorption de la saumure pour le rayonnement direct ;

- α_{Wd} : coefficient d'absorption de la saumure pour le rayonnement diffus :

$$\alpha_{WD} = \tau_D \times [\alpha_W + \tau_{RW} \times \alpha_b] \quad (\text{II.98})$$

- α_W : le coefficient d'absorption de la saumure (constant) ;

- α_b : le coefficient d'absorption de l'absorbeur, dépend de la nature de l'absorbeur (constant).

$$\tau_{RW} = \alpha_W - r_W \quad (\text{II.99})$$

- r_W : représente le coefficient de réflexion de la saumure :

$$r_W = r_{NW} + r_{PW} \quad (\text{II.100})$$

$$r_{NW} = \sin^2(\theta - i) / \sin^2(\theta + i) \quad (\text{II.101})$$

$$r_{PW} = \text{tg}^2(\theta - i) / \text{tg}^2(\theta + i) \quad (\text{II.102})$$

- θ : angle de réfraction calculé par la formule suivante :

$$\theta = \arcsin [(n_1/n_2) * \sin(i)] \quad (\text{II.103})$$

avec n_1 : indice de réfraction de l'air ($n_1 = 1$) ;

et n_2 : indice de réfraction de l'eau ($n_2 = 1.33$).

$$\tau_D = \tau_{RW} \times \tau_{aw} \quad (\text{II.104})$$

- τ_{aw} : coefficient de transmission du à l'absorption de l'eau :

$$\tau_{aw} = \exp [-K_{Gw} \times e_w / \cos \theta] \quad (\text{II.105})$$

K_{Gw} : coefficient d'extinction de l'eau [m^{-1}] ;

e_w : épaisseur (hauteur) de la saumure [m].

α_{Wd} : Le calcul du coefficient d'absorption de la saumure pour le rayonnement diffus varie par rapport à α_{WD} , cette variation est due à τ_{dw} .

$$\alpha_{wd} = \tau_g \times \alpha_w + \tau_g \times \tau_w \times \alpha_b \quad (\text{II.106})$$

τ_g : coefficient de transmission de la vitre ;

τ_w : coefficient de transmission de la nappe d'eau ;

α_w : coefficient d'absorption de la nappe d'eau ;

α_b : coefficient d'absorption de l'absorbeur ;

Les valeurs de τ_g , τ_w , α_w , α_b sont données en fonction des angles d'incidence (voir Tableau III. 4, chapitre III).

II.1.10.3 Puissance absorbée par l'absorbeur (P_b)

Elle est exprimée par la relation :

$$P_b = \alpha_b \times \frac{I_D \times T_{Db} + I_d \times T_{db}}{1 - (1 - \alpha_b) \times R_d} \quad (\text{II.107})$$

τ_{Db} : coefficient de transmission global du rayonnement direct

$$\tau_{Db} = \tau_r \times \tau_{ab} \quad (\text{II.108})$$

τ_r : coefficient de transmission du à la réflexion :

$$\tau_r = (1 - r_D) / (1 + r_D) \quad (\text{II.109})$$

$$r_D = [(n-1)/(n+1)]^2 \quad (\text{II.110})$$

τ_{ab} : coefficient de transmission du à l'absorption :

$$\tau_{ab} = \exp [-K_{Gb} \times e_b / \cos \theta] \quad (\text{II.111})$$

K_{Gb} : coefficient d'extinction qui dépend de la nature de l'absorbeur ;

e_b : épaisseur de l'absorbeur ;

τ_{db} : de la même manière, on calcule, pour le rayonnement diffus, le coefficient de transmission global:

$$\tau_{db} = \tau_r \times \tau_{ab} \quad (\text{II.112})$$

Avec n_1 : indice d'extraction de l'eau ; et n_2 : indice d'extraction de l'absorbeur.

II.2 Conversion du rayonnement solaire en énergie thermique

Pour étudier la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique 'Photothermique', il est judicieux d'explicitier les phénomènes physiques régissant lors de la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique et de l'énergie thermique à d'autres formes d'énergie. Dans ce contexte, le recours aux connaissances scientifiques de divers domaines de la physique telles que : la thermodynamique, l'optique, la transmission de la chaleur, la mécanique des fluides, l'automatique s'avèrent nécessaires. Nous présentons brièvement dans cette section un rappel de quelques notions fondamentales sur certains mécanismes prépondérants dans le cadre de cette conversion solaire en énergie thermique, en projection au cas de notre étude concernant la distillation thermo-solaire en vue de produire de l'eau potable à partir d'eau saumâtre.

II.2.1 Domaines d'application

La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique peut constituer un apport d'énergie non négligeable pour un grand nombre d'applications thermiques, thermomécaniques et thermochimiques à condition que des rendements de conversion élevés puissent être atteints dans une échelle de températures relativement étendue. Quatre catégories d'applications se dégagent, en fonction de la température :

- applications aux basses températures solaires ($T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}$) : chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des piscines, etc. ;
- applications aux moyennes températures solaires ($60 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 150 \text{ }^\circ\text{C}$) : distillation solaire ou dessalement de l'eau mer, chauffage des habitations, réfrigération, climatisation, production d'énergie mécanique, etc. ;
- applications aux hautes températures solaires : ($150 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$) : production d'énergie mécanique, production de vapeur, dissociation catalytique de l'eau, etc. ;
- applications aux très hautes températures solaires ($T > 800^\circ\text{C}$) : dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermoélectricité.

II.2.2 Les applications possibles de l'énergie solaire photo-thermique

Il est très commun d'utiliser l'énergie solaire pour le séchage des produits agricoles, la production de sels par évaporation et la culture en serres. Or, ce qui est envisageable avec la photo-thermique solaire est de trouver des applications à basse température telles que : le dessalement de l'eau, le chauffage de l'eau, la climatisation des habitations, la réfrigération solaire, etc. Ces réalisations répondraient à un grand nombre de besoins ne nécessitant pas une puissance énergétique élevée. Dans le domaine des températures relativement plus élevées, il est possible de développer des cuiseurs et fours solaires. Toutefois, ces techniques requièrent une assez forte concentration du rayonnement solaire.

II.2.2.1. Cas d'une distillation solaire

La distillation thermo-solaire utilise la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie thermique [117] pour produire de l'eau potable à partir d'eau saline.

Dans le cas des besoins modérés en eau douce, nous pouvons recourir à la distillation solaire directe. Elle présente de nombreux avantages : régions isolées, absence de main d'œuvre, interventions limitées, coûts. Le taux de recouvrement des installations de distillation est faible (5%), malgré la mise en place d'une stratégie de gestion d'eau douce dans les zones arides et isolées.

Le bac noirci, pourvu d'eau à distiller est recouvert par une surface transparente assurant la transmission du rayonnement solaire.

II.2.3. Les principaux phénomènes de conversion thermique

II.2.3.1 Transfert de chaleur et de masse

Parmi les principaux phénomènes intervenant dans la conversion thermique de l'énergie utilisant des systèmes solaires, le mécanisme de la transmission de la chaleur s'impose de façon bien appropriée pour modéliser et évaluer la nature et la quantité de l'énergie mises en jeu. Il est convenu que le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Le transfert de chaleur est le flux d'énergie d'un point à un autre en raison des différences de température entre les points, et il peut avoir lieu par conduction, convection ou rayonnement. Dans une installation solaire, de la chaleur est distribuée à partir de l'absorbeur à d'autres composants du système par le biais de l'un ou d'une combinaison de ces modes de transmission de transfert de chaleur dans les capteurs solaires où la couverture d'un distillateur solaire peut également conduire à une perte d'énergie et une réduction utile dans l'efficacité du système. Par conséquent, la conception, la construction, les essais et le fonctionnement des types d'échangeurs de chaleur nécessitent des connaissances sur les mécanismes de transmission de chaleur. Nous tenons à préciser que ces modes de transfert de chaleur peuvent se présenter en quatre régimes catégoriques :

Régime permanent : La température en tout point du milieu est indépendante du temps t .

Régime transitoire : Ce régime correspond à l'évolution du système d'un état permanent initial vers un autre état final permanent provoqué par un brusque changement.

Régime variable : Pour ce régime, l'intensité de ces sources évolue constamment et le champ de temps dépend des valeurs instantanées des sources mais aussi de l'évolution intérieure.

Régime sinusoïdale ou périodique : La température en tout point M effectue des oscillations périodiques indépendantes de la condition initiale et dont l'amplitude et la phase ne dépendent que des coordonnées d'espace.

Tableau II.8 : Le Processus de transfert de chaleur

Résumé des modes de transfert de chaleur		
Mode de transfert de chaleur	Échelle	Support
Conduction	Microscopique	Matière solide, gradient de température
Convection	Macroscopique	Matière libre (possibilité de mouvement, souvent un fluide), gradient de température
Rayonnement (radiation)	Microscopique	Aucun : peut se faire dans le vide ou la matière, quelle que soit la température (à partir de 0 K).

II.2.3.2 Transfert de chaleur par conduction

La conduction de la chaleur est le taux de transfert d'énergie entre deux points dans un milieu où l'énergie cinétique est transférée entre les particules ou groupes de particules [113]. Ce mode de transfert de chaleur peut avoir lieu dans les phases gazeuses, liquides et solides d'une substance. En outre, la chaleur est conduite dans le sens de la diminution de la température. Les températures en question peuvent varier (état transitoire) ou rester constante (état d'équilibre) avec le temps.

Pour le mode de transfert de chaleur par conduction effectué en régime transitoire et en trois dimensions, le flux de chaleur est basé sur la théorie proposée par Fourier [118] :

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha'} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.113})$$

∇^2 : Représente Le Laplacien

En coordonnées cartésiennes l'équation ci- dessus s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha'} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.114})$$

L'équation ci-dessus (II.114) peut également être exprimée en coordonnées cylindriques ou sphériques, en fonction de la géométrie du conducteur. Il est possible de résoudre cette équation analytique pour obtenir une distribution spatiale précise de la température à un instant donné. Néanmoins, certains modèles mathématiques impliquent des systèmes d'équations différentielles qui ne peuvent être résolus analytiquement. Dans de tels cas, les méthodes numériques peuvent être utilisées pour obtenir une solution approchée.

Pour une seule dimension, l'équation (II.114) se réduit à:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha'} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.115})$$

Le flux de chaleur en trois dimensions peut être donné par la relation suivante :

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (\text{II.116})$$

Où ∇T est le gradient de température (une quantité vectorielle).

Pour une seule dimension, le flux de chaleur peut être calculé à partir de :

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.117})$$

Il est noté qu'à partir de l'équation (II.118) le taux de transfert de chaleur augmente avec le coefficient de conduction thermique (k) et le gradient de température. Ainsi, les matériaux présentant des valeurs relativement élevées de k (tels que le cuivre, l'aluminium, l'acier inoxydable et l'acier galvanisé) sont appropriés pour la fabrication de plaques d'absorbeur solaire tandis que ceux avec de faibles valeurs de k (tels que le contreplaqué, le polystyrène, la sciure de bois et le liège) sont appropriés pour une isolation afin de réduire les pertes, à partir d'un système donné de la chaleur, vers l'environnement. De plus, k varie en fonction de la direction d'écoulement de la chaleur et de la température du conducteur [119]. Le taux de flux de chaleur (Q) à travers une plaque sans source de chaleur (Figure 2.22.) est exprimé par [113]:

$$Q = kA(\Delta T)/x$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (\text{II.118})$$

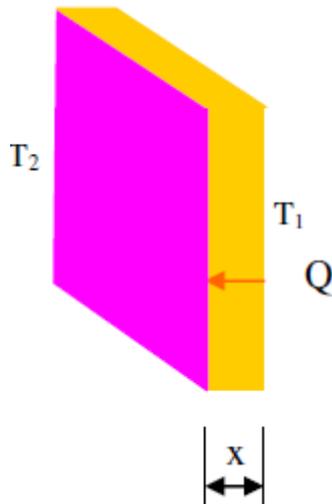


Figure II.22 : Transfert de chaleur par conduction monodimensionnel à travers une plaque à la température $T_1 > T_2$ [113].

II.2.3.3 Transfert de chaleur par convection

C'est la quantité d'énergie transférée entre deux points dans un fluide par le biais de deux mécanismes naturels ou forcés. Dans la convection naturelle, le fluide se déplace en raison du gradient de densité résultant des différences de température, par contre, la convection forcée se produit quand un fluide en mouvement absorbe la chaleur et la transporte à une distance au moyen mécanique externe tel qu'une pompe externe, un ventilateur, etc. A la limite de fluide-solide, la chaleur est transférée par conduction, par contre pour la convection, la chaleur peut être transférée à partir d'une surface solide chaude vers un fluide froid ou à partir d'un fluide chaud vers une surface froide comme pour le cas du distillateur solaire ou la quantité de transfert de chaleur transférée par convection naturelle entre la surface de l'eau de bassin et celle de la vitre qui est due au gradient de température, est exprimée par de nombreux travaux [120,121] :

$$q_{cw} = h_{cw}(T_w - T_g) \quad (\text{II.119})$$

Le coefficient d'échange de chaleur par convection naturelle est exprimé par la relation suivante :

$$h_{cw} = \frac{Nu \times K_f}{d_f} \quad (\text{II.120})$$

K_f : conductivité du fluide (vapeur d'eau) ;

d_f : hauteur caractéristique dans le cas du distillateur solaire est représentée par l'espace entre la surface de l'eau de bassin et celle de la couverture.

L'expression du nombre adimensionnel de Nusselt sera :

$$Nu = \frac{h_{cw} \times d_f}{K_f} = C(Gr \times Pr)^n \quad (\text{II.121})$$

Où : C et n sont des paramètres sans dimension.

Il convient de signaler que le nombre adimensionnel de Nusselt (Nu) représente le rapport entre le coefficient de transfert de chaleur par convection (h_{cw}) et le coefficient de transfert de chaleur par conduction (k_f / d_f) dans un fluide. Ce paramètre est calculé à partir du produit des nombres adimensionnels de Grashof (Gr) et Prandtl (Pr). Le nombre de Grashof représente le rapport de la poussée de la force à la viscosité d'un liquide tandis le nombre de Prandtl est un rapport entre la viscosité cinématique (ν) et la diffusivité thermique (α'). Ces deux paramètres sont également sans dimension, exprimés dans les relations suivantes [113,122] :

$$Pr = \frac{\mu_f \times C_f}{K_f} \quad (\text{II.122})$$

$$Gr = \frac{d_f^3 g \rho_f^2 \beta'}{\mu_f^2} \Delta T' \quad (\text{II.123})$$

$$\Delta T' = \left[\Delta T + \frac{(P_{w0} - P_{g0})(T_{w0} + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_{w0}} \right] \quad (\text{II.124})$$

Les équations (II.122) et (II.123) montrent que le produit ($Gr \times Pr$) est influencé par les propriétés du fluide, de la différence de température entre celle de la surface et du fluide et de la géométrie de la surface en contact avec le fluide. En conséquence, le coefficient de transfert de chaleur par convection est également affecté par les mêmes facteurs.

La convection naturelle peut être subdivisée en trois catégories, et qui dépend de la valeur du paramètre sans dimension (n) [113]:

a) pour la convection naturelle turbulente : $n = 1/3$;

b) pour la convection naturelle laminaire : $n = 1/4$.

c) une dernière catégorie avec $n < 1/4$: Quand un fluide sous convection forcée, une couche limite est créée entre le fluide et la surface (par exemple une surface plane) en contact avec le fluide figure (II.23). L'écoulement à l'intérieur de la couche limite au voisinage du bord d'attaque de la surface est une convection laminaire forcée. Comme l'écoulement se poursuit le long de la surface, il existe une augmentation de l'épaisseur de la couche limite à un niveau critique. Par la suite, la convection forcée mise en jeu est créée par un mouvement turbulent. Donc, la convection forcée peut être laminaire ou turbulente. La relation de Dunkle [123] dérive l'expression du coefficient d'échange de chaleur par convection pour le cas d'une convection naturelle turbulente dans un distillateur solaire avec $C = 0.075$ et $n = 1/3$.

$$h_{cw} = 0.884 \left[T_w - T_g \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (\text{II.125})$$

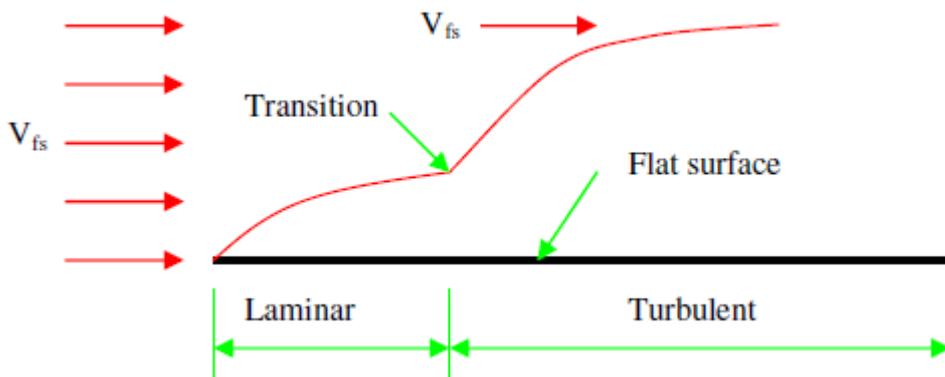


Figure II.23 : Formation des couches limites laminaires et turbulentes d'un fluide s'écoulant sur une surface plate.

II.2.3.4 Transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est le transfert d'énergie thermique par ondes électromagnétiques [119,126]. Ce mode de transfert de chaleur ne nécessite pas un milieu de propagation à l'égard des transferts de chaleur par conduction et par convection, son intensité correspond environ à un corps noir (CN) qui est considéré comme un corps récepteur du rayonnement solaire, ce dernier peut absorber la totalité du rayonnement solaire incident sur lui. Son pouvoir émissif (puissance émissive) vers une partie de sa surface normale ou hémisphérique est exprimé par de nombreux travaux [127], tel que:

$$E'_{CN} = \rho \times T^4 \quad (\text{II.126})$$

σ ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$) : constante de Stefan-Boltzman

Cette puissance émissive issue d'un rayonnement thermique possède un spectre continu dont la répartition de l'intensité est fonction de la longueur d'onde (λ) et de la température T (Loi sur l'irradiation de Max Planck) tel que :

$$E'_{CN,\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (\text{II.127})$$

Où : C_1 et C_2 sont les constantes de Planck tel que :

$$C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ (W m}^2\text{)} \text{ et } C_2 = 0.014388 \text{ (m. K)}$$

Puisque la surface réelle absorbe une partie de l'énergie du rayonnement qu'elle reçoit, donc, sa puissance d'émission à une surface hémisphérique devient:

$$E' = \varepsilon \cdot \rho \times (T_i^4 - T_j^4) \quad (\text{II.128})$$

$$E'_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot E'_{CN,\lambda} \quad (\text{II.129})$$

ε : Le coefficient d'émission (ou) l'émissivité du corps noir :

$$\varepsilon = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} E'_{CN,\lambda} d\lambda \quad (\text{II.130})$$

Si ε_{λ} est indépendant de λ , alors $\varepsilon = \varepsilon_{\lambda}$, on trouve que cette surface, possédant cette caractéristique, est connue comme un corps gris. Dans les calculs pratiques, les surfaces sont généralement supposées être grises en raison de l'absence d'informations sur la relation entre ε_{λ} et λ .

Il convient également de mentionner que l'énergie émise à partir d'une surface non noire se compose des éléments rayonnants et réfléchissants, et cette énergie peut quitter la surface spéculaire ou diffuse. Le rayonnement réfléchi suit une seule direction à partir d'un réflecteur spéculaire (miroir), mais il prend des directions différentes à partir d'un réflecteur diffus figure (II.24).

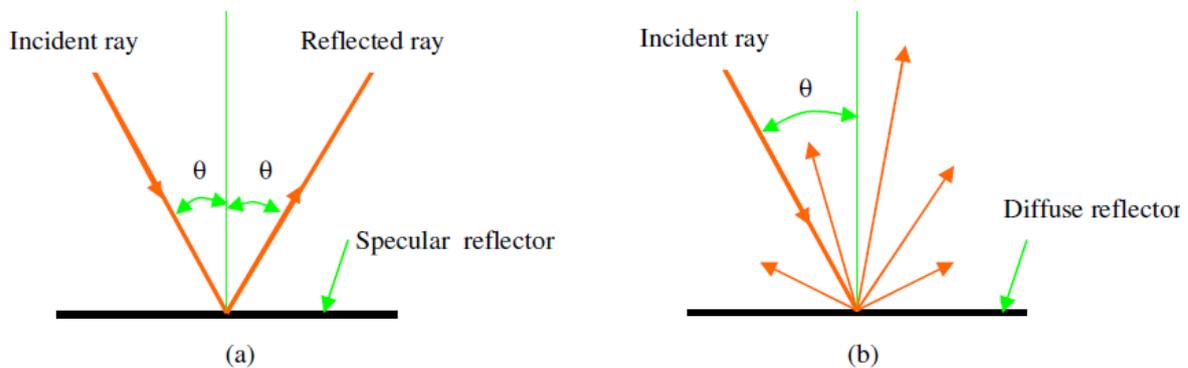


Figure II.24 : Le rayonnement réfléchi sur: (a) surface d'un réflecteur spéculaire ;(b) surface diffuse.

Si le rayonnement solaire sur la surface $S(i)$ est noté par G_{gp} , alors la quantité d'énergie solaire réfléchie de manière diffuse de la surface $S(i)$ à la surface $S(j)$ est exprimée par [102] :

$$G_{i-j} = W_{i-j} \rho_i G_{gp} \quad (\text{II.131})$$

L'équation (II.131) montre que la quantité de rayonnement solaire réfléchie vers un récepteur est influencée à la fois par la réflectance et par le facteur de vision des surfaces. Pour calculer la quantité d'énergie de rayonnement transférée entre deux surfaces [113], on doit tenir compte des hypothèses suivantes :

- a) les surfaces doivent être grises ou noires ;
- b) le rayonnement et la réflexion doivent être diffus ;
- c) $\alpha = \varepsilon$, et α , ne doivent pas dépendre de la température de la source des rayonnements incidents ;

d) les surfaces doivent être séparées par un milieu non-absorbant. Pour les deux surfaces données, le transfert de chaleur par rayonnement net est donné par la relation suivante [128] :

$$Q = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1-\varepsilon_i}{A_i\varepsilon_i} + \frac{1-\varepsilon_j}{A_j\varepsilon_j} + \frac{1}{A_iW_{i,j}}} \quad (\text{II.132})$$

Le transfert net de chaleur par rayonnement entre deux surfaces peut aussi être exprimé sous une forme linéaire, à travers la définition du coefficient de transfert de chaleur par rayonnement:

$$Q = A_i h_{r,i-j} (T_i - T_j) \quad (\text{II.133})$$

$$h_{r,i-j} = \frac{\sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \frac{A_i(1-\varepsilon_j)}{A_j\varepsilon_j} + \frac{1}{W_{i,j}}} \quad (\text{II.134})$$

Si les deux surfaces sont rectangulaires et parallèles entre elles, alors $W_{i-j} \approx 1$ et $A_i = A_j$. Par conséquent, l'équation (II.134) se réduit à:

$$h_{r,i-j} = \sigma \varepsilon_{i,j} (T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j) \quad (\text{II.135})$$

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \quad (\text{II.136})$$

II.2.3.5 L'échange de chaleur et le Rayonnement optique

II.2.3.5.1 Facteur de vision optique

Le facteur de vision optique influence l'échange de rayonnement entre deux surfaces données, et cela dépend de la géométrie des surfaces en question. Pour les surfaces isothermes et diffuses, le facteur de vision (W_{i-j}) est défini comme la proportion d'énergie quittant la surface $S(i)$ qui sera incidente sur la surface $S(j)$ [124]. En outre, l'énergie transmise par la

surface $S(i)$ peut atteindre d'autres surfaces qui l'entourent. Ainsi, en utilisant la loi de conservation de l'énergie, cela donne :

$$W_{i-i} + W_{i-2} + W_{i-3} + \dots + W_{i-j} = 1 \quad (\text{II.137})$$

Où : (2), (3), (4)...(j) sont les surfaces de l'entourage de S_i .

Si on prend $W_{i-i} > 0$, les mêmes types de surfaces considérées sont représentés sur la figure (2-24).

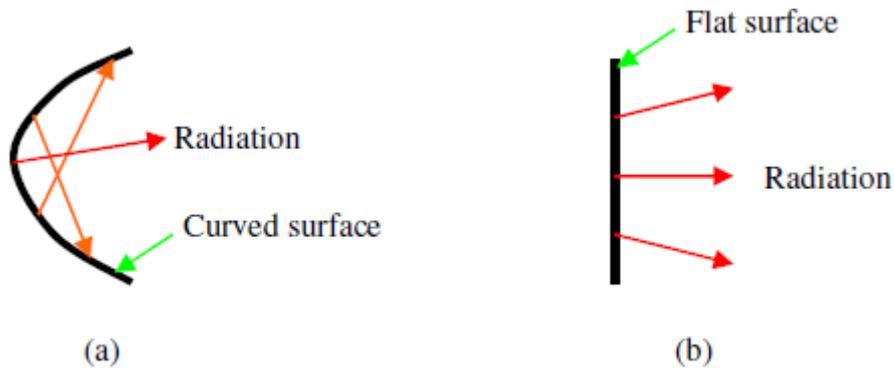


Figure II.25. a) l'échange par rayonnement sur une surface courbé b) sur une surface plate.

En plus, les relations suivantes sont également utiles pour le calcul de l'échange de rayonnement entre les surfaces [125]:

$$W_{1-(2,3)} = W_{1-2} + W_{1-3} \quad (\text{II.138})$$

$$W_{(2,3)-1} = (A_2 W_{2-1} + A_3 W_{3-1}) / (A_2 + A_3) \quad (\text{II.139})$$

$$A_1 W_{1-2} = A_2 W_{2-1} \quad (\text{II.140})$$

Il est à noter que la surface (1) affiche une combinaison de surfaces (2) et (3) dans l'équation (II.138) tandis que les surfaces (2) et (3) voient conjointement la surface (1) dans l'équation (II.139). L'équation (II.140) exprime la réciprocité des facteurs de vision, ce qui est particulièrement nécessaire pour le calcul de l'échange de rayonnement entre surfaces avec des zones finies et infinies. Cette équation est requise dans le calcul de l'échange de rayonnement entre un distillateur (capteur) solaire (avec une zone finie ' surface de la vitre') et le ciel (zone infinie).

II.2.3.6 Combinaison des modes de transfert de chaleur

Les trois modes de base de transfert de chaleur cités auparavant sont considérés consécutivement par conduction, par convection, et par rayonnement, mais en réalité ils sont liés convenablement où, à titre d'exemple, la conduction et le rayonnement sont généralement

conjugués dans le cas de solides non opaques comme le verre ou les matières plastiques. Le transfert thermique par conduction, convection et rayonnement peuvent coexister dans le cas des fluides.

II.2.3.7 Transfert de chaleur par changement de phase

En plus de l'échange de chaleur dans les corps qui est accompagné d'une variation de température, un changement de phase se produit souvent soit par vaporisation, soit par condensation. Ces cas se manifestent surtout dans le distillateur solaire, et d'autres cas sont cités dans la fusion, la congélation ou autres et l'ensemble constitue ainsi une source ou un puits de chaleur supplémentaire.

II.2.3.7.1 Transfert de chaleur lors de l'évaporation

Le phénomène de transfert de chaleur par évaporation au niveau, principalement, de la surface de l'eau de bassin d'un distillateur solaire s'accompagne généralement par la formation de la vapeur dans le liquide qui atteint une température supérieure à celle de la saturation du même liquide et à pression considérée. L'écart de température entre l'eau et l'air produit simultanément un transfert de chaleur appelé transfert de chaleur sensible et un transfert de masse accompagné d'un transfert de chaleur, appelé transfert de chaleur latente. Pour concrétiser ces échanges, on introduit les relations suivantes :

- **Transfert de chaleur sensible**

$$dq_s = h(T_w - T_0)dS \quad (\text{II.141})$$

- **Transfert de masse**

$$d\dot{m} = h_{cc}(C_w - C_0)dS \quad (\text{II.142})$$

$d\dot{m}$: Débit d'eau évaporée sur la surface du liquide (kg/s).

h_{cc} : Coefficient de transfert de masse, relatif à la concentration (m^2/s).

C_w . Concentration en vapeur d'eau (kg/s).

Comme la concentration est liée à la pression partielle (P_v), on a la relation suivante :

$$d\dot{m} = \frac{h_{cc}}{R_v T} (P_{sat}(T_w) - P_{v0})dS \quad (\text{II.143})$$

Ce transfert de masse s'accompagne d'un transfert de chaleur latente (dq_L) défini par la relation :

$$dq_L = L_v(T_w)dm = L_v(T_w) \frac{h_{cc}}{RT} (P_{sat}(T_w) - P_{v0}) dS \quad (\text{II.144})$$

La puissance totale échangée entre l'air et l'eau est donc :

$$dq_T = dq_s + dq_L \quad (\text{II.145})$$

$$dq_T = \left(h(T_w - T_0) + L_v(T_w) \frac{h_{cc}}{RT} (P_{sat}(T_w) - P_{v0}) \right) dS \quad (\text{II.146})$$

II.2.3.7.2 Transfert de chaleur lors de la condensation

Le passage d'une substance de l'état gazeux (vapeur) à l'état liquide est appelé condensation. Si une vapeur à l'état (P_w, T) vient en contact avec une paroi dont la température T_p est inférieure à la température de saturation $T_{sat}(P_w)$, une certaine masse de liquide se dépose sur la paroi froide en deux modes, soit en film ou en gouttes.

II.2.3.7.2.1 Condensation en gouttes

Si la tension superficielle du liquide est suffisante pour que le liquide ne mouille pas la paroi, il va y avoir une formation de gouttes qui vont grossir puis se détacher de la paroi, libérant celle-ci pour une nouvelle phase de condensation sans barrière thermique. L'intérêt majeur de la condensation en gouttes réside dans le fait qu'elle permet d'obtenir des coefficients de transfert élevés, de l'ordre de $100.000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, la condensation en goutte ne se produit qu'en présence d'une surface hydrophobe. Plusieurs méthodes sont utilisées dans ce but :

- Introduction dans la phase vapeur d'un produit organique hydrophobe.
- Dépôt sur la plaque de condensation d'un produit de même type sous forme liquide.
- Revêtement de la surface par un matériau hydrophobe solide caractérisé une bonne adhérence sur le support « métal ».

II.2.3.7.2.2 Condensation en film sur une paroi verticale (équation de Nusselt)

Le modèle théorique fondamental de ce processus a été établi par Nusselt, sur la base des hypothèses suivantes [129,130] :

- La vapeur est pure, au repos et saturée à la température de la saturation (T_{sat}) correspondant à la pression d'alimentation P_v de l'enceinte.

- La température (T_p) de la paroi est constante sur toute sa surface et le phénomène est permanent (les paramètres en chaque point sont indépendants du temps).
- Le film liquide s'écoule vers le bas sous l'effet de la force de la pesanteur et son épaisseur reste suffisamment faible pour que le régime d'écoulement dans le film soit laminaire.
- En se condensant, la vapeur libère sa chaleur latente de vaporisation et le liquide formé est refroidi à une température inférieure à (T_{sat}). La chaleur ainsi dégagée se transmet par conduction à travers le film.

Si le liquide mouille la surface de condensation, la condensation forme un film continu, pour que la condensation se poursuive, et il faut que la chaleur latente dégagée puisse se transmettre à la paroi froide à travers la pellicule liquide. Le paramètre gouvernant l'échange sera alors la conductivité thermique de ce film qui est faible, donc on a un coefficient de transfert de l'ordre de 1.000 à 10.000 W/m² °C.

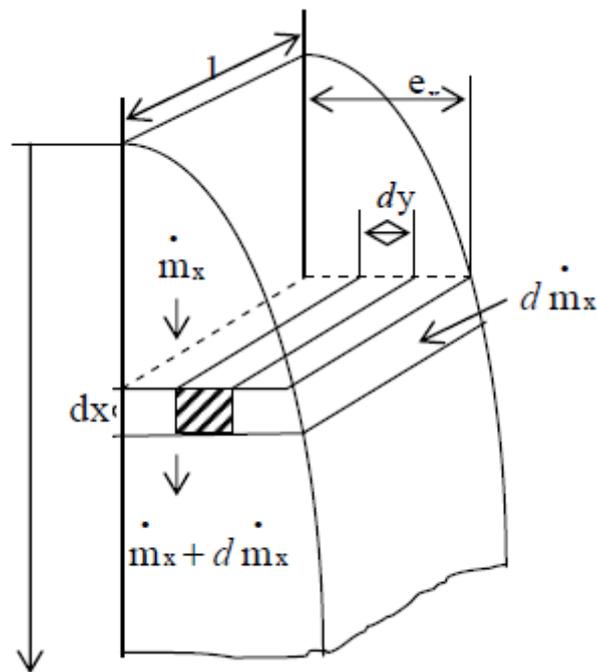


Figure II.26 : Croissance du film sur une paroi verticale.

Le volume ($L \times dx \times dy$) est en équilibre sous l'effet de la force de la pesanteur (diminuée de la poussée d'Archimède due à la vapeur) et des contraintes tangentielles de la viscosité. Selon l'axe, on a donc:

$$(\rho_l - \rho_v)gLdx dy + \left(\mu_l L dx \frac{dU}{dy} \right)_{y+dy} - \left(\mu_l L dx \frac{dU}{dy} \right)_y = 0 \quad (\text{II.147})$$

D'où :

$$\frac{d^2U}{dy^2} = -\frac{\rho_l - \rho_v}{\mu_l} g \quad (\text{II.148})$$

Les indices (*l*) et (*v*) se réfèrent respectivement aux phases liquides et vapeurs.

Compte tenu des conditions $dU/dy = 0$ pour $y = e_x$: la contrainte tangentielle est nulle au niveau de la surface du film, et $U = 0$ pour $y = 0$, on trouve le profil de la vitesse au niveau du film du condensat, donc le débit massique par unité de largeur de paroi est :

$$\dot{m}_x = g\rho_l \frac{(\rho_l - \rho_v)}{3\mu_l} e_x^3 \quad (\text{II.149})$$

La masse du condensat $d\dot{m}_x$, formée sur l'intervalle dx entraîne donc un accroissement de l'épaisseur du film de_x , tel que :

$$\frac{d\dot{m}_x}{dx} = g\rho_l \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\mu_l} e_x^2 \frac{de_x}{dx} \quad (\text{II.150})$$

Le dégagement de chaleur correspond à \dot{m}_x et est égal à :

$$dQ = L'_v d\dot{m}_x \quad (\text{II.151})$$

Avec

$$L'_v = L_v + 0.68 C_p (T_{sat} - T_p) \quad [132] \quad (\text{II.151})$$

L_v : désignant la chaleur latente de vaporisation de la vapeur (*kJ/kg*).

Cette quantité de chaleur se traduit intégralement sur la paroi, soit :

$$\frac{dQ}{dS} = \frac{\lambda_l}{e_x} (T_{sat} - T_p) = L'_v \frac{d\dot{m}_x}{dx} \quad (\text{II.152})$$

L'élimination de $d\dot{m}_x$ entre les relations (II.149) et (II.150) donne l'expression suivante, où l'épaisseur (e_x) est à l'abscisse (x) (pour une largeur égale à l'unité).

$$* e_x = \left(\frac{4\mu_l \lambda_l x (T_{sat} - T_p)}{g\rho_l (\rho_l - \rho_v) L'_v} \right)^{1/4} \quad (\text{II.153})$$

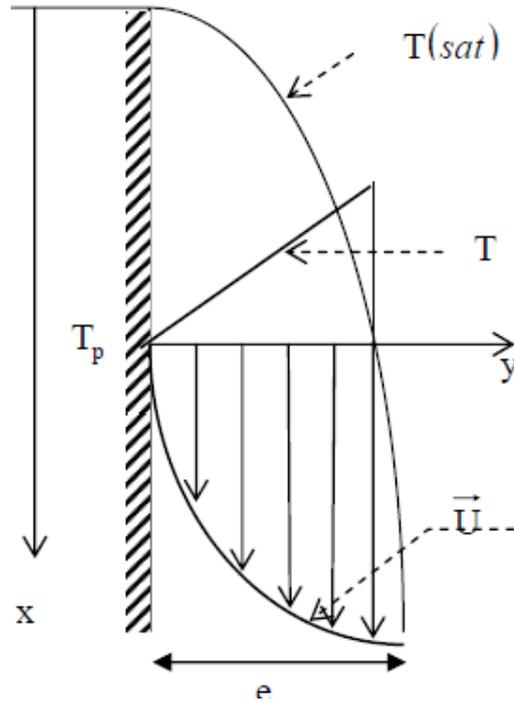


Figure II.27: Profils de vitesse et de température.

Le coefficient d'échange local est égal à :

$$h_x = \frac{\lambda_l}{e_x} = \left(\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) L_v \lambda_l^3}{4 \mu_l x (T_{sat} - T_p)} \right)^{1/4} \quad (\text{II.154})$$

On Remarque que le terme $0,68 C_p (T_{sat} - T_p)$ qui apparaît dans l'expression de L'_v correspond au refroidissement du condensat à une température inférieure à T_{sat} .

La valeur moyenne \bar{h} du coefficient d'échange pour une vapeur se condensant sur une paroi et possédant une hauteur H est égale à :

$$\bar{h} = 0.943 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) \lambda_l^3 L_v}{\mu_l (T_{sat} - T_p)} \frac{1}{H} \right]^{1/4} \quad (\text{II.155})$$

II.2.3.7.2.3 Cas d'une plaque plane inclinée d'un angle (β) par rapport à l'horizontale

En ce qui concerne la condensation sur une plaque plane inclinée d'un angle (β) par rapport à l'horizontal (applicable dans le cas d'une vitre à double pente pour un distillateur de type symétrique et à effet de serre, il suffit de remplacer la force de la pesanteur par sa composante suivant l'axe x (figure II.28).

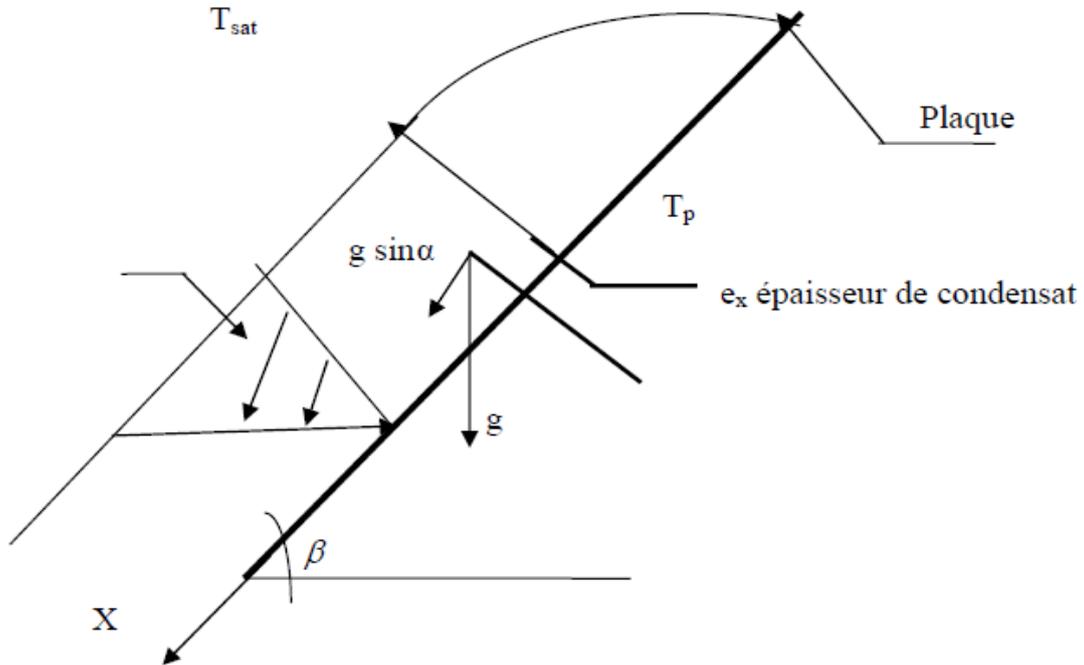


Figure II.28 : Condensation en film d'un fluide sur une paroi inclinée

Dans ce cas on aura :

$$U = \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\mu_l} g \sin(\beta) \left(e_x y - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad (\text{II.156})$$

Et

$$\dot{m}_x = \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)}{3\mu_l} g \sin(\beta) e_x^3 \quad (\text{II.157})$$

$$e_x = \left(\frac{4\mu_l x (T_{sat} - T_p)}{\rho_l(\rho_l - \rho_v) g \sin(\beta) L'_v} \right)^{1/4} \quad (\text{II.158})$$

$$h_x = \frac{\lambda_l}{e_x} = \left(\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v) g \sin(\beta) L'_v \lambda_l^3}{4\mu_l x (T_{sat} - T_p)} \right)^{1/4} \quad (\text{II.159})$$

L'air humide existe entre les deux composantes du distillateur, l'évaporateur (plaque noire) et le condenseur (la vitre). Le transfert de chaleur et de masse à l'intérieur du distillateur solaire à effet de serre est le produit de l'évaporation de l'eau saumâtre et de la condensation de la vapeur d'eau.

II.2.4 Résistance thermique

Par analogie entre l'énergie thermique et l'énergie électrique, le flux de chaleur est identique à celui d'un courant électrique. Dans le processus de transfert de chaleur, le flux

d'énergie thermique se déplaçant d'un point à une température supérieure à un autre point à température plus basse, rencontre des résistances à l'effet de conduction, de convection et par transferts radiatifs. Ces résistances considérées sont donnés par les relations suivantes [113] :

$$R_{cd} = \frac{x}{kA} \quad (\text{II.160})$$

$$R_c = \frac{1}{h_c A} \quad (\text{II.161})$$

$$R_r = \frac{1}{h_r A} \quad (\text{II.162})$$

A partir de l'équation (II.160), on peut déduire que la résistance par conduction (R_{cd}) augmente avec la diminution du coefficient d'échange de la chaleur par conduction « k » pour des valeurs données de l'épaisseur (x) et de la surface (A), ce qui est utile dans l'isolation thermique. Souvent, un matériau ayant une faible valeur de (k) est utilisé comme un isolant pour réduire la perte thermique à partir d'un système de chaleur. De même pour les résistances par convection et par rayonnement qui augmentent avec la diminution de leurs coefficients de transfert de chaleur correspondants pour une valeur tout à fait constante de la surface (A). Dans le cas de calcul de la résistance thermique due à un transfert de chaleur par évaporation (R_e), le coefficient d'échange de chaleur par convection « h_c » est remplacé par le coefficient d'échange de chaleur par évaporation (h_e) dans l'équation (II.161). La résistance effective pour un réseau thermique donné est trouvée en utilisant les lois analogues des résistances électriques connectées en séries ou en parallèles [113] :

-Pour les résistances en série :

$$R_{ef} = R_1 + R_2 + \dots + R_r \quad (\text{II.163})$$

-Pour les résistances en parallèles :

$$\frac{1}{R_{ef}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_r} \quad (\text{II.164})$$

Les équations (II.163) et (II.164) sont utiles dans l'analyse d'un système thermique réel avec de multiples résistances. Par exemple, pour un distillateur solaire à résistances composées. Par conséquent, ce système peut également être analysé en utilisant la méthode de la résistance.

II.2.5 Transfert de masse

Le transfert de masse se fait par diffusion moléculaire ou par convection. Dans la diffusion moléculaire, des molécules d'un fluide diffusent dans la matrice d'un autre fluide ou d'un solide [125] .

Par exemple, la vapeur d'eau qui est issue d'une surface d'eau peut se diffuser dans l'air environnant pour former un mélange binaire sur cette surface.

Le transfert de masse dans un mélange binaire est initié par un gradient de densité, dont il sera nul lorsque la diffusion s'arrête.

Pour un mélange binaire (des substances A et B, où la substance B est diluée), la diffusion moléculaire dans une dimension peut être décrite par la loi de Fick [113] :

$$\dot{m}' = \varphi_B V - D \varphi \frac{d(\varphi_B / v)}{dx} \quad (\text{II.165})$$

$$\varphi = \varphi_A + \varphi_B \quad (\text{II.166})$$

Pour un solide ou un fluide stagnant ($V = 0$) avec $\varphi_B \ll \varphi$, l'équation (II.143) peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\dot{m}' = -D \frac{d\varphi_B}{dx} \quad (\text{II.167})$$

La diffusivité de la masse de vapeur d'eau (D_v) dans l'air peut prendre la valeur de $2.55 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ à une température $T = 298 \text{ K}$ et une pression de l'ordre de $P = 101.325 \text{ N m}^{-2}$ comme elle peut également être calculée en fonction de la relation suivante [115] :

$$D_v = \frac{9.26 \times 10^{-10}}{P} \left(\frac{T^{2.5}}{T + 245} \right) \quad (\text{II.168})$$

II.2.6 Transfert de chaleur et de masse appliquée à un modèle de distillateur solaire, type conventionnel

Le rayonnement solaire qui franchit la couverture transparente en verre atteint l'eau saumâtre dans le bassin du distillateur solaire pour se résider au fond de la partie inférieure, peinte en noir, et avec l'apport de cette énergie, cette eau commence à chauffer puis et au fur et à mesure avec le temps sa température augmente jusqu'à la phase d'évaporation. Par le biais d'un transfert de chaleur et de masse, cette vapeur d'eau augmente et se condense lorsqu'elle est en contact avec la face intérieure de la vitre qui est au dessous du point de rosée. Par la suite le condensat formé sous forme d'eau courante est recueilli par un canal, équipé, le long des bords inférieurs de la couverture du distillateur.

La poursuite du processus de distillation solaire implique l'existence de tous les modes de transfert de chaleur figure (II.29). Un transfert de chaleur par conduction est crée à travers respectivement la couverture transparente en verre, le fond de bassin et les parois latérales, provoquant ainsi des pertes de chaleur. Cette perte de chaleur peut être diminuée en utilisant une couche d'isolation d'une épaisseur suffisante et avec laquelle on peut obtenir un coefficient d'échange de chaleur (k) relativement faible. La chaleur provenant du fond du bassin est bien transféré à l'eau saumâtre par convection tandis que l'énergie thermique de l'eau chaude est transférée par vaporisation, par convection et par rayonnement, vers la couverture de condensation, ainsi la vapeur d'eau se condense sur la couverture conduisant à l'obtention de la chaleur latente de condensation et de l'eau distillée.

A son tour, la couverture transparente dissipe la chaleur dans l'environnement par un transfert de chaleur par convection et par rayonnement. Il convient de noter que le transfert de chaleur interne du distillateur solaire contient aussi le transfert de masse. Par conséquent, des corrélations spéciales sont utilisées pour estimer les coefficients de transfert de chaleur par convection et par évaporation de l'eau chauffée au niveau de la surface de la couverture transparente. On signale qu'un réseau de résistances destiné à un système de distillation solaire de type conventionnel est représenté dans la figure (II.30).

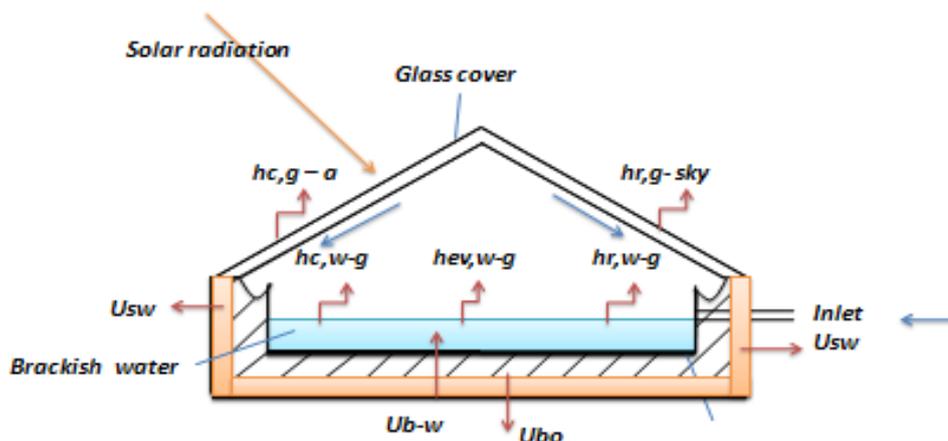


Figure II.29 : Modes de transfert de chaleur dans un distillateur solaire de type conventionnel

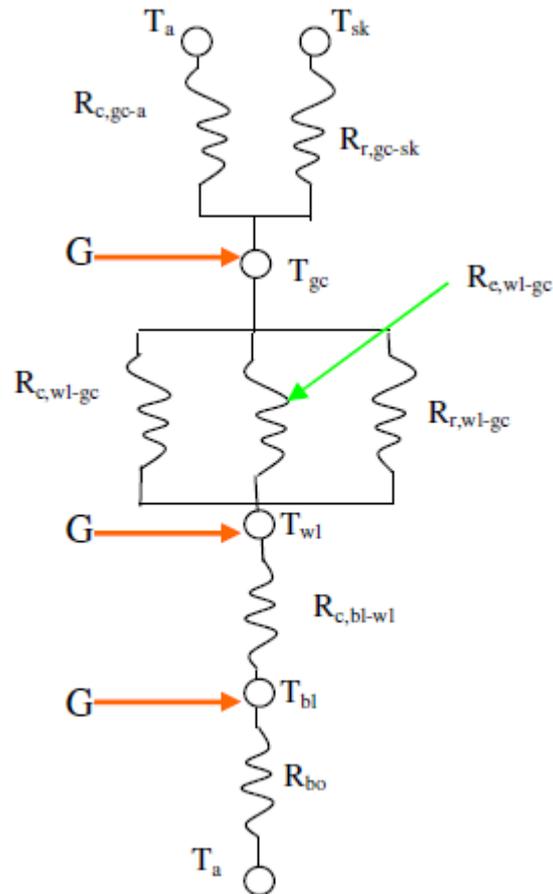


Figure II.30 : Schéma du réseau de résistance thermique correspondant aux modes de transfert de chaleur d'un distillateur solaire de type conventionnel

A travers certains travaux théoriques ou expérimentaux effectués sur la distillation solaire, on trouve que les transferts de chaleur et de masse constituent leur première préoccupation.

Dunkle [123] a proposé la première corrélation du transfert de chaleur et de masse à l'intérieur d'un distillateur solaire, avec $C = 0,075$ et $n = 1/3$, pris dans l'équation (II.169). Certaines limitations de cette corrélation ont été rapportées dans la littérature.

$$h_c = C \frac{k}{d} \left(\frac{d^3 \rho^2 \beta' g \Delta T}{\mu^2} \right)^n \left(\frac{\mu C_p}{k} \right)^n \quad (\text{II.169})$$

d : est la hauteur caractéristique pour un distillateur qui est l'équivalence de l'espace entre l'eau de bassin et la vitre et (ρ): la densité (kg. m^{-3}).

Pour une convection forcée, le coefficient d'échange de chaleur par convection est obtenu à partir de la relation suivante :

$$h_c = C \frac{k}{d} \left(\frac{dm'}{\mu} \right)^e \left(\frac{\mu C_p}{k} \right)^n \quad (\text{II.170})$$

L'équation (2.172) indique que le coefficient d'échange de chaleur par convection naturel est indépendant de la hauteur caractéristique (S) lorsque $n = 1/3$. Pour la convection forcée, h_c est indépendant de la géométrie de la cavité lorsque l'exposant $e = 1$ dans l'équation (II.170). De même, il a été observé que la corrélation précédente est appropriée pour un transfert de chaleur élevé à travers un espace d'air horizontal [132,133]. Un modèle alternatif développé pour l'estimation du transfert de la chaleur et de la masse dans un bassin d'un distillateur solaire, où il a été constaté qu'il y avait une bonne concordance entre les valeurs théoriques et celles issues de l'expérience [134]. Clark [135] a fait remarquer que la corrélation de Dunkle a surestimé le coefficient de transfert de chaleur par évaporation à des températures supérieures à 328 K, il a donc formulé un modèle approprié pour le calcul des coefficients de transfert de chaleur par convection et par évaporation d'un distillateur solaire fonctionnant à des températures moyennes supérieures à 328 K.

En 1996, Kumar et Tiwari [133] ont rapporté que la corrélation précédente ne tient pas compte du volume d'air se trouvant dans l'espace entre l'eau de bassin et la couverture de la condensation. Donc, ils ont inclus dans leur modèle, la hauteur moyenne de l'espace d'air entre la surface de l'eau saumâtre et la couverture, et ont constaté que $C = 0,0322$ et $n = 0,4114$ pour un distillateur solaire passif et $C = 0,0538$ et $n = 0,383$ pour un distillateur solaire actif.

L'influence des propriétés thermophysiques du mélange d'humidité et de l'air sec dans le calcul des coefficients de transfert de chaleur et de masse dans les distillateurs solaires, a montré que la précision de la modélisation du transfert de chaleur et de masse dans le distillateur solaire est améliorée lorsque les propriétés thermophysiques du mélange binaire sont utilisées à la place des propriétés thermophysiques de l'air sec [136]. Récemment, Tsilingiris [120] a formulé des équations générales pour le calcul des coefficients de transfert de chaleur par convection naturelle et par évaporation à partir de la surface de l'eau chauffée vers la couverture de condensation:

$$h_{c,w-cs} = C k_a d^{3n-1} \left(\frac{g \rho_a \beta'_a}{\mu_a \alpha'_a} \right)^n \left[(T_w - T_{cs}) + \frac{T_w (P_w - P_{cs}) (M_a - M_v)}{M_a P_{to} - P_w (M_a - M_v)} \right]^n \quad (\text{II.171})$$

$$h_{e,W-CS} = \frac{1000L'_W h_{c,W-CS} R_{ai}}{C_{p,a} R_v} \frac{P_{to}}{(P_{to} - P_w)(P_{to} - P_{cs})} \quad (\text{II.172})$$

En utilisant les propriétés thermophysiques d'un mélange binaire dans cette étude, Tsilingiris [120] a trouvé que $C = 1/3$ et $n = 0.075$, et la valeur de C peut être utilisée dans une large gamme de températures de fonctionnement d'un distillateur solaire, par contre n est destiné pour un taux de distillation inférieur à $1 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, une valeur de $n = 0,05$ a été trouvée correspondre à une production du taux de distillat plus élevé. En outre, le même chercheur a valorisé ses résultats par une bonne concordance entre le taux de production du distillat issu successivement de l'expérimental.

La perte de chaleur par la face extérieure de la vitre vers l'environnement est principalement dominée par les transferts de chaleur par convection à l'air ambiant et par rayonnement vers le ciel. La vitesse du vent influe sur le transfert de chaleur par convection de la partie supérieure de la couverture et où le coefficient de transfert de chaleur du à la vitesse du vent peut être calculé à partir de la relation suivante [137] :

$$h_{c,gc-a} = \begin{cases} 2.8 + 3V_{wd}, V_{wd} \leq 5 \text{ms}^{-1} \\ 6.15V_{wd}^{0.8}, V_{wd} > 5 \text{ms}^{-1} \end{cases} \quad (\text{II.173})$$

L'équation (II.133) est couramment utilisée pour calculer le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement à l'intérieur du distillateur solaire, et la perte de chaleur par rayonnement par le haut du distillateur solaire peut être référencée dans le ciel et calculée à partir de l'équation ci-dessous:

$$h_{r,gc-sk} = \sigma \epsilon_{gc} (T_{gc}^2 + T_{sk}^2)(T_{gc} + T_{sk}) \quad (\text{II.174})$$

La température du ciel est calculée à partir de la relation suivante [138] :

$$T_{sk} = 0.0552T_a^{1.5} \quad (\text{II.175})$$

La chaleur est également perdue à partir de la partie inférieure du distillateur solaire. Le coefficient de perte de chaleur du fond du bassin peut être calculé à partir de la relation suivante [112] :

$$U_{bo} = k/x \quad (\text{II.176})$$

Le rendement en distillat (Y) dans un intervalle de temps de (t₂-t₁) peut être calculé comme suit :

$$Y = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{h_{e,w-sc} (T_w - T_{sc})}{L'_w} \right] dt \quad (\text{II.177})$$

La chaleur latente de vaporisation de l'eau (L') peut être calculée en utilisant une certaine corrélation [139] , tandis que la pression de vapeur de saturation (P) peut être calculée selon une certaine norme [113] et la pression totale peut être considérée comme étant approximativement égale à la pression atmosphérique normale [120] .

Chapitre III : Etude et Modélisation des systèmes proposés

Introduction

Un modèle a pour rôle de décrire une réalité complexe de manière simple et compréhensible.

Cette partie présente l'étude et l'analyse et les modélisations thermiques des deux distillateurs solaires de type symétrique et asymétrique à effet de serre.

La démarche adoptée ici, consiste à découpler les phénomènes thermiques complexes interdépendants, existant au niveau de chaque composant, afin de simplifier leur analyse. A cet effet, nous avons adopté les étapes suivantes :

Dans un premier temps, une synthèse de cette démarche a abouti à la conception de chacun des deux modèles proposés à l'étude ainsi qu'une description de leurs caractéristiques physiques et optiques a été réalisée.

Dans une autre étape, une analyse détaillée de chacun des phénomènes thermiques des deux unités de distillation solaire a été faite, où dans ce cas, l'accent est mis sur les paramètres influant sur le fonctionnement des deux systèmes, à savoir les paramètres externes et internes. A partir de là, nous avons mis en évidence les bilans énergétiques pour chacun des composants et chacun des modèles.

Enfin, le principe de fonctionnement de chaque modèle de distillateurs est dicté selon des hypothèses explicites conduisant à élaborer des systèmes d'équations différentielles pour chacun des deux systèmes, en introduisant la méthode de résolution et le principe de la programmation.

III. 1. Conception et description des modèles proposés à l'étude

III. 1. 1 Présentation des deux modèles proposés à l'étude

Les figures (III.1) et (III.2) représentent les deux distillateurs solaires proposés à l'étude: distillateur solaire symétrique à double pente et distillateur asymétrique à double effet. Ces deux distillateurs solaires sont mis en place dans les mêmes conditions climatiques. Une simulation numérique a été développée pour comparer l'effet des différentes orientations et des paramètres de conception sur la performance de ces distillateurs solaires. Les deux distillateurs sont implantés avec des orientations vers respectivement le sud-nord et l'est-ouest, en tenant compte des inclinaisons de la couverture, prises dans cette étude. Pour une latitude nord et pour des lieux ayant une plus grande latitude, la couverture du distillateur solaire ayant une pente est orientée vers le sud. Mais pour le distillateur solaire avec une

couverture à double pente, une seule face de la couverture recevra les rayons solaires venant du sud, tandis que l'autre face elle sera du côté de l'ombre des rayons solaires.

III. 1.2 Concept géométrique et principes de fonctionnement.

III. 1. 2.1 Distillateur solaire type symétrique à double pente (à deux faces).

Le premier modèle représenté par la figure (III.1) est un distillateur solaire de type conventionnel, doté d'un seul bassin, symétrique au milieu et recouvert d'une vitre à deux versants (deux faces) et ayant une épaisseur de 0.003 m. La hauteur des côtés (parois) verticaux du distillateur solaire est de 0,15 m pour des angles d'inclinaisons de la couverture de condensation : du plus petit à 10 °, au moyen à 30 ° et au plus grand à 45 °. Le fonctionnement de ce type de distillateur reste très simple. La couverture en verre transparent permet de transmettre le rayonnement solaire à l'eau de bassin qui s'échauffe, puis s'évapore ensuite se condense sur les deux faces intérieures de la vitre formant des gouttelettes, formant un film d'eau qui s'écoule pour enfin être recueilli et collectés au niveau des deux extrémités de la vitre.

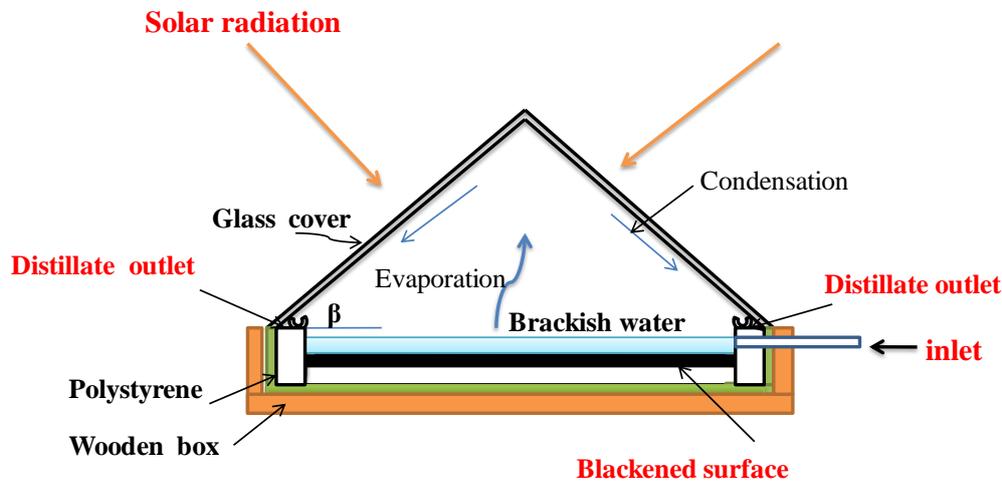


Figure III.1 : Schéma d'un distillateur solaire de type symétrique et à effet de serre.

III. 1.2.2 Distillateur solaire type asymétrique à double effet (une seule pente : une seule face).

Le second modèle est un distillateur solaire de type asymétrique figure (III. 2), avec une seule face et se compose de deux bassins étagés (à double effet), possédant une vitre (couverture intermédiaire) qui sert comme toit du bassin principal (1er effet) et en même temps comme base du deuxième bassin (second effet), la température de cette vitre est réduite par un film d'eau de refroidissement s'écoulant continuellement sur le verre. Cette disposition présente l'avantage d'augmenter la différence de température entre l'eau de bassin (premier effet) et la vitre et utilise la chaleur latente dans la vapeur d'eau de condensation sur la vitre du premier effet (bassin) afin de produire plus d'eau fraîche dans le second effet [55,140 ,141]. Cependant la couverture supérieure de ce type de distillateur solaire à double effet à la même épaisseur de 0.003 m, est en contact avec l'environnement et sert comme toit au deuxième bassin. La hauteur des côtés (parois) verticaux au plus bas de ce type de distillateur solaire est prise à 0,25 m pour les angles d'inclinaison (10 °, 30 ° et 45 °), tandis que les hauteurs des

côtés hauts sont prises de l'ordre de respectivement 0,43, 0,83, et 1,25 m. La profondeur du film d'eau longeant la couverture intermédiaire est de 0,005 m.

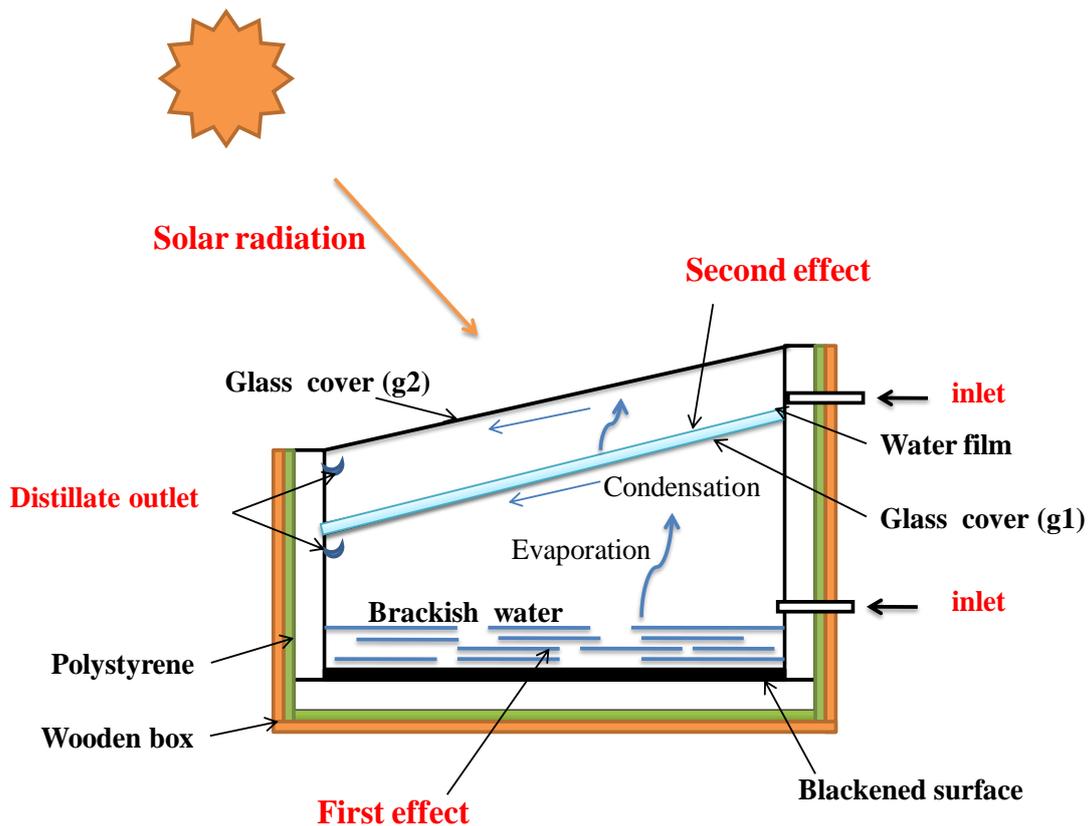


Figure III. 2 : Schéma du distillateur solaire type asymétrique à double effet

III. 1.3 A la découverte des mêmes composants :

Dans notre étude, nous avons pris deux distillateurs solaires de conception différente : symétrique et asymétrique à effet de serre Figures (III.1) et (III.2), mais les matériaux de construction utilisés concernant les différents éléments sont de même nature, dont la structure des deux types de distillateurs solaires est choisie est en aluminium, en raison de son coût relativement faible, de sa bonne résistance à la corrosion à des températures faibles et

moyennes et de son léger poids. Les bassins des distillateurs solaires sont enveloppés par une boîte en bois et isolés avec du polystyrène ayant une épaisseur de 100 mm, de manière à réduire, au niveau inférieur, les pertes de chaleur vers l'extérieur. En plus, les bases de ces distillateurs solaires sont peintes au niveau de leurs surfaces intérieures en noir, permettant ainsi d'absorber un maximum de rayonnement solaire. L'aire de surface prévue pour chaque unité de distillation solaire est de 1 m^2 (dimensions intérieures de la base de 1m x 1m). De plus, la plus grande partie du rayonnement solaire absorbée par les différents composants du distillateur solaire est utilisée pour augmenter leur température, entraînant ainsi une augmentation de leur production ; ces mêmes distillateurs solaires sont conçus de manière à récupérer, au fond du bassin, le maximum de rayonnement solaire permettant de produire plus d'énergie thermique. Enfin et afin de nous permettre de comprendre en détail ces concepts ainsi que les principaux paramètres intervenant dans cette présente étude, nous devons passer en revue les différentes caractéristiques des systèmes de distillation solaire.

III. 2 Paramètres influant sur le système de distillation solaire

Les paramètres agissant sur le système de distillation solaire se présentent en deux catégories [89,142]:

- Les Paramètres externes
- Les Paramètres Internes

III. 2. 1 Les Paramètres externes

Ces paramètres sont liés au site d'implantation du distillateur solaire et qui influent sur le fonctionnement et sur le rendement du système. Parmi les plus cités de ces paramètres on trouve :

III. 2. 1. 1. Les paramètres géographiques

De tout point de vue, la sphère terrestre est repérée par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres [96], à savoir :

- La latitude φ : positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud.
- La longitude L : Elle est comptée positivement à l'ouest et négativement à l'est et ce en fonction du méridien d'origine, appelé méridien de Greenwich.
- Hauteur du soleil.

III. 2. 1. 2 Paramètres météorologiques (climatiques): Les conditions météorologiques régnautes sont dues à l'ensoleillement et au changement climatique qui sont entre autres :

- **Intensité du rayonnement solaire** (Rayonnement solaire incident) :

Le facteur essentiel est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0,17 à 4 μm). Le maximum d'intensité est obtenu pour une longueur d'onde 0,47 μm dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est une constante et est égale à 1,35 kW/m². Cependant, l'énergie arrivant au voisinage de la surface terrestre est affaiblie par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère. Le coefficient de transmission est constant durant l'année et se situe entre 0,7 et 0,9. Il est d'autant meilleur lorsque l'épaisseur de l'atmosphère est plus faible.

- **Vitesse du vent**

L'existence des hautes et basses pressions est à l'origine du vent. Ce vent est caractérisé par sa direction et la vitesse de sa composante horizontale, dont elle joue un rôle important sur le fonctionnement du système (l'effet convectif sur la face externe de la vitre et de la plaque du condenseur).

- **La Température de l'air ambiant**

La valeur de cette température intervient pour la détermination des échanges thermiques entre la partie interne du distillateur et le milieu extérieur.

- **Autres facteurs météorologiques**

- La position du soleil et la conception immobile solaire.
- L'éclairement énergétique du au rayonnement global.
- L'intermittence des nuages.
- La durée d'insolation.
- La température sèche.
- L'humidité de l'air et la pluviométrie doivent être prises en considération dans la mesure où ces deux facteurs arrivent à modifier le bilan thermique du distillateur.

III. 2. 1. 3 Nature de l'eau à traiter suivant ses caractéristiques et sa disponibilité dans le site.

III. 2. 2 Les Paramètres Internes

Ce sont des paramètres liés à l'unité de la distillation solaire et relatifs aux catégories suivantes:

III. 2. 2. 1 Paramètres de position:

Les plus importants de ces paramètres sont :

- L'emplacement du distillateur.
- L'orientation vis-à-vis du rayonnement solaire.
- L'inclinaison de la couverture.

La liaison existante entre l'orientation et l'angle d'inclinaison de la vitre d'un distillateur solaire conduit à une meilleure optimisation de son rendement [143], mais aussi la meilleure orientation possible à l'est –ouest ou au sud –nord dicte l'emplacement du distillateur solaire vis-à-vis de sa conception, soit à une seule face ou à double faces, augmente ainsi sa production à travers une excellente réception du rayonnement solaire.

III. 2. 2. 2 Paramètres de conception

Les paramètres de conception que partagent les distillateurs solaires se distinguent comme suit :

- La couverture (nature du matériau, inclinaison)
- La distance entre l'eau saumâtre et la vitre
- L'eau saumâtre (épaisseur de l'eau, caractéristiques de l'eau : la concentration du sel).
- L'absorbeur (les plaques: nature du matériau).
- L'isolant (nature de l'isolant).
- **La couverture :**

Elle est représentée par le capteur d'un distillateur solaire, qui est nommée aussi la partie froide du distillateur, et est constituée par des vitres transparentes simples ou parfois doubles mises en pente, à travers lesquelles le rayonnement solaire peut pénétrer sans obstacles. La couverture est subordonnée à un certain nombre de propriétés telles que sa résistance, sa transparence au rayonnement solaire, sa mouillabilité par l'eau et son étanchéité.

- **La distance (le vide) entre la surface d'évaporation et la surface de condensation**

Les phénomènes d'évaporation et de condensation s'accroissent avec la réduction de l'espace séparant la vitre de la masse de l'eau se trouvant dans le bassin, impliquant une augmentation de la performance du distillateur solaire [144]. D'autres thèses fixent les transferts de chaleur et de masse dans un distillateur solaire à effet de serre au niveau de la couche mince adjacente au niveau respectivement de la surface d'évaporation et de condensation ; cette couche est prise de l'ordre de 15mm. Tout le reste est constitué d'une couche appelée couche « tampon », qui est une couche ayant une température constante et ne participant pas aux différents transferts de chaleur et de masse. Par contre, une augmentation

de la hauteur du vide « espace » engendre une augmentation de l'épaisseur de la couche tampon et qui tend à s'opposer aux différents échanges entre la surface de condensation et la surface d'évaporation.

- **La masse d'eau à distiller (l'eau saumâtre)**

Étant donné que le bassin de tel distillateur est conçu pour recevoir la masse d'eau saumâtre à distiller, et comme elle constitue la matière première de tout le système, d'où toute variation de sa longueur caractéristique (profondeur) a une conséquence directe sur la production du distillateur solaire. Des chercheurs sont arrivés à prouver que lors d'une augmentation de la profondeur de l'eau le coefficient de transfert thermique interne par convection se trouve diminué, en raison de la diminution de la température de l'eau [145]. Ainsi, la température fluctue selon l'intensité du rayonnement solaire et la production est d'autant plus importante lorsque l'épaisseur de l'eau saumâtre est faible. Néanmoins, dans une autre lecture faite, d'autres chercheurs, ont constaté que plus l'épaisseur de l'eau saumâtre est plus grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil, d'où le stockage de l'énergie est pratiquement assuré [145 – 148].

- **L'absorbeur (La plaque absorbante)**

L'absorbeur est représenté par la base du distillateur solaire, c'est une plaque constituant l'ossature principale du distillateur solaire en liaison avec les autres éléments. La partie du fond du bassin est teintée avec une couleur noire afin d'absorber un maximum de rayonnement solaire. Différents matériaux peuvent être utilisés tels que : le béton, l'acier galvanisé, l'aluminium, les matières synthétiques, le bois, etc., dont leur choix est lié à leurs propriétés physiques et chimiques notamment la conductivité, l'inertie thermique, la corrosion sans oublier leur coût.

- **L'isolant**

L'isolant est pratiquement utilisé à la base sur laquelle le distillateur solaire repose; il recouvre parfois les parois du distillateur, c'est un paramètre important pour le calorifugeage de l'appareil, constitué de matière synthétique ou plastique (polyéthylène), parfois de bois.

Un bon isolant conserve la chaleur et minimise les pertes vers l'extérieur, favorisant ainsi l'augmentation de la production du distillateur solaire.

III. 2.2.3 Les paramètres optiques et Les paramètres thermo physiques

Tous les éléments constituant un distillateur solaire sont caractérisés par des propriétés physiques qui s'associent avec les paramètres extérieurs et réagissent bien avec les phénomènes thermiques à l'intérieur de l'unité de distillation, les plus cités de ces propriétés sont : Les paramètres optiques et les paramètres thermo physiques qui font partie des paramètres internes d'un distillateur [102, 149] et qui influent sur son rendement [150].

III. 2.2.3.1. Les paramètres optiques

On s'intéresse au comportement des surfaces du distillateur solaire par rapport aux rayonnements solaires, ce sont les paramètres optiques telles que : l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmissivité.

- **L'émissivité :**

Un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission.

- **L'absorptivité**

Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé.

- **Réflexion et diffusion**

Le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi au lieu d'être absorbé. Il existe deux cas :

- Le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique (un angle d'incidence, un angle de réflexion). Il s'agit alors de réflexion.
- Le renvoi se fait dans toutes les directions (même si l'on a une seule direction incidente). On parle alors de diffusion.

- **Transmissivité (transparence et opacité) :**

Un milieu peut transmettre intégralement l'onde incidente, il est alors appelé milieu transparent. Le vide est un exemple de milieu transparent. En première approximation, le

verre est aussi un milieu transparent pour des longueurs d'ondes dans le domaine du visible. Inversement, un corps ne transmettant aucune partie du rayonnement incident est dit corps opaque.

III. 2.2.3.2 Paramètres thermo-physiques

Les paramètres thermo physiques sont représentés par les propriétés qui sont liées aux différents éléments du distillateur solaire, on trouve :

- **Au niveau de la couverture et la surface absorbante :**

La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique.

- **Au niveau de la saumure :**

La conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique (avec plus de détail voir Annexe (3)).

- **Au niveau du mélange air – vapeur**

Ce sont la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique (avec plus de détail voir Annexe (3)).

- **Au niveau de la plaque absorbante et de l'isolant**

Les plus importantes des propriétés physiques concernant certains matériaux qui constituent la structure des distillateurs solaires enveloppés par des matériaux, aussi nécessaires pour la protection et la conservation de l'énergie, sont portées dans les tableaux ci – dessous :

Tableau III. 1 : Caractéristiques thermo physiques de matériaux métalliques constituant la plaque absorbante au niveau des distillateurs solaires à effet de serre [96].

Matériau	Conductivité Thermique λ (W/m K)	Chaleur massique C_p (J/kg K)	Masse volumique ρ (kg/m³)
Aluminium	204	896	2707
Acier inoxydable	14	460	7800
Cuivre	384	398	8900

Tableau III. 2 : Caractéristiques thermo physiques de certains matériaux locaux pouvant être utilisés comme isolant parfait au niveau des distillateurs solaires à effet de serre.

Matériau	Conductivité Thermique λ (W/m K)	Chaleur massique C_p (J/kg K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
Polystyrene	0.04	1500	20
Polyurethane	0.029	1600	30
Laine de verre	0.036	840	40

Tableau III. 3 : Caractéristiques thermo physiques de certains matériaux locaux pouvant être utilisés comme couvertures transparentes habituelles au niveau des distillateurs solaires à effet de serre.

Matériau	Conductivité Thermique λ (W/m.K)	Chaleur massique C_p (J/kg. K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
Verre à vitre	0.93	840	2700
Polycarbonate	0.20	1260	1200
Poly méthacrylate (Plexiglas)	0.20	1460	1200

III. 2.2.4. Les phénomènes physiques intervenant dans le distillateur

- **Capillarité :**

La capillarité intervient avec l'utilisation de film d'eau. Une bonne mouillabilité des plaques est importante pour éviter la création de zones sèches et pour une utilisation optimale des surfaces évaporatrices. La capillarité est suffisante pour assurer un débit liquide et une dispersion rapide de l'eau d'alimentation, permettant au tissu d'adhérer à la paroi sur toute la surface.

Les températures des films liquides sont égales à la température de la paroi métallique au contact des films. L'auto-maintenance du tissu sur la plaque évaporatrice et l'absence d'air au niveau de l'interface sont des avantages du film capillaire. Tout en étant saturé, le tissu présente une épaisseur d'eau moins grande, donc une plus faible inertie thermique à l'évaporation. Lorsque le tissu sèche par défaut d'alimentation, il reste généralement collé à la paroi par les sels précipités. Lorsqu'on alimente à nouveau le distillateur, le film capillaire se

reformé. Cette réversibilité est précieuse car elle dispense de démonter l'appareil à chaque nouveau démarrage.

D'autre part le risque d'apparition de zones sèches est minimisé pour les raisons suivantes :

1. dispersion rapide de l'eau d'alimentation grâce au film capillaire ;
2. diffusion de l'eau des zones moins salées vers les zones plus salées sous l'effet du gradient de concentration.

▪ **Le phénomène d'effet de serre :**

C'est la méthode la plus anciennement utilisée pour retenir les calories apportées par le soleil sur un corps. Une surface réceptrice reçoit en absorption et réflexion, les rayons du soleil à travers un ou plusieurs vitrages de faible épaisseur. Dans le cas d'une seule vitre, cette surface est peinte de manière de s'approcher le plus possible du corps noir, elle absorbe le rayonnement solaire transmis, s'échauffe et puis rayonne dans l'infrarouge.

Ces rayons infrarouges émis arrivent sur la vitre, une lame de verre dont la propriété classique est d'être transparente aux courtes longueurs d'ondes (celles du soleil), revenant comme une véritable paroi opaque pour les rayons infrarouges ($\lambda > 3\mu\text{m}$) issus du corps chauffé, la vitre absorbe donc les rayons infrarouges émis et à son tour s'échauffe puis irradie autant par ses deux faces. La surface réceptrice recevra, par conséquent, le rayonnement solaire, augmenté de presque la moitié du rayonnement de couvercle. C'est donc le principe de l'effet de serre.

III. 3. Principales caractéristiques d'un distillateur solaire

III. 3.1 Caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire

Le choix d'un tel distillateur solaire dépend essentiellement des grandeurs appelées caractéristiques de fonctionnement [89], qui caractérisent sa production en eau. On distingue constamment : le rendement, l'efficacité globale, l'efficacité interne et la performance.

Les grandeurs caractérisant la production d'eau d'un tel distillateur sont définies comme suit:

III. 3.1.1 La production du distillat (Le rendement)

La production du distillat d'un distillateur solaire définit son rendement, elle représente la quantité d'eau produite par unité de surface d'évaporation, par jour. L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive au distillateur.

Le débit de l'eau distillée est donné par la relation suivante [151] :

$$m_d = \frac{Q_{ev}}{L_v(T_w)} * (3600) \text{ (Kg/m}^2\text{.h)} \quad (\text{III.1})$$

Q_{ev} : représente la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation de l'eau (W /h).

$L_v(T_w)$: la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température T_w (W/kg).

III. 3.1.2 L'efficacité

Cooper [152] a défini deux types d'efficacités instantanées à savoir :

- L'efficacité globale η_g

L'efficacité globale est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation de la saumure par unité de temps et la quantité d'énergie globale incidente par unité de surface, représentée par le rayonnement solaire. La quantité d'énergie qui entre dans le distillateur est subordonnée au lieu d'implantation, à la pente de la couverture. Ainsi tout changement de ces deux facteurs fait varier la quantité d'énergie dans le distillateur [153]. L'efficacité globale est définie par l'expression suivante :

$$\eta_g (\%) = \frac{Q_{ev}}{G.A} = \frac{m_d.L_v}{G.A} \quad (\text{III.2})$$

Q_{ev} : quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps ;

$A(S)$: surface de la vitre (m^2) ;

G : intensité globale du rayonnement solaire incident par m^2 , sur une surface horizontale, durant la journée ;

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température de la source chaude ;

m_d : le débit du distillat.

- L'efficacité interne (η_i)

L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité de chaleur effectivement absorbée par la saumure et le plan noir par unité de surface. Elle est définie par la relation suivante:

$$\eta_i (\%) = \frac{Q_{ev}}{\alpha_t.G.A} = \frac{m_d.L_v}{q_{eau}} \quad (\text{III.3})$$

$\alpha_t.G.A (q_{eau})$: Quantité de chaleur absorbée par l'eau et par unité de surface du plan noir durant la journée et qui dépend du rayonnement solaire incident en provenance de la vitre du distillateur.

Pour une intensité globale du rayonnement solaire G , l'expression de q_{eau} est:

$$q_{eau} = (\tau_v \cdot \alpha_w + \tau_v \cdot \tau_w \cdot \alpha_f) \times G.A \quad (\text{III.4})$$

$G=H$: Rayonnement solaire global incident reçu sur une surface horizontale d'un mètre carré pendant la même journée (W/m^2).

α_t : Coefficient d'absorption thermique effective du distillateur solaire.

$$\alpha_t = \tau_v \cdot \alpha_w + \tau_v \cdot \tau_w \cdot \alpha_f \quad (III.5)$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre ;

τ_w : Coefficient de transmission de l'eau ;

α_w : Coefficient d'absorption de l'eau ;

α_f : Coefficient d'absorption du fond de bassin du distillateur.

On trouve dans le tableau ci –dessous les coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption et de transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur solaire [89].

Tableau III.4 : Valeurs des coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption, de transmission vis à vis du rayonnement solaire incident au niveau des différentes parties du distillateur solaire.

Angle d'incidence du rayonnement en degrés		0 – 30°	45°	60°
Vitre	Réflexion	5%	6%	10%
	Absorption	5%	5%	5%
	Transmission	90%	89%	85%
Nappe d'eau	Réflexion	2%	3%	6%
	Absorption	30%	30%	30%
	Transmission	68%	67%	64%
Fond distillateur	Réflexion	5%	5%	5%
	Absorption	95%	92%	95%
	Transmission	0%	0%	0%

III. 3.1.3 Le rendement d'absorption:

Selon Cooper [45] le rendement d'absorption (R_{abs}) traduit la fraction d'énergie solaire utilement absorbée par l'eau et le bac absorbant durant une journée.

$$R_{abs} = \int_0^t \alpha_t \frac{Q}{G} dt \quad (III.6)$$

R_{abs}: Rendement d'absorption.

t₀ et **t** : Temps correspondants au lever du soleil et à la durée d'ensoleillement.

Q : Flux solaire global reçu sur une surface horizontale par mètre carré et par unité de temps.

G: Énergie solaire globale reçue dans la journée par unité de surface horizontale.

III. 3.1.4 La performance

Afin de pouvoir caractériser la performance d'un distillateur solaire d'une manière plus générale, Satcunathan et Hansen [144] sont arrivés à définir le Facteur de Performance Brut (F.P.B) et le Facteur de Performance Horaire (F.P.H) :

$$F.P.B = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 heures}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 heures}} \quad (III.7)$$

$$F.P.H = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie au bout d'une heure}} \quad (III.8)$$

Ces facteurs traduisent le rapport entre les quantités d'eau distillée produite par le distillateur et l'énergie reçue par le distillateur.

A un instant donné de la journée, le Facteur de Performance « F.P » est donné par la relation :

$$F.P = \frac{md}{\alpha t \times I_G \times A} \quad (III.9)$$

III. 4. Concept Thermique (énergétique)

III. 4.1. Le bilan thermique global :

Il est évident que le bilan énergétique global d'un tel distillateur solaire constitue l'ensemble des transferts de chaleur internes et externes.

- **Bilan thermique en régime permanent :**

Le bilan thermique d'un distillateur solaire est considéré en régime permanent, lorsque la chaleur absorbée par les parois est négligeable par rapport à celle reçue par la masse d'eau. On définit alors un régime permanent ou stationnaire lorsque des grandeurs telles que : la masse volumique "ρ", la pression : "p", et la vitesse : "v", caractéristiques du fluide et de

l'écoulement sont indépendantes du temps“ t, aussi bien pour les températures que pour les flux de chaleur.

Les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur se présentent successivement comme suit :

- **Bilan thermique en régime transitoire :** au contraire du régime permanent, les températures et les flux de chaleur dépendent du temps.

III. 4.2. Les différents modes de transfert de chaleur dans les deux types de distillateurs solaires.

Les modes de transferts de chaleur les plus connus sont par conduction, par rayonnement, par convection, et parfois suivi par évaporation au niveau de la saumure, se déroulant simultanément lors de la mise en marche de la machine de distillation. Cependant, nous allons mettre en évidence deux catégories de transferts de chaleur qui s'appliquent pour chaque unité de distillation, constituant ainsi le bilan énergétique qui sont :

1. Les transferts de chaleur externes

Les échanges de chaleur entre l'enveloppe du distillateur et le milieu ambiant suscitant un bilan thermique global extérieur.

2. Les transferts de chaleur internes

Les échanges de chaleur à l'intérieur de la chambre du distillateur solaire constituent le bilan thermique intérieur.

III.4.3 Bilan énergétique du distillateur solaire, type symétrique à double pentes (faces)

1. L'énergie solaire incidente sur la vitre :

L'énergie solaire totale incidente par jour est la quantité du rayonnement rassemblée par une surface horizontale pendant les heures d'ensoleillement [154] .

$$G = \int q_s(t) dt \quad (\text{III.10})$$

2. L'énergie solaire transmise à travers la vitre :

L'énergie transmise à travers la vitre dépend de la transmissivité du verre utilisé. L'intervalle de transmissivité est de 70 à 95 % pour les différents types de verre [146] . Par conséquent, la quantité d'énergie solaire qui traverse le verre et la surface de l'eau est :

$$Hg = Q_t = \tau_g \times G \quad (\text{III.11})$$

III. 4. 3.1 Bilan énergétique de la vitre:

Le bilan thermique de la vitre (figure III.3), peut être récapitulé à partir des échanges de chaleur au niveau des deux faces intérieure et extérieure de la vitre venant de la masse d'eau et allant vers le milieu ambiant.

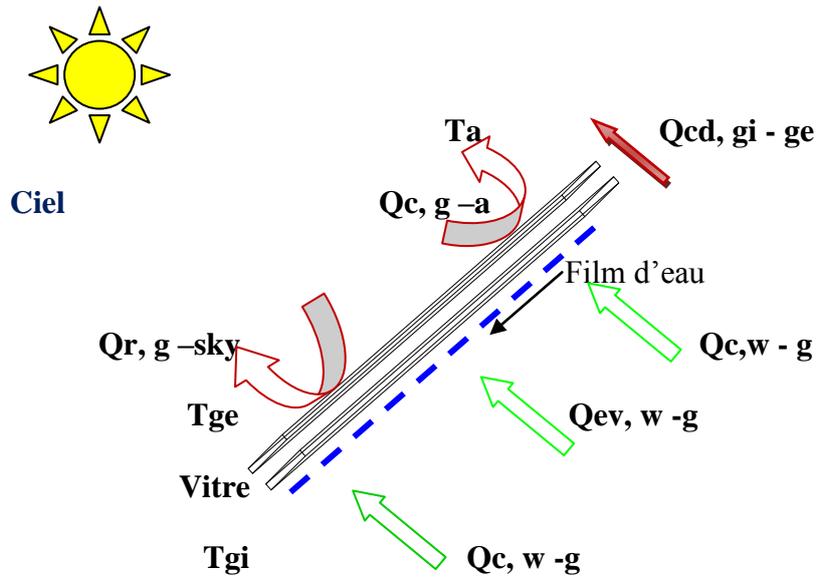


Figure III.3 : Bilan énergétique de la vitre.

III. 4. 3. 1. 1 Transfert de chaleur externe (vitre –ambiance)

Les quantités de chaleurs globales échangées entre la vitre et l'atmosphère sont subdivisées en deux modes, à savoir par convection et par rayonnement :

$$Q_{g-a} = Q_{c, g-a} + Q_{r, g-a} \quad (\text{III.12})$$

La perte de chaleur par convection entre la face extérieure de la vitre et le milieu ambiant est donnée par la relation :

$$Q_{c, g-a} = h_{c, g-a} (T_{ge} - T_a) \quad (\text{III.13})$$

Le coefficient d'échange par convection $h_{c, g-a}$ dépend de la vitesse du vent [146,155 – 157]:

$$h_{c, g-a} = 5,7 + 3,8 V \quad (\text{III.14})$$

V: Vitesse du vent (m/s)

La perte d'énergie par rayonnement à l'extérieur du distillateur solaire est donnée par la relation suivante :

$$Q_{r, g - sky} = h_{r, g - c} (T_g - T_{sky}) \quad (III.15)$$

Le transfert de chaleur par rayonnement, dans ce cas, dépend de la température d'un ciel clair, T_{sky} .

Le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement est donné par la relation de Duffie Beckmann [102] :

$$h_{r, g - sky} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_{sky}^2) (T_g + T_{sky}) \quad (III.16)$$

La température du ciel T_{sky} est une fonction de la température ambiante [158 - 160]:

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1,5} \quad (III.17)$$

Le coefficient d'échange de chaleur global est donc :

$$h_2 = h_{c, g - a} + h_{r, g - sky} \quad (III.18)$$

III. 4.3.1.2. Transfert de chaleur interne (vitre –masse d'eau)

La vitre reçoit une quantité de chaleur au niveau de laquelle se produit l'échange de chaleur entre la face intérieure de la vitre et la masse d'eau par rayonnement, par convection et par un processus d'évaporation :

$$Q_{w-g} = Q_{r, w-g} + Q_{c, w-g} + Q_{ev, w-g} \quad (III.19)$$

Le flux d'échange thermique par rayonnement entre l'eau saumâtre et la vitre se calcule par la relation suivante [161]:

$$Q_{r, w-g} = h_{r, w-g} (T_w - T_g) \quad (III.20)$$

Le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement $h_{r, w-g}$ est donné par Duffie Beckmann [102].

$$h_{r, w-g} = \varepsilon_{eff} \sigma (T_w^2 + T_g^2) (T_w + T_g) \quad (III.21)$$

ε_{eff} : représente le facteur d'émission effective :

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right]^{-1} \quad (III.22)$$

- **Transfert de chaleur interne par convection naturelle (eau-vitre) :**

L'expression du flux thermique échangé par convection entre l'eau saumâtre et la vitre est définie par la relation de Dunkle [124].

$$Q_{c, w-g} = h_{c, w-g} (T_w - T_g) \quad (\text{III.23})$$

- **L'énergie transférée par évaporation et de condensation (eau-vitre) :**

Le chauffage de l'eau saumâtre arrive à son processus d'évaporation suite à l'augmentation de sa température, où dans ce cas, le transfert d'énergie dépend de la quantité d'eau transférée du bassin du distillateur vers la vitre. L'expression du flux thermique échangé par évaporation entre l'eau de bassin et la face intérieure de la vitre est [57,124]:

$$Q_{év, w-g} = h_{év, w-g} (T_w - T_g) \quad (\text{III.24})$$

$$\text{et } Q_{év, w-g} = m^* L_v \quad (\text{III.25})$$

A partir de la relation de Dunkle [124], valorisant l'échange thermique par convection et par évaporation, et dont elle est issue du transfert de chaleur et de masse au niveau du processus évaporation – condensation, d'où on peut tirer les coefficients d'échange par convection et par évaporation :

$$h_{c, w-g} = 0.884 \times \left[(T_w - T_g) + \frac{P_w - P_g}{268.9 \times 10^3 - P_w} T_w \right]^{1/3} \quad (\text{III.26})$$

$$h_{év, w-g} = 16.276 \times 10^{-3} \times h_{c, w-g} \times \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (\text{III.27})$$

P_w et P_g correspondent aux pressions de vapeur liées aux températures de respectivement la face intérieure de la vitre et de la surface de l'eau de bassin, obtenues à partir des relations suivantes :

$$P_g = e^{\left(25 - \frac{5144}{T_g}\right)} \quad (\text{III.28})$$

$$P_w = e^{\left(25 - \frac{5144}{T_w}\right)} \quad (\text{III.29})$$

- **L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la vitre :**

La couverture en verre du distillateur solaire constitue une paroi opaque et homogène, ce qui est favorable pour la création systématique d'un échange thermique par conduction lorsqu'il y a une différence de température entre la face intérieure et la face extérieure de la vitre. Dans la vitre, il y a un mécanisme de transfert de chaleur par conduction entre la face extérieure et la face intérieure de la vitre, tel que :

$$Q_{cd} = h_{cd} (T_{gi} - T_{ge}) \quad (III.30)$$

Le coefficient d'échange de chaleur par conduction est donné par la relation suivante :

$$h_{cd} = \frac{\lambda_g}{e} \quad (III.31)$$

λ_g : la conductivité thermique de la vitre.

e : épaisseur de la vitre.

III.4. 3.2 Bilan énergétique de la masse d'eau

L'énergie absorbée par l'eau : Elle s'exprime par

$$Hg = Q_t = \alpha_w \times \tau_g \times G \quad (III.32)$$

avec α_w comme étant le coefficient d'absorption de l'eau

Dans l'échange de chaleur entre la masse d'eau et la face intérieure de la vitre, on trouve les mêmes quantités de chaleur par respectivement convection, rayonnement et évaporation, gagnées par la face intérieure de la vitre et qui sont considérées comme des pertes de chaleur par rapport à la masse d'eau. Le bilan thermique de la masse d'eau est donc accompli avec un gain de chaleur par convection sous forme d'apport (au fond du bassin) venant de l'absorbeur, où la quantité de chaleur échangée par convection entre l'absorbeur et l'eau de bassin est :

$$Q_{c,b-w} = h_{c,b-w} (T_b - T_w) \quad (III.33)$$

Le coefficient d'échange de chaleur par convection est donné par :

$$h_{c,b-w} = \frac{CK}{L} [(Gr.Pr)]^{1/4} \quad (III.34)$$

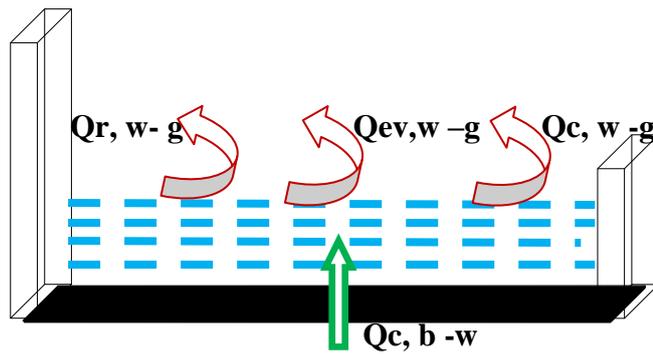


Figure III. 4 : Bilan énergétique de la masse d'eau.

III. 4. 3. 3 Bilan thermique de l'absorbeur (plaque absorbante)

Le bilan thermique de la plaque absorbante est obtenu à partir de la quantité de chaleur perdue par convection vers la masse d'eau d'une part et de la quantité de chaleur par conduction gagnée à partir de l'isolant.

- **L'énergie absorbée par la plaque :**

$$H_b = \alpha_b \times \tau_w \times \tau_g \times G \quad (\text{III.35})$$

L'échange de chaleur par conduction entre l'absorbeur et la face intérieure de l'isolant est donné par :

$$Q_{cd, b-in} = h_{cd, b-in} (T_b - T_{in}) \quad (\text{III.36})$$

Le coefficient d'échange par conduction $h_{cd, b-in}$ s'écrit :

$$h_{cd, b-in} = \frac{K_D}{L_D} \quad (\text{III.37})$$

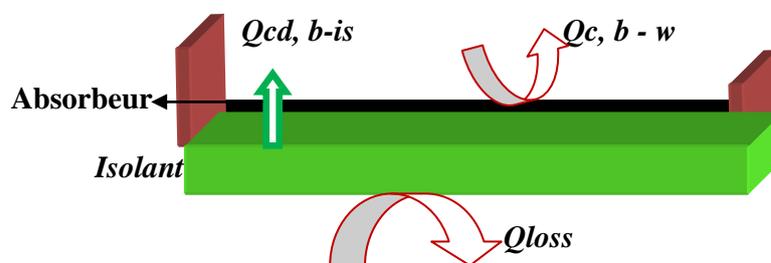


Figure III.5 : Bilan énergétique de la plaque absorbante et de l'isolant.

III. 4. 3. 4 Bilan thermique de l'isolant :

Le bilan thermique de l'isolant est obtenu par les quantités de chaleur par conduction entre l'isolant et l'absorbeur $Q_{cd, b-in}$ et la quantité de chaleur perdue vers l'extérieur Q_{loss} .

L'expression de la quantité de chaleur perdue à partir de l'isolant vers le milieu ambiant est :

$$Q_{loss} = U_{in} (T_{in} - T_a)$$

Le coefficient d'échange de chaleur global est calculé à partir de la relation de la conduction de Fourier, soit :

$$U_{in} = \left(\frac{L_{in}}{K_{in}} + \frac{1}{h_{in}} \right)^{-1} \quad (III.38)$$

III. 4. 3. 5 Bilan énergétique (récapitulé) du distillateur solaire de type symétrique et à double pente :

Le bilan thermique des différents composants, qui sont au nombre de six paliers de ce distillateur à double pente et à effet de serre est établi selon la loi suivante :

$$\frac{M_i dT_i}{S_i dt} = \sum_{i=1}^N Q_{ij} \quad (III.39)$$

III. 4. 4 Principe de fonctionnement du distillateur solaire type symétrique

Dans ce type de distillateur, simple, symétrique et à double pente (deux faces), l'énergie solaire qui est dépendante du temps, est transmise, à travers une couverture transparente en verre, vers l'eau de bassin pour se loger dans le bas de l'absorbeur. C'est ainsi que la température des différents éléments varie avec l'absorption des fractions de l'énergie solaire provoquant les phénomènes d'évaporation et de condensation, d'où des gouttelettes d'eau se cumulent au niveau de la face intérieure de la vitre pour former un film d'eau distillée et se ruisselant vers le canal d'évacuation, tout en tenant compte des pertes de chaleur, des propriétés thermiques des différents éléments de l'unité de distillation ainsi que de son emplacement (directions est – ouest et sud – nord).

Dans ce type de distillateur, l'énergie solaire qui est dépendante du temps est transmise à travers la couverture transparente vers l'eau de bassin pour se loger dans le bas de l'absorbeur, c'est ainsi que la température des différents éléments varie avec l'absorption des fractions de l'énergie solaire, en tenant compte des pertes de chaleur et des propriétés thermiques de l'unité de distillation.

III. 4. 4. 1 Les hypothèses

Le modèle mathématique du distillateur solaire de type symétrique est soumis à un certain nombre de conditions issues de l'effet des paramètres internes et externes sur la performance de l'unité de distillation solaire avec la prise en compte de l'évolution des températures des différents éléments du distillateur. Afin de concrétiser cette tâche et rendre le modèle mathématique accessible, nous avons établi les hypothèses simplificatrices suivantes :

1. Le système est considéré dans un état quasiment régulier.
2. L'unité de distillation solaire est protégée contre toute fuite de vapeur.
3. Les capacités thermiques de la vitre, de l'absorbeur et des matériaux isolants sont négligeables.
4. Les coefficients de transfert de chaleur dépendant de la température doivent être pris en considération.
5. Les caractéristiques d'absorption de l'eau de bassin sont négligeables.
6. La base et les parois du système sont considérées comme parfaitement isolées.
8. Le rayonnement solaire absorbé par les parois est négligeable.
9. Les pertes latérales du distillateur sont négligeables.
10. Les températures des faces inclinées de la vitre intérieure et extérieure, de la saumure, de l'absorbeur et de l'isolant sont considérées uniformes.
11. La chaleur cédée à l'eau du distillat et la chaleur cédée à l'eau d'appoint sont supposées négligeables.

III. 4. 5 Les équations de fonctionnement

La formulation des équations des différents composants relatifs au modèle de distillateur solaire de type symétrique et à double pente à effet de serre doit être accomplie en tenant compte des hypothèses et des conditions citées auparavant. Les équations issues du système, à chaque nœud de la maille sont en régime transitoire s'écrivent :

III. 4. 5.1 Au niveau de la couverture

L'équation de l'équilibre d'énergie par unité de surface de la vitre, dans laquelle se produisent les échanges de chaleur avec les parties limitrophes intérieures et extérieures de respectivement l'eau de bassin et de l'environnement, peut s'écrire comme suit:

$$m_g C_{Pg} \frac{\partial t_g}{\partial t} = H_g(t) + (q_{c-w-g} + q_{ev-w-g} + q_{r-g}) - (q_{r-sky}) - (q_{c,g-a}) \quad (\text{III.40})$$

Premier niveau (Nœud 1) : la face extérieure de la vitre

$$\frac{m_g C_{Pg}}{S_g} \frac{\partial T_{ge}}{\partial T} = H_g(t) + q_{cd} - q_{r,g-a} - q_{c,g-a} \quad (\text{III.41})$$

Deuxième niveau (Nœud 2) : La face intérieure de la vitre :

$$\frac{m_g C_{Pg}}{S_g} \frac{\partial T_{gi}}{\partial T} = Q_{r,w-g} + Q_{c,w-g} + Q_{ev,w-g} - Q_{cd} \quad (\text{III.42})$$

III. 4. 5.2 Au niveau de la masse d'eau

Troisième niveau (Nœud 3) : La surface de l'eau de bassin

Pour la masse d'eau, l'énergie échangée prend place entre l'unité de surface du bassin et celle de la vitre intérieure :

$$\frac{m_w C_{Pw}}{S_w} \frac{\partial T_w}{\partial T} = H_w(t) + q_{c,b-w} - (q_{r,w-g} - q_{c,w-g} - q_{ev,w-g}) \quad (\text{III.43})$$

Quatrième niveau (Nœud 4): la plaque de l'absorbeur :

L'équation de la balance d'énergie par unité de surface de la plaque absorbante est calculée comme suit :

$$\frac{m_b C_{Pb}}{S_b} \frac{\partial T_b}{\partial T} = H_b(t) - Q_{cd,b-in} - Q_{c,w-b} \quad (\text{III.44})$$

III. 4. 5.3 Au niveau de l'isolant

L'équation de la balance d'énergie pour l'isolant par unité de surface du bassin est:

$$m_{in} C_{in} \frac{dT_{in}}{dt} = (q_{cd,b-in}) - (q_{loss}) \quad (\text{III.45})$$

Cinquième niveau (Nœud 5) : Face intérieure de l'isolant

$$\frac{m_{is} C_{Pis}}{S_{is}} \frac{\partial T_{is}}{\partial T} = q_{cd,b-is} \quad (\text{III.46})$$

Sixième Niveau (Nœud 6): Face extérieure de l'isolant

$$\frac{m_{is}C_{pis}}{S_{is}} \frac{\partial T_{is}}{\partial T} = - Q_{loss} \quad (\text{III.47})$$

III. 4. 6 Distillateur solaire de type asymétrique et à double effet

III. 4. 6. 1 Bilan énergétique

Le bilan énergétique du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet est représenté par les échanges de chaleur se produisant entre les différents composants, à l'intérieure de l'unité de distillation et entre l'enveloppe du même distillateur et l'environnement caractérisant les transferts de chaleur internes et externes.

III. 4. 6. 1.1 Bilan énergétique de la vitre 2 :

Le bilan thermique de la vitre (2) servant comme couverture du deuxième bassin est déterminé à partir des échanges effectués entre la face extérieure de la vitre et le milieu ambiant d'une part et entre la face intérieure et le film d'eau en écoulement d' autre part.

L'énergie solaire incidente et transmise à travers la vitre :

Les quantités d'énergie $\alpha_g G$, $\tau_g G$ et $\rho_g G$ sont les quantités de respectivement l'énergie absorbée, l'énergie transmise et l'énergie réfléchie par la vitre.

III. 4. 6. 1.2 Transfert de chaleur externe (vitre2 –ambiant)

Etant donné que la face extérieure de la vitre 2 est exposée à la faible température de l'air ambiant, et à la vitesse du vent régnant dans l'atmosphère, il est évident de considérer les échanges thermiques comme des pertes de chaleur vers l'extérieur, d'où on distingue :

$$Q_{g2-a} = Q_{c, g2-a} + Q_{r, g2-c} \quad (\text{III.48})$$

Deux catégories de quantités de chaleur échangée entre la vitre et l'atmosphère et qui surgissent indépendamment l'une par rapport à l'autre, sont subdivisées en deux modes d'échange par convection et par rayonnement :

Transfert de chaleur par convection à l'extérieur du distillateur (vitre-ambiance) :

La quantité de chaleur par convection est évaluée comme perte de chaleur vers le milieu ambiant et est donnée par la relation suivante :

$$Q_{c, g2-a} = h_{c, g2-a} (T_{ge2} - T_a) \quad (\text{III.49})$$

Pour calculer le coefficient d'échange de chaleur par convection $h_{c, g2-a}$, qui dépend de la vitesse du vent, on utilise la même relation (III.14) appliquée au système symétrique.

Transfert de chaleur par rayonnement à l'extérieur du distillateur (vitre-ambiance) :

La perte d'énergie par rayonnement à l'extérieur du distillateur solaire est ainsi évaluée comme la quantité de chaleur échangée entre la face extérieure de la vitre 2 et le ciel, et est donnée par la relation suivante :

$$Q_{r, g2-sky} = h_{r, g2-c} (T_{g2} - T_{sky}) \quad (III.50)$$

Le transfert de chaleur par rayonnement, dans ce cas, dépend de la température d'un ciel clair T_{sky} .

Le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement est calculé à partir de la relation donnée par Duffie Beckmann [102] et qui est appliquée au premier système symétrique.

Le coefficient d'échange de chaleur global retenu pour ce type de distillateur asymétrique et à double effet est:

$$h_2 = h_{c, g2-a} + h_{r, g2-sky} \quad (III.51)$$

III. 4. 6. 1.3 Transfert de chaleur interne (vitre2 – film d'eau)

La face intérieure de la vitre 2 reçoit des quantités de chaleur sous forme de gains d'énergie, en d'autres termes il s'agit du transfert de chaleur par convection et par évaporation issu du phénomène évaporation – condensation du film d'eau, et d'une quantité de chaleur due au rayonnement solaire incident sur la masse du film d'eau en écoulement.

La quantité de chaleur globale reçue est donc :

$$Q_{wf-g2} = Q_{r, wf-g2} + Q_{c, wf-g2} + Q_{ev, wf-g2} \quad (III.52)$$

d'où $Q_{c, wf-g2}$, $Q_{ev, wf-g2}$ et $Q_{r, wf-g2}$, représentent les quantités de chaleur dues aux transferts de chaleur internes par convection, par évaporation et par rayonnement entre le film d'eau et la seconde vitre (g2), et qui peuvent être exprimées comme suit :

$$q_{c, wf-g2} = h_{c, wf-g2} (T_{wf} - T_{g2}) \quad (III.53)$$

$$q_{ev, wf-g2} = h_{f_{ev, wf-g2}} (T_{wf} - T_{g2}) \quad (III.54)$$

$$q_{r,wf-g2} = h_{r,wf-g2} (T_{wf} - T_{g2}) \quad (III.55)$$

Transfert de chaleur interne par rayonnement (film d'eau-vitre 2) :

Le flux de chaleur par rayonnement échangé entre le film d'eau saumâtre et la vitre est donné par la relation suivante [161]:

L'expression de la quantité de chaleur par rayonnement s'opère comme suit:

$$(q_{r,wf-g2}) = h_{r,wf-g2} (T_{wf} - T_{g2}) \quad (III.56)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement $h_{r, wf - g2}$ est calculé en utilisant la même équation (III.16), appliquée au distillateur solaire de type symétrique entre l'eau de bassin et la vitre, tout en remplaçant les indices de l'eau (w) et de la vitre (g) par ceux du film d'eau (wf) et de la deuxième couverture en verre (g2).

L'énergie transférée par évaporation et par condensation (eau-vitre) :

Les expressions du flux thermique par convection et par évaporation, échangées entre le film d'eau et la face intérieure de la vitre 2, sont données par la relation de Dunkle [124].

Les quantités de transfert de chaleur par convection et par évaporation entre le film d'eau et la face intérieure de la vitre 2 sont simultanément produites dans le processus d'évaporation et de condensation:

$$q_{c,wf-g2} = h_{c,wf-g2} (T_{wf} - T_{g2}) \quad (III.57)$$

$$q_{ev,wf-g2} = h_{ev,wf-g2} (T_{wf} - T_{g2}) \quad (III.58)$$

Ou bien

$$Q_{év, w-g} = m \cdot L_v \quad (III.59)$$

Les coefficients de transfert de chaleur $h_{c,wf-g2}$, et $h_{ev,wf-g2}$ constituant les équations (III.57) et (III.58) sont évalués à partir des équations (III.26) et (III.27), d'où on remplace (Tw) par (T_{wf}) et (Tg) par (T_{g2}) .

III. 4. 6. 1.4 Bilan énergétique du film d'eau

Le bilan du film d'eau se résume dans les échanges effectués entre la vitre g1 sous forme de gains de chaleur par convection et sous forme de pertes de chaleur interne par

convection, par rayonnement et par évaporation ($q_{c,wf-g2}$, $q_{ev,wf-g2}$ et $q_{r,wf-g2}$) et qui sont les mêmes par rapport à la vitre 2 ; comme nous avons aussi tenu compte de la variation de la température du film d'eau en écoulement continu et linéaire, depuis son entrée jusqu'à sa sortie en longeant toute la longueur dx , exprimé par $\left(\frac{\partial T_{wf}}{\partial x}\right)$.

Transfert de chaleur par convection (vitre 2 – film d'eau)

L'expression de la quantité de chaleur par convection échangée entre le film d'eau et la couverture $g1$ (la base du deuxième compartiment), s'écrit :

$$q_{c,g1-wf} = h_{c,g1-wf}(T_{g1} - T_{wf}) \quad (III.60)$$

dont le coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'absorbeur et la masse $h_{c,g1-wf}$ est donné par la relation :

$$h_{c,g1-wf} = \frac{CK}{L} [(Gr.Pr)]^{1/4} \quad (III.61)$$

III. 4. 6. 1.5 Bilan énergétique de la vitre g_1

La vitre 1 constitue un élément de grande importance dans les échanges thermiques de tout le système à double effet, de par sa situation qui lui permet de couper le système en deux compartiments et de visualiser les différents échanges de chaleur, d'où l'établissement du bilan thermique se fait dans les cas suivants:

-La vitre ($g1$) constitue la base du deuxième compartiment : elle cède une quantité de chaleur par convection au film d'eau $q_{c,g1-wf}$.

- La même vitre ($g1$), qui constitue la couverture du premier compartiment, reçoit comme gains de chaleur les quantités de chaleur par respectivement convection, évaporation et rayonnement venant de l'eau de bassin.

La même vitre ($g1$), c'est la couverture du premier compartiment, qui reçoit comme gains de chaleur les quantités de chaleur internes par convection, évaporation et rayonnement venant de l'eau de bassin.

Les expressions des quantités de ces quantités de chaleur interne au premier effet, sont ainsi données par les expressions suivantes :

$$q_{c,w-g1} = h_{c,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (III.62)$$

$$q_{ev,w-g1} = h_{ev,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (III.63)$$

$$q_{r,w-g1} = h_{r,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (III.64)$$

Les coefficients de transfert de chaleur $h_{c,w-g1}$, $h_{ev,w-g1}$ et $h_{r,w-g1}$ dans les équations (III.62), (III.63) et (III.64) sont calculés à partir des équations (III.26), (III.27) et (III.21) en remplaçant (T_g) par (T_{g1}).

III. 4. 6. 1.6 Bilan énergétique de la masse d'eau dans le premier compartiment (bassin principal).

Le bilan thermique entre la masse d'eau dans le premier compartiment se traduit par les échanges de chaleur effectués avec la vitre 1 d'un côté et avec la plaque de l'absorbeur de l'autre côté.

Transfert de chaleur (masse d'eau –vitre₁)

La masse d'eau perd les mêmes quantités de chaleur gagnées par la vitre 1 par respectivement convection, rayonnement et évaporation :

$$q_{c,w-g1} = h_{c,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (III.65)$$

$$q_{ev,w-g1} = h_{ev,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (III.66)$$

$$q_{r,w-g1} = h_{r,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (III.67)$$

Transfert de chaleur (masse d'eau –plaque absorbante)

Dans ce cas, la masse d'eau gagne la quantité de chaleur par convection venant de la plaque absorbante :

$$Q_{c,b-w} = h_{c,b-w} (T_b - T_w) \quad (III.68)$$

Le coefficient d'échange de chaleur par convection est analogue à celui calculé dans la relation (III.34).

$$h_{c,b-w} = \frac{cK}{L} [(Gr.Pr)]^{1/4} \quad (III.69)$$

III. 4. 6. 1.7 Bilan énergétique de la plaque absorbante :

La quantité chaleur par convection perdue au profit de la masse d'eau et la quantité de chaleur par conduction gagné par l'isolant constituent le bilan thermique de la plaque absorbante et qui sont exprimées comme suit :

La quantité de chaleur par convection :

$$Q_{c, b-w} = h_{c, b-w} (T_b - T_w) \quad (\text{III.70})$$

L'échange de chaleur par conduction entre l'absorbeur et la face intérieure de l'isolant est donné :

$$Q_{cd, b-in} = h_{cd, b-in} (T_b - T_{in}) \quad (\text{III.71})$$

Les coefficients d'échange de chaleur par convection et par conduction sont les mêmes qui sont exprimés par l'équation (III.37).

III. 4. 6. 1.8 Bilan thermique de l'isolant

Les échanges de chaleur entre l'absorbeur et le milieu ambiant constituent le bilan thermique de l'isolant:

Transfert de chaleur (isolant –absorbeur)

L'expression de la quantité de chaleur par conduction entre l'isolant et l'absorbeur $Q_{cd, b-in}$ est :

$$Q_{cd, b-in} = h_{cd, b-in} (T_b - T_{in}) \quad (\text{III.72})$$

Transfert de chaleur (isolant – ambiance)

L'expression de la quantité de chaleur Q_{loss} , perdue vers le milieu ambiant est donnée par l'expression:

$$Q_{loss} = U_{in} (T_{in} - T_a) \quad (\text{III.73})$$

Le coefficient d'échange de chaleur global est calculé à partir de la relation de la conduction de Fourier soit :

$$U_{is} = \left(\frac{L_{is}}{K_{is}} + \frac{1}{h_{is}} \right)^{-1} \quad (\text{III.74})$$

III. 4. 6. 1.9 Bilan énergétique récapitulatif du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet :

Le bilan thermique des différents composants au nombre de cinq paliers de niveau de ce type de distillateur à double pente à effet de serre est établi suivant la loi suivante :

$$\frac{M_i}{S_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^N Q_{ij} \quad (\text{III.75})$$

III. 4. 6. 2 Principe de fonctionnement du distillateur solaire de type asymétrique

Le même principe de fonctionnement de ce type de distillateur qui reste aussi simple et dont la couverture en verre transparent permet de transmettre le rayonnement solaire vers le film d'eau qui s'écoule dans le second bassin. Le rayonnement solaire continue son chemin en franchissant la vitre intermédiaire, atteignant l'eau stationnée dans le bassin principal avant de se résider au fond du bassin, produisant les phénomènes d'évaporation – condensation dans les deux compartiments et formant des gouttelettes d'eau, puis un film d'eau s'écoulant vers les deux extrémités inférieures des deux superposées vitres, d'où elles seront collectées.

III. 4. 6. 2. 1 Les hypothèses

Le modèle mathématique utilisé est rapporté par Abou Arabi et al. [57], dont la modélisation du système est réalisée sur la base du bilan thermique et parfois massique au niveau de chacune des parties du système, en tenant compte des mêmes conditions appliquées au premier système de type symétrique. Le bilan énergétique est mis en évidence en prenant en considération les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le système est considéré dans un état quasiment régulier.
- L'unité de distillation solaire est protégée contre toute fuite de vapeur.
- Les capacités thermiques de la vitre, de l'absorbeur et des matériaux isolants sont négligées.
- Les coefficients de transfert de chaleur, dépendant de la température, doivent être pris en considération.
- Les caractéristiques d'absorption de l'eau au niveau du bassin principal et celles liées au film d'eau dans le second bassin sont négligeables.
- Chaque élément des composantes des deux systèmes, la base et les parois sont considérés comme parfaitement isolés.

- Le débit de la masse du film d'eau (écoulement de l'eau) est supposé constant.
- Le rayonnement solaire absorbé par les parois est négligeable.
- Le système possédant une seule face réceptrice du rayonnement solaire incident.
- La vitre intermédiaire en verre, servant comme couverture du premier bassin, est parallèle à celle du deuxième bassin qui est exposée à l'atmosphère.

III. 4. 6. 3 Les équations de fonctionnement

La formulation des équations des différents composants relatifs au distillateur solaire type asymétrique et à double effet est ainsi réalisée, en tenant compte des hypothèses et des conditions citées auparavant.

Le bilan énergétique des différents composants de ce système est exprimé par les équations différentielles suivantes :

III. 4. 6. 3.1 Au niveau de la vitre 2

L'équation du bilan d'énergie par unité de surface de la deuxième couverture en verre g_2 (vitre supérieure), dans laquelle se produisent les échanges de la chaleur entre le film d'eau et l'environnement, peut être écrite comme suit:

$$m_g C p_g \frac{\partial t_{g2}}{\partial t} = H_{g2}(t) + (q_{c,wf-g2} + q_{ev,wf-g2} + q_{r,wf-g2}) - (q_{r,g2-sky}) - (q_{c,g2-a}) - (q_{cd,gi2-g2}) \quad (III.76)$$

Premier niveau (Nœud 1) : (La face extérieure de la vitre₂ –milieu ambiant)

$$m_g C p_g \frac{\partial t_{g2}}{\partial t} = H_{g2}(t) - (q_{r,g2-sky}) - (q_{c,g2-a}) + (q_{cd,gi2-g2}) \quad (III.77)$$

Deuxième niveau (Nœud 2) : (La face intérieure de la vitre₂ – film d'eau):

$$m_g C p_g \frac{\partial t_{g2}}{\partial t} = (q_{c,wf-g2} + q_{ev,wf-g2} + q_{r,wf-g2}) - (q_{cd,gi2-g2}) \quad (III.78)$$

III. 4. 6. 3.2 Troisième niveau (Film d'eau): (face intérieure de la vitre₂ – film d'eau en écoulement –Vitre1) :

L'équation différentielle de la balance d'énergie pour le film d'eau par unité de surface de la vitre1 est exprimée comme suit :

$$m_{wf} C_p \frac{\partial t_w}{\partial t} = H_{wf}(t) + (q_{c,g1-wf}) - (q_{c,wf-g2} + q_{ev,wf-g2} + q_{r,wf-g2}) - m_{wf} C_w \left(\frac{\partial T_{wf}}{\partial x} \right) \partial x \quad (\text{III.79})$$

En raison de l'approche, supposée, de la capacité thermique localisée dans les équations ci-dessus, la variation de la température de l'eau en écoulement à partir de son entrée jusqu'à sa sortie dans le deuxième compartiment est supposée linéaire, de façon à ce que le terme $\left(\frac{\partial T_{wf}}{\partial x} \right)$ peut exprimer la variation de la température du film d'eau en écoulement le long de la longueur correspondante ∂x .

$$\left(\frac{\partial T_{wf}}{\partial x} \right) \partial x = 2(T_{wf} - T_{wf,inlet}) \quad (\text{III.79a})$$

III. 4. 6. 3.3 Quatrième Niveau (Vitre₁): (Film d'eau – Vitre₁- Eau de bassin principal)

L'équation de la balance d'énergie par unité de surface de la première couverture en verre (vitre inférieure g₁) est donnée par :

$$m_g C_p \frac{\partial t_{g1}}{\partial t} = H_{g1}(t) + (q_{c,w-g1} + q_{ev,w-g1} + q_{r,w-g1}) - (q_{c,g1-wf}) \quad (\text{III.80})$$

III. 4. 6. 3.4 Cinquième Niveau : Surface de l'eau bassin (principal)

L'équation d'équilibre d'énergie pour l'eau de bassin principal (premier effet) est :

$$m_w C_p \frac{\partial t_w}{\partial t} = H_w(t) + (q_{c,b-w}) - (q_{c-wg1} + q_{ev-wg1} + q_{r-wg1}) \quad (\text{III.81})$$

III. 4. 6. 3.5 Sixième Niveau : la plaque absorbante

L'équation de la balance d'énergie par unité de surface du bassin est calculée par :

$$m_b C_b \frac{dT_b}{dt} = H_b(t) - (q_{c,b-w}) - (q_{cd,b-in}) \quad (\text{III.82})$$

III. 4. 6. 3.6 Au niveau de l'isolant

L'équation de la balance d'énergie pour l'isolant par unité de surface du bassin est:

$$m_{in} C_{in} \frac{dT_{in}}{dt} = (q_{cd,b-in}) - (q_{loss}) \quad (\text{III.83})$$

Septième Niveau (Nœud 5) : Face intérieure de l'isolant

$$\frac{m_{is}C_{pis}}{S_{is}} \frac{\partial T_{isi}}{\partial T} = q_{cd,b-is} \quad (III.84)$$

Huitième Niveau (Nœud 6): Face extérieure de l'isolant

$$\frac{m_{is}C_{pis}}{S_{is}} \frac{\partial T_{ise}}{\partial T} = -q_{loss} \quad (III.85)$$

L'équation d'équilibre d'énergie par unité de surface du bassin est calculée à partir de l'équation (55), tandis que l'équation d'équilibre d'énergie de l'isolant par unité de surface du bassin est calculée à partir de l'équation (56).

La fraction du rayonnement solaire incident (H), est caractérisée par sa dépendance des propriétés optiques des différents matériaux constituant les éléments des deux unités de distillation telles que la transmittance, la reflectance et l'absorption [162]. En effet, dans le bilan thermique, chaque élément reçoit et absorbe l'intensité du rayonnement solaire qui lui est affectée.

III. 4. 7. Analogie électrique

Par analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques (Tableau III. 5), on représente les échanges de chaleur figure (III.6), par un schéma électrique figure (III. 7), sur lesquelles on peut appliquer la loi d'Ohm et la loi de Kirchhoff.

Lorsque le transfert de chaleur qui s'opère entre deux éléments suit plusieurs modes simultanées (par exemple convection et rayonnement), le circuit électrique « modèle » comportera des résistances en parallèles.

Lorsqu'il s'effectue suivant plusieurs modes successifs (ex : par conduction et convection), le circuit électrique « modèle » comportera des résistances en séries.

D'une manière générale et par analogie de la loi d'Ohm, on considère un flux de chaleur échangé entre deux points l'un à une température T_1 et l'autre à une température T_2 soit :

$$Q_{1,2} = h (T_1 - T_2) \quad (III.86)$$

La densité du flux de chaleur échangé entre un point de température et un autre point à une température similaire à la loi d'Ohm, qui autorise les analogies entre les grandeurs thermiques et électriques, peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q_{1,2} = h_{1-2} (T_1 - T_2) \quad (\text{III.87})$$

Telle que La résistance thermique :

$$R_{th} = \frac{1}{h_{1-2}} \quad (\text{III.88})$$

En équivalence cette équation peut être interprétée par la loi d'Ohm comme suit :

$$E_{1,2} = E_2 - E_1 = Req . I \quad (\text{III.89})$$

E_1 et E_2 : représentent les potentiels électriques aux points 1 et 2 du circuit.

Req : La résistance aux transferts de charge électrique entre les points 1 et 2.

I : L'intensité du courant.

La base théorique des nœuds est applicable à partir de la deuxième loi de Kirchhoff qui admet que la somme algébrique des courants instantanés en un point est nulle.

En application des lois d'Ohm et de Kirchhoff sur notre cas, où on considère une section quelconque représentée par la maille du système à l'instant "t", soit "i" l'un des milieux dans cette section qui représente un nœud de la maille.

M_i : représente la masse du milieu « i » du système en [kg].

C_{pi} : représente la capacité calorifique en [J/kg °C]

P_i : facteur de puit ou de la source.

T_i : représente la température en [°C].

∂t : pas de temps

On applique la loi d'Ohm qui donne le bilan au nœud « i », d'où on obtient :

$$M_i \times C_{pi} \times \frac{dT_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{ij} + H_i \quad (\text{III.90})$$

Le tableau comparatif ci-dessous résume les analogies entre la loi de Fourier de diffusion thermique et la loi d'Ohm électrocinétique.

Tableau III. 5 : Analogie entre le système thermique et le système électrique.

Grandeur thermique			Grandeur électrique		
Paramètre	Symbole usuel	Unité	Paramètre	Symbole usuel	Unité
Température	T	[°C] ; [° K]	Potentiel électrique	U	Volt (V)
Flux de chaleur	Q Φ	[W] :(Watt) [TH]	Intensité électrique	I	Ampère
Conductivité thermique	λ	[W/m/°C]	Conductivité électrique	K	A/m/V
Résistance thermique	R	[°C /W]	Résistance électrique	Re	Ω
Capacité thermique	Cp	[J/°C]	Capacité électrique	C	Farad

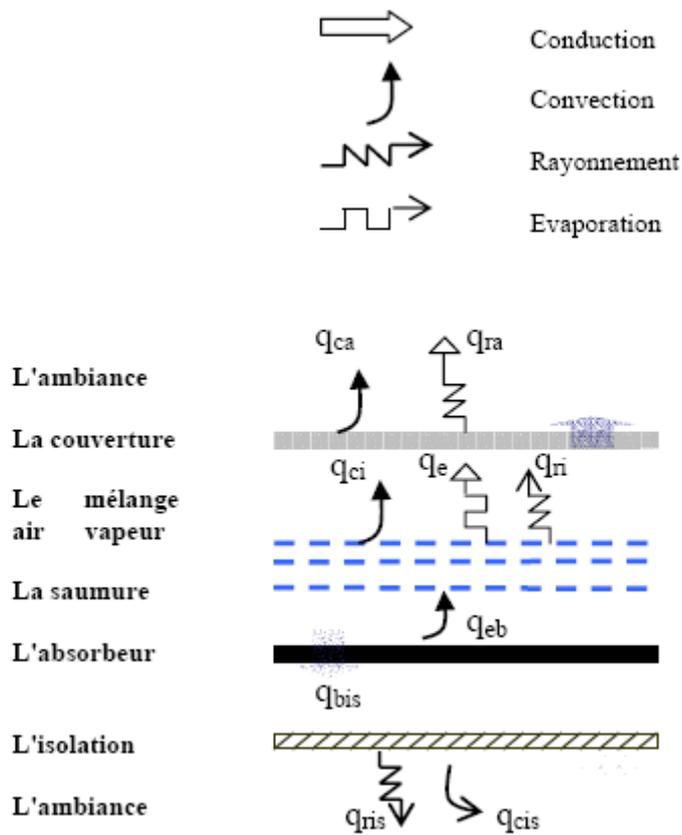


Figure III. 6 : Schéma des différents échanges thermiques dans la maille du distillateur solaire, type symétrique et à double exposition.

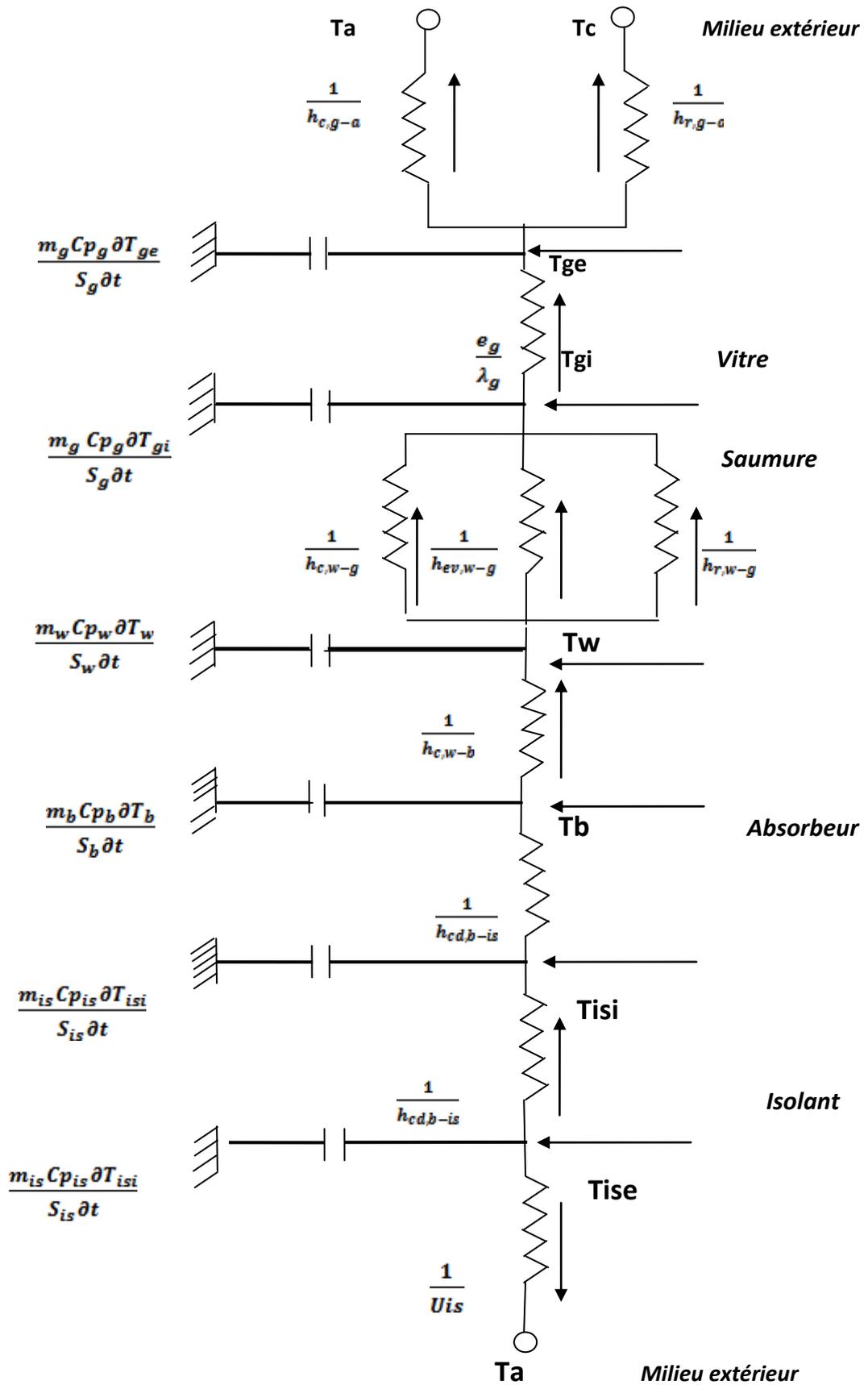
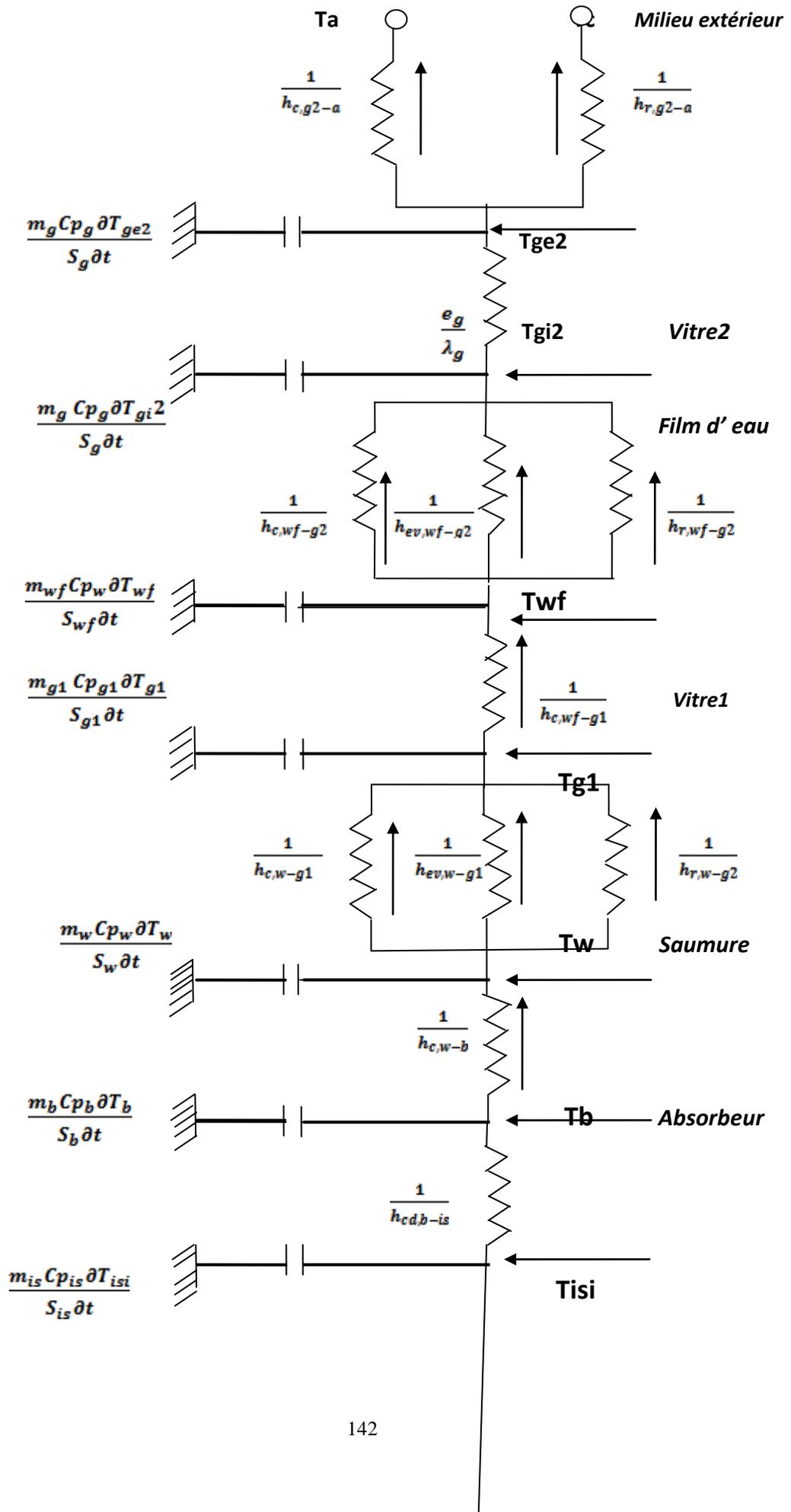


Figure III.7 : Représentation de l'analogie électrique du distillateur solaire symétrique.



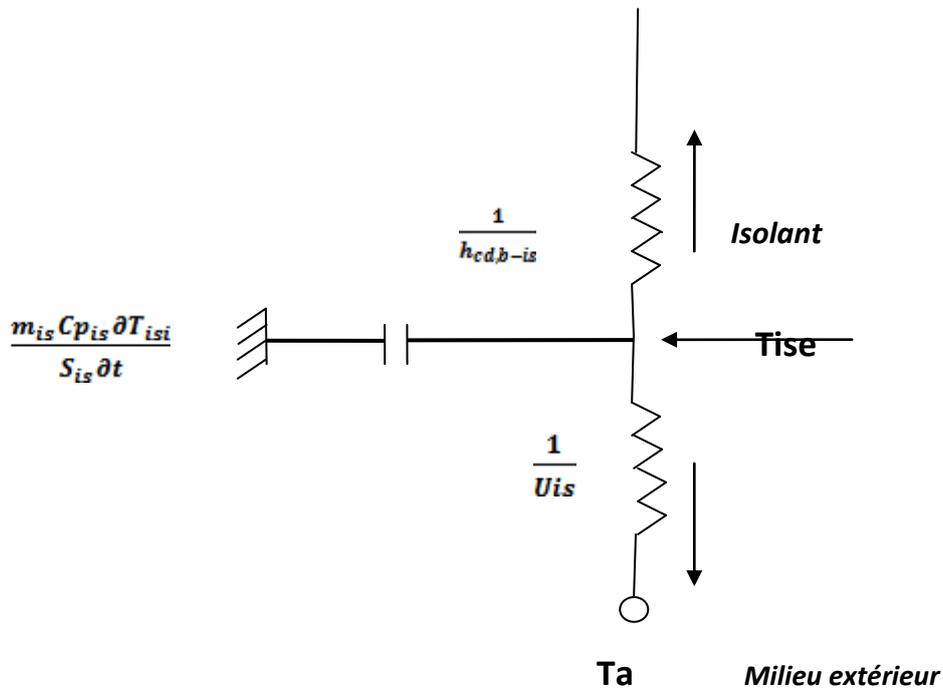


Figure III.8 : Représentation de l'analogie électrique du distillateur solaire, type asymétrique.

III. 4.8 Modélisation mathématique

Plusieurs méthodes de simulation ont été utilisées pour résoudre les équations complexes comprenant des paramètres constants et des paramètres variables appartenant au système considéré. La méthode suivie par Bliss et Whillier suppose que le régime du système (le distillateur) soit permanent et que ses éléments se trouvent à une température constante. L'approche de cette méthode néglige les effets transitoires, mais elle constitue un outil commode pour le calcul, bien qu'il faille procéder à des itérations.

La méthode suivie par Jordan et Lin, dont elle procède au calcul des rendements moyens du distillateur sur une période donnée ; elle utilise notamment la méthode d'intégration des équations.

La méthode que nous allons suivre concerne la résolution des systèmes d'équation par pas à pas. Cette méthode permet de tenir en compte de l'évolution des températures de tous les éléments de notre distillateur solaire, dans le temps et dans l'espace et en régime transitoire.

Le distillateur solaire est découpé en tranches fictives égales (mailles). Cette coupe est faite dans le sens de pénétration du rayonnement solaire incident (H), soit du haut en bas, ensuite on établit le bilan des échanges thermiques qui interviennent au niveau de chaque composant (figures (3.9) et (3.10)).

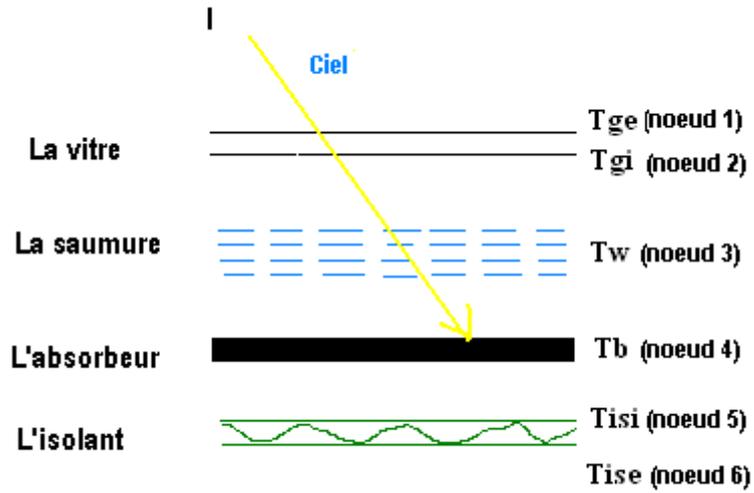


Figure III. 9 : Les différents nœuds considérés dans la maille d'un distillateur solaire, type symétrique à double exposition.

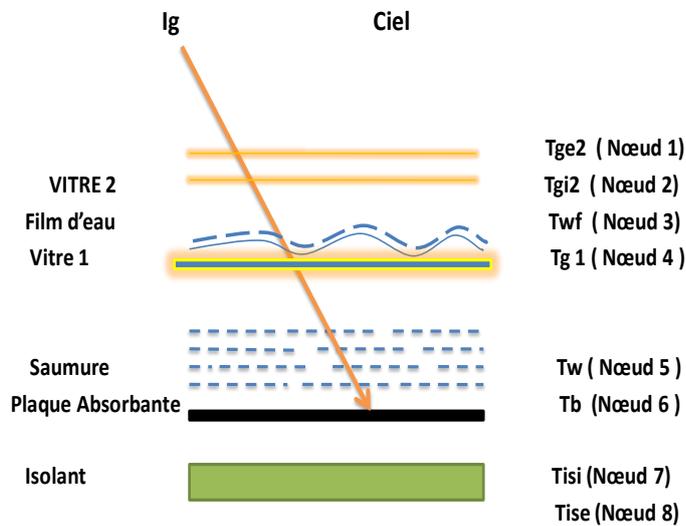


Figure III.10 : Les différents nœuds considérés dans la maille d'un distillateur solaire, type asymétrique à double effet.

III. 4. 9. Principe de programmation

Dans l'étude du système de distillation solaire, nous avons utilisé un programme de simulation numérique développé en langage Matlab, dont le principe consiste à mettre en valeur l'évolution des températures des différents composants du distillateur solaire dans les temps considérés soit à partir de 6 heures jusqu'à 19 heures de la journée choisie, en l'occurrence le 1^{er} Aout 2005. Les calculs sont effectués à partir d'un temps initial « t_0 », pour lequel est affectée une température initiale pour chaque composant du distillateur solaire avec un pas de temps égale à une heure.

Les paramètres qui interviennent dans un premier lieu, sont les données météorologiques de la journée considérée, qui sont relevés à partir des tableaux d'un journal (underground, 2013).

Par ailleurs, on peut citer les paramètres les plus importants tels que :

- La température ambiante.
- La vitesse du vent.
- La température du ciel qui est fonction de la température ambiante.

Les étapes du programme sont:

Première étape :

On commence par calculer les différents coefficients d'échanges thermiques qui sont indépendants de la température :

- Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers consécutivement la couverture, l'absorbeur et l'isolant.
- Les coefficients d'échange thermiques par convection du à la vitesse du vent.

Deuxième étape:

Dans cette étape, on introduit le calcul du rayonnement solaire frappant sur un plan incliné ou un plan horizontal, suivant la disposition des différents éléments du distillateur solaire. On peut citer les fractions solaires, celles reçues par la vitre (H_g), par la saumure (H_w), et par l'absorbeur (H_b) , à chaque heure de la journée, suivie par le calcul des puissances absorbées par ces éléments, à savoir P_g , P_w et P_b .

Dans cette étape, on intègre aussi le calcul des températures du ciel qui sont issues des températures ambiantes, données à chaque heure de la journée.

Troisième étape :

Cette étape est consacrée à l'intégration des conditions initiales représentées par les températures initiales appliquées pour les composants du distillateur solaire. Les deux

éléments du distillateur solaire, à savoir la couverture en vitre et l'isolant sont tout deux exposés à l'atmosphère, où on leur affecte les valeurs de la température ambiante de l'air extérieur à chaque heure de la journée considérée, tandis que les températures initiales des éléments intérieurs tels que la saumure et l'absorbeur prennent des valeurs plus élevées.

Ces températures initiales sont respectivement citées pour les différents éléments des deux distillateurs solaires :

- Distillateur solaire type symétrique

- $T_{ge_0} = T_a$
- $T_{gi_0} = T_a$
- $T_{w_0} = T_a + 2$
- $T_{b_0} = T_a + 3$
- $T_{si_0} = T_a$
- $T_{se_0} = T_a$

- Distillateur solaire type asymétrique

- $T_{ge_0} = T_a$
- $T_{gi_0} = T_a$
- $T_{wf_0} = T_a + 1$
- $T_{ge1_0} = T_a + 2$
- $T_w = T_a + 3$
- $T_{b_0} = T_a + 4$
- $T_{si_0} = T_a + 1$
- $T_{se_0} = T_a$

Quatrième étape :

Lors de cette étape, on effectue des opérations qui nous permettent de calculer à chaque heure de la journée :

- La pression partielle de la vapeur d'eau à la température de la saumure et la pression partielle de la vapeur à la température du côté intérieur de la vitre. Ceci est valable pour les deux distillateurs solaires symétrique avec un seul compartiment et asymétrique ayant deux compartiments.
- On calcule les propriétés thermo physiques de l'eau à la température de l'eau se trouvant dans le bassin principal des deux distillateurs solaires T_w et à la température du

film d'eau en écoulement se trouvant dans le second bassin du distillateur solaire, type asymétrique Twf, telles que :

- La masse volumique.
- La conductivité thermique.
- La viscosité dynamique et cinématique.
- La capacité thermique.
- La chaleur latente de vaporisation.

Dans cette même étape, on calcule les différents coefficients d'échange thermique dépendant de la température à savoir:

-Les coefficients d'échange thermique par rayonnement, entre la vitre et le milieu extérieur, entre la saumure et la vitre dans le bassin principal, entre le film d'eau et la vitre 2 du distillateur solaire, type asymétrique et à double effet.

-Les coefficients d'échange thermique par convection, entre la vitre et le milieu extérieur, entre la saumure et la vitre (bassin principal), entre le film d'eau et la vitre 2 du distillateur solaire asymétrique et à double effet, entre l'absorbeur et l'eau de bassin, entre la base du deuxième compartiment (vitre 1) et le film d'eau.

- Calcul du coefficient d'échange thermique par évaporation entre la saumure et la vitre du bassin principal des deux distillateurs solaires et entre le film d'eau et la vitre 2 du deuxième compartiment du distillateur solaire, type asymétrique et à double effet.

On dispose à présent des valeurs des propriétés de l'eau et des différents coefficients d'échange qui vont nous permettre de calculer les différents éléments de la matrice A et du vecteur B (voir discrétisation IV.10), sous forme d'un système d'équation linéaire à résoudre :

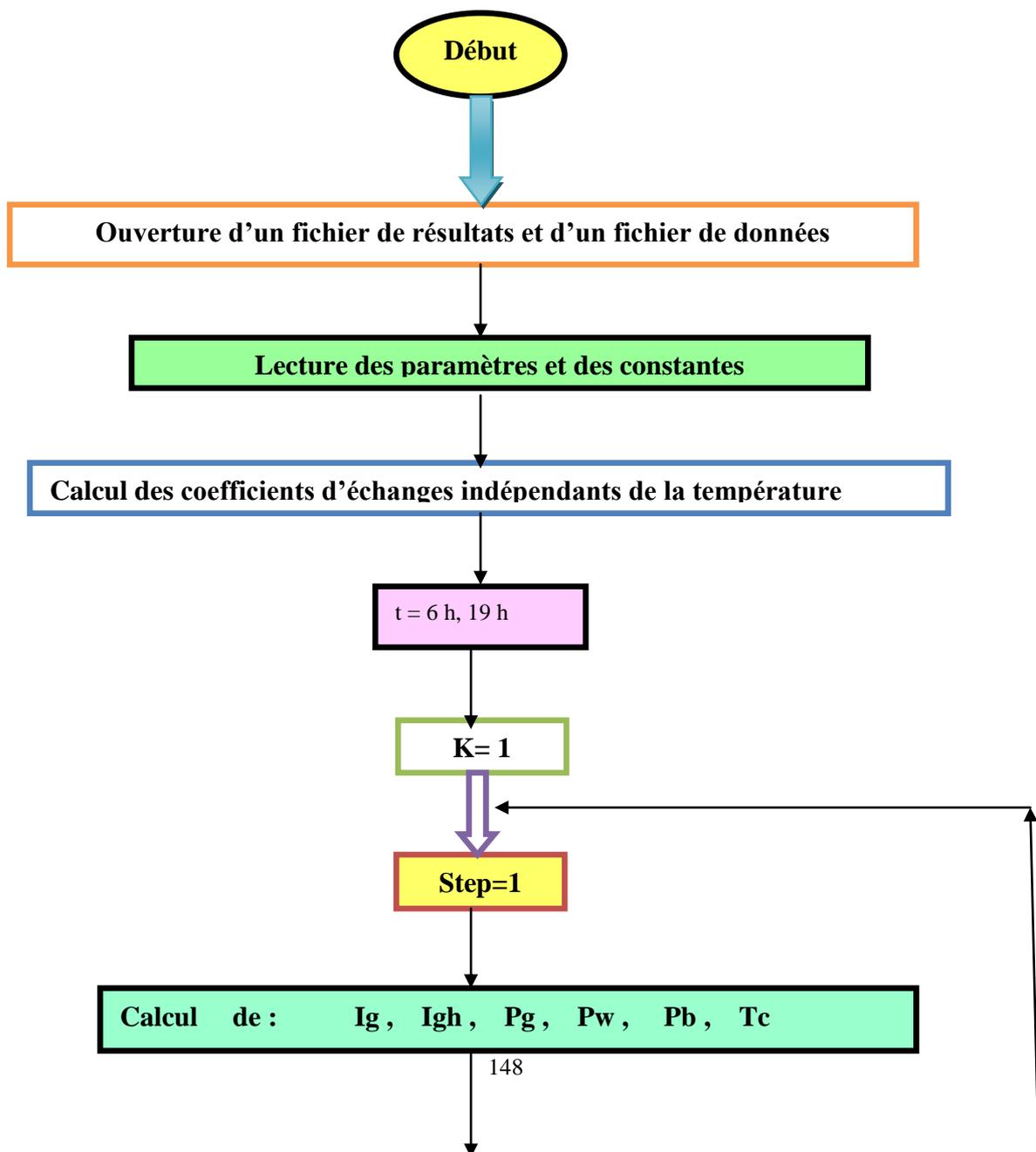
$A * T = B$. Il existe en mathématique plusieurs méthodes de résolution d'un tel système. Pour économiser l'espace mémoire, on a choisi la méthode Gauss Seidel avec la condition de convergence et une valeur d'epsilon qui sont déterminés (voir annexe). Le vecteur solution (T) généré, englobe les différentes températures recherchées soit du distillateur solaire, type symétrique avec $T = (T_{ge}, T_{gi}, T_w, T_b, T_{isi}, T_{ise})$ et du distillateur solaire, type asymétrique dont $T = (T_{ge2}, T_{gi2}, T_{wf}, T_{ge1}, T_w, T_b, T_{isi}, T_{ise})$.

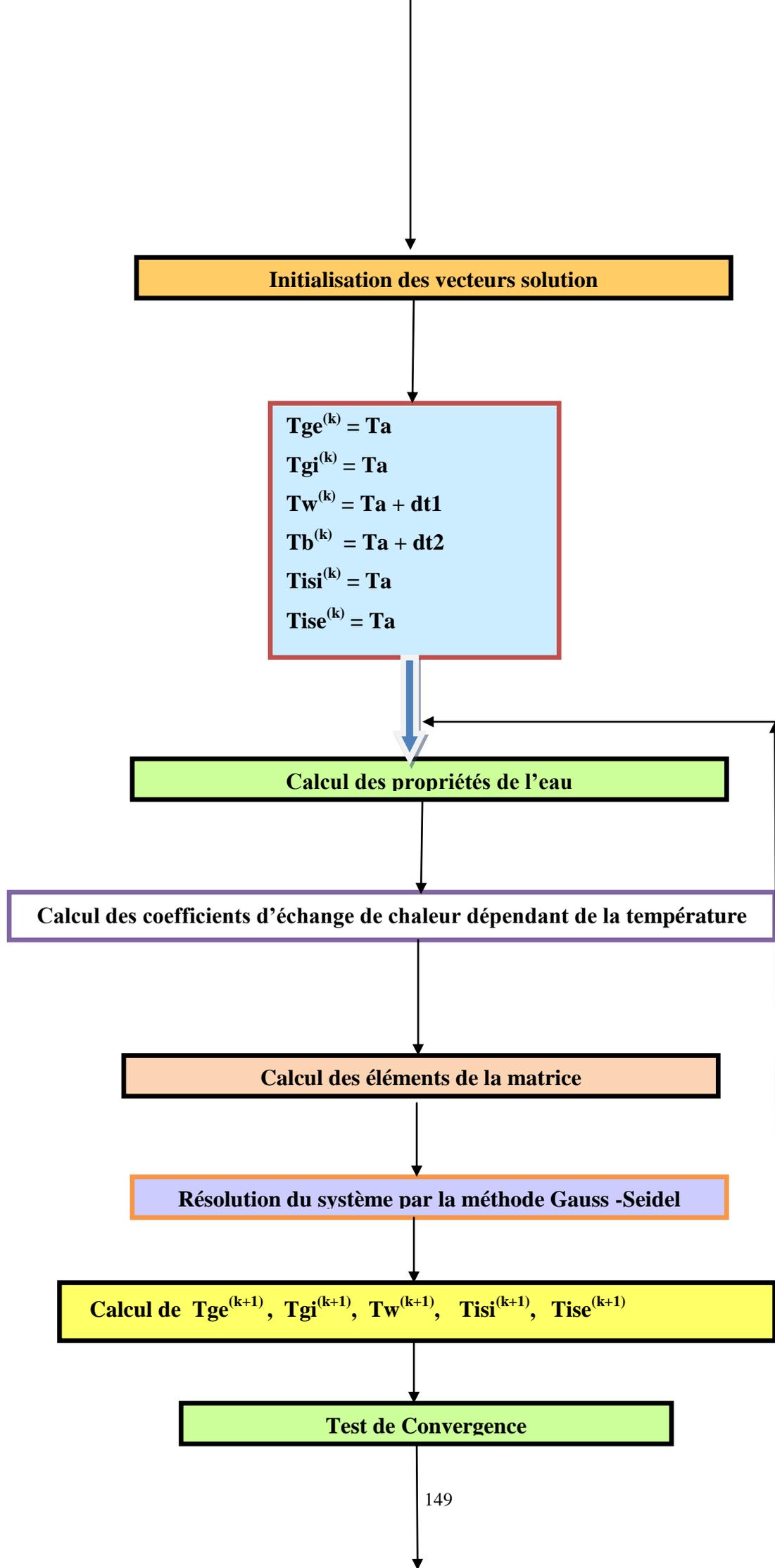
Cinquième étape :

Le calcul abordé dans cette étape du programme est représenté par la simulation des températures des différents composants pour chaque temps avec un intervalle égale à une heure.

Dans l'explication de l'enchaînement de ce processus du programme, on commence par le calcul des températures du temps initial à 6h heures puis on lance la 1^{ère} itération pour calculer les variations des températures. Les résultats ainsi trouvés sont considérées comme les températures initiales de l'itération suivante. Après déroulement de ce processus (testé expérimentalement), on aboutit aux températures résultats du temps initial 6 heures. On démarre à partir de ces températures pour calculer, de la même manière, les températures du temps suivant 7 heures, on refait ce processus jusqu'à l'expiration de tous les temps. En ce moment là, on peut évaluer nos résultats correspondant aux températures du système à chaque heure de la journée, nous permettant ensuite de calculer successivement le rendement horaire et journalier, l'efficacité interne et globale et la performance du système.

III.4.9.1 Organigramme général : Distillateur solaire type symétrique





Initialisation des vecteurs solution

$T_{ge}^{(k)} = T_a$
 $T_{gi}^{(k)} = T_a$
 $T_w^{(k)} = T_a + dt1$
 $T_b^{(k)} = T_a + dt2$
 $T_{isi}^{(k)} = T_a$
 $T_{ise}^{(k)} = T_a$

Calcul des propriétés de l'eau

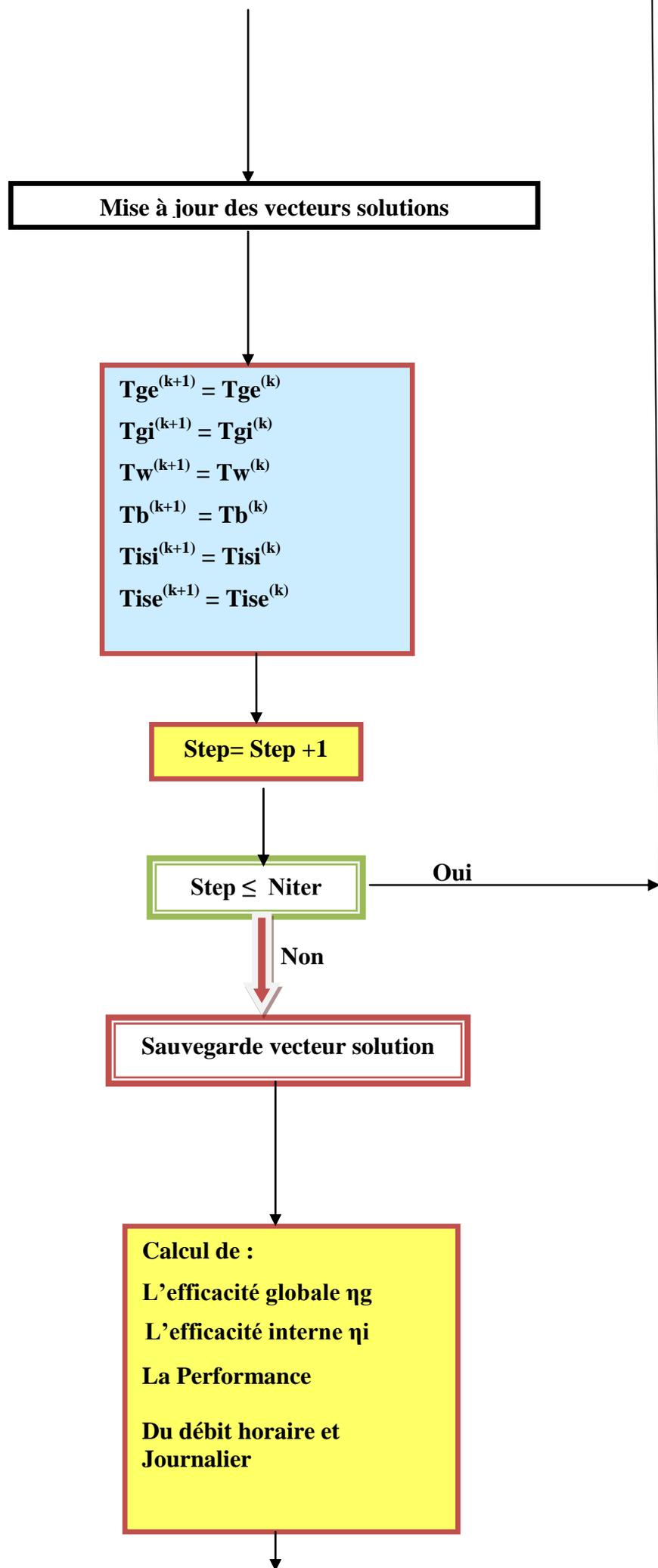
Calcul des coefficients d'échange de chaleur dépendant de la température

Calcul des éléments de la matrice

Résolution du système par la méthode Gauss-Seidel

Calcul de $T_{ge}^{(k+1)}$, $T_{gi}^{(k+1)}$, $T_w^{(k+1)}$, $T_{isi}^{(k+1)}$, $T_{ise}^{(k+1)}$

Test de Convergence



Mise à jour des vecteurs solutions

$$\begin{aligned} Tge^{(k+1)} &= Tge^{(k)} \\ Tgi^{(k+1)} &= Tgi^{(k)} \\ Tw^{(k+1)} &= Tw^{(k)} \\ Tb^{(k+1)} &= Tb^{(k)} \\ Tisi^{(k+1)} &= Tisi^{(k)} \\ Tise^{(k+1)} &= Tise^{(k)} \end{aligned}$$

Step = Step + 1

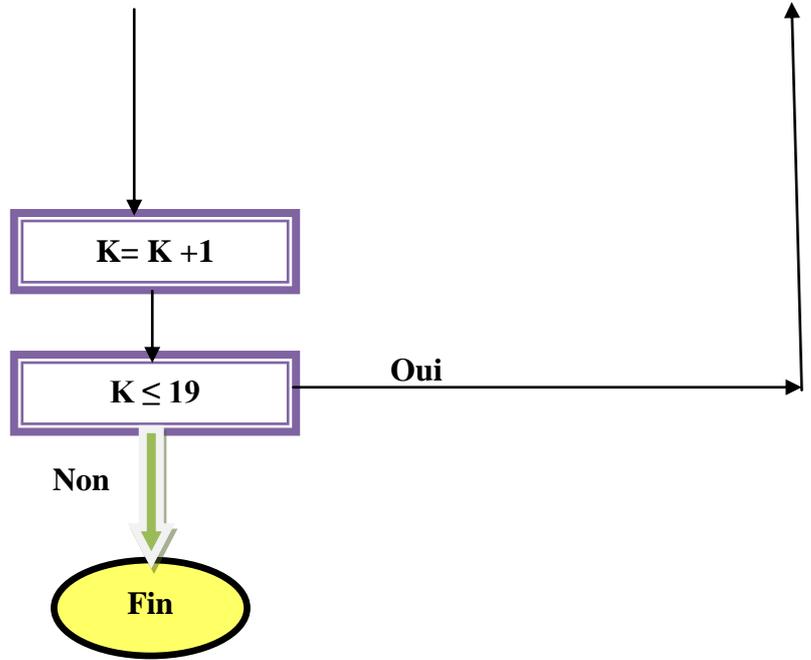
Step ≤ Niter

Oui

Non

Sauvegarde vecteur solution

Calcul de :
L'efficacité globale η_g
L'efficacité interne η_i
La Performance
Du débit horaire et
Journalier



III. 4. 9. 1.1 Discrétisation des équations de transfert thermique du distillateur solaire, type symétrique

Les équations de transfert thermique, régnant au niveau du système, à chaque nœud de la maille et en régime transitoire sont discrétisées et ordonnées, par rapport aux températures :

1. Au niveau de la couverture

▪ Face extérieure de la vitre

$$\frac{m_g \times Cp_g}{2A_g} \times \frac{(Tge(j) - Tge^*(j))}{\Delta t} + h_{r,g-a} \times (Tge(j) - Tc) + h_{c,g-a} \times (Tge(j) - Ta) = \frac{\lambda_g}{e_g} \times (Tgi(j) - Tge(j)) \quad (\text{III.91})$$

▪ Face intérieure de la vitre

$$\frac{m_g \times Cp_g}{2A_g} \times \frac{(Tgi(j) - Tgi^*(j))}{\Delta t} + \frac{\lambda_g}{e_g} \times (Tgi(j) - Tge(j)) = h_1 \times (Tw(j) - Tgi(j)) + P_g \quad (\text{III.92})$$

2. Au niveau de la saumure

$$\frac{m_w \times Cp_w}{A_w} \times \frac{(Tw(j) - Tw^*(j))}{\Delta t} + h_1 (Tw(j) - Tgi(j)) = P_w + h_{c,b-w} \times (Tb(j) - Tw(j)) \quad (\text{III.93})$$

3. Au niveau de la plaque absorbante

$$\frac{m_b \times Cp_b}{A_b} \times \frac{(Tb(j) - Tb^*(j))}{\Delta t} + h_{c,b-w} \times (Tb(j) - Tw(j)) + h_{cd,b-is} \times (Tb(j) - Tisi(j)) = P_b \quad (\text{III.94})$$

4. Au niveau de l'isolant

▪ Face intérieure de l'isolant

$$\frac{M_{is} \times Cp_{is}}{A_{is}} \times \frac{(T_{isi}(j) - T_{isi}^*(j))}{\Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j)) = h_{cd,b-is} \times (T_b(j) - T_{isi}(j)) \quad (III.95)$$

▪ Face extérieure de l'isolant

$$\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{A_{is}} \times \frac{(T_{ise}(j) - T_{ise}^*(j))}{\Delta t} + U_{is} \times (T_{ise}(j) - T_a) = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (T_{isi}(j) - T_{ise}(j)) \quad (III.96)$$

Note: Dans ces équations, Δt désigne le pas de temps et (*) le temps $(t - \Delta t)$.

Le développement du système d'équations sera ainsi ordonné comme suit :

Face extérieure de la vitre

$$\begin{aligned} \frac{m_g \times Cp_g}{2A_g \times \Delta t} \times T_{ge}(j) + (h_{r,g-a} + h_{c,g-a} + \frac{\lambda_g}{eg}) \times T_{ge}(j) - \frac{\lambda_g}{eg} \times T_{gi}(j) = \\ \frac{m_g \times Cp_g}{2A_g \times \Delta t} \times T_{ge}^*(j) + h_{r,g-a} \times T_c + h_{c,g-a} \times T_a \end{aligned} \quad (III.97)$$

Face intérieure de la vitre

$$-\frac{\lambda_g}{eg} \times T_{ge}(j) + \left(\frac{m_g \times Cp_g}{2A_g \times \Delta t} + \frac{\lambda_g}{eg} + h_1 \right) \times T_{gi}(j) - h_1 \times T_w(j) = \frac{m_g \times Cp_g}{2A_g \times \Delta t} \times T_{gi}^*(j) + P_g \quad (III.98)$$

Au niveau de la saumure

$$-h_1 \times T_{gi}(j) + \left(\frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_1 + h_{c,b-w} \right) \times T_w(j) - h_{c,b-w} \times T_b(j) = \frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} \times T_w^*(j) + P_w \quad (III.99)$$

Au niveau du bac absorbant

$$-h_{bw}^c \times T_w(j) + \left(\frac{m_b \times Cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{c,b-w} + h_{cd,b-is} \right) \times T_b(j) - h_{cd,b-is} \times T_{isi}(j) = \frac{m_b \times Cp_b}{A_b \times \Delta t} \times T_b(j) + P_b \quad (III.100)$$

Face intérieure de l'isolant

$$-h_{cd,b-is} \times T_b(j) + \left(\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} + h_{cd,b-is} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \right) \times T_{isi}(j) - \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times T_{ise}(j) = \frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j) \quad (III.101)$$

Face extérieure de la vitre

$$-\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times T_{isi}(j) + \left(\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + U_{is} \right) \times T_{ise}(j) - U_{is} \times T_a = \frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j) \quad (III.102)$$

Ces équations forment un système d'équations linéaires sous forme $A^* X = B$. On résout ce système par les méthodes itératives de Gauss Seidel (voir annexes).

On forme la matrice A, qui s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{ge} \\ T_{gi} \\ T_w \\ T_b \\ T_{isi} \\ T_{ise} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{pmatrix} \quad (\text{III.103})$$

Avec

$$A_{11} = \frac{m_g \times Cp_g}{2A_g \times \Delta t} + h_{r,g-a} + h_{c,g-a} + \frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{12} = -\frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$A_{21} = -\frac{\lambda_g}{e_g}$$

$$A_{22} = \left(\frac{m_g \times Cp_g}{2A_g \times \Delta t} + \frac{\lambda_g}{e_g} + h_1 \right)$$

$$A_{23} = -h_1$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -h_1$$

$$A_{33} = \left(\frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_{c,b-w} + h_1 \right)$$

$$A_{34} = -h_{c,b-w}$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = 0$$

$$A_{44} = \left(\frac{m_b \times Cp_b}{A_b * \Delta t} + h_{c,b-w} + h_{cd,b-is} \right)$$

$$A_{45} = -h_{cd,b-is}$$

$$A_{46} = 0$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = -h_{cd,b-is}$$

$$A_{55} = \left(\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} * \Delta t} + h_{cd,b-is} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \right)$$

$$A_{56} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{66} = \left(\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} * \Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + U_{is} \right)$$

$$B_1 = \frac{m_g \times Cp_g}{2A_g \times \Delta t} \times Tge^*(j) + h_{r,g-a} \times Tc + h_{c,g-a} \times Ta$$

$$B_2 = \frac{m_g \times Cp_g}{2A_g * \Delta t} \times Tgi^*(j) + Pg$$

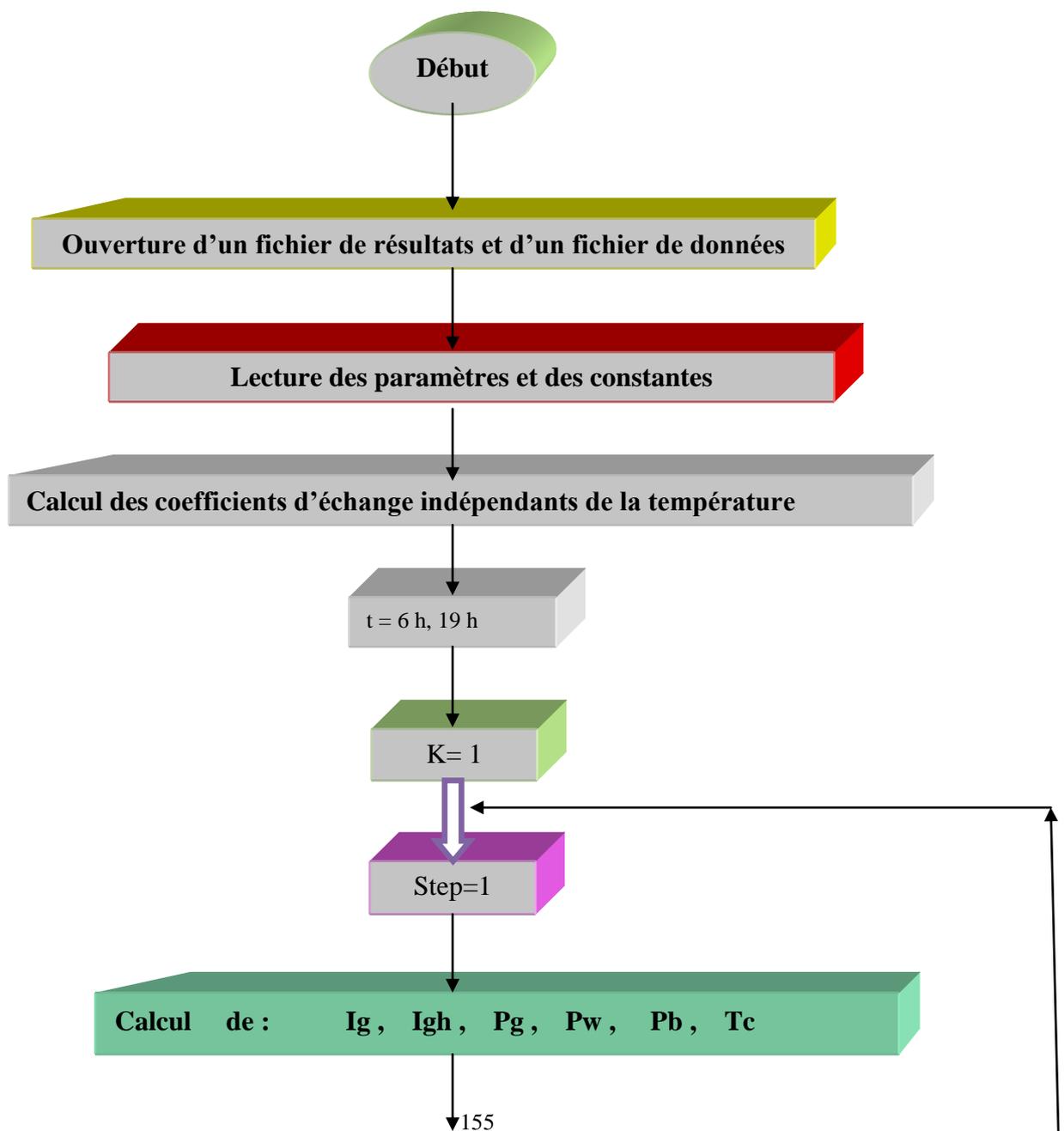
$$B_3 = \frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} \times Tw^*(j) + Pw$$

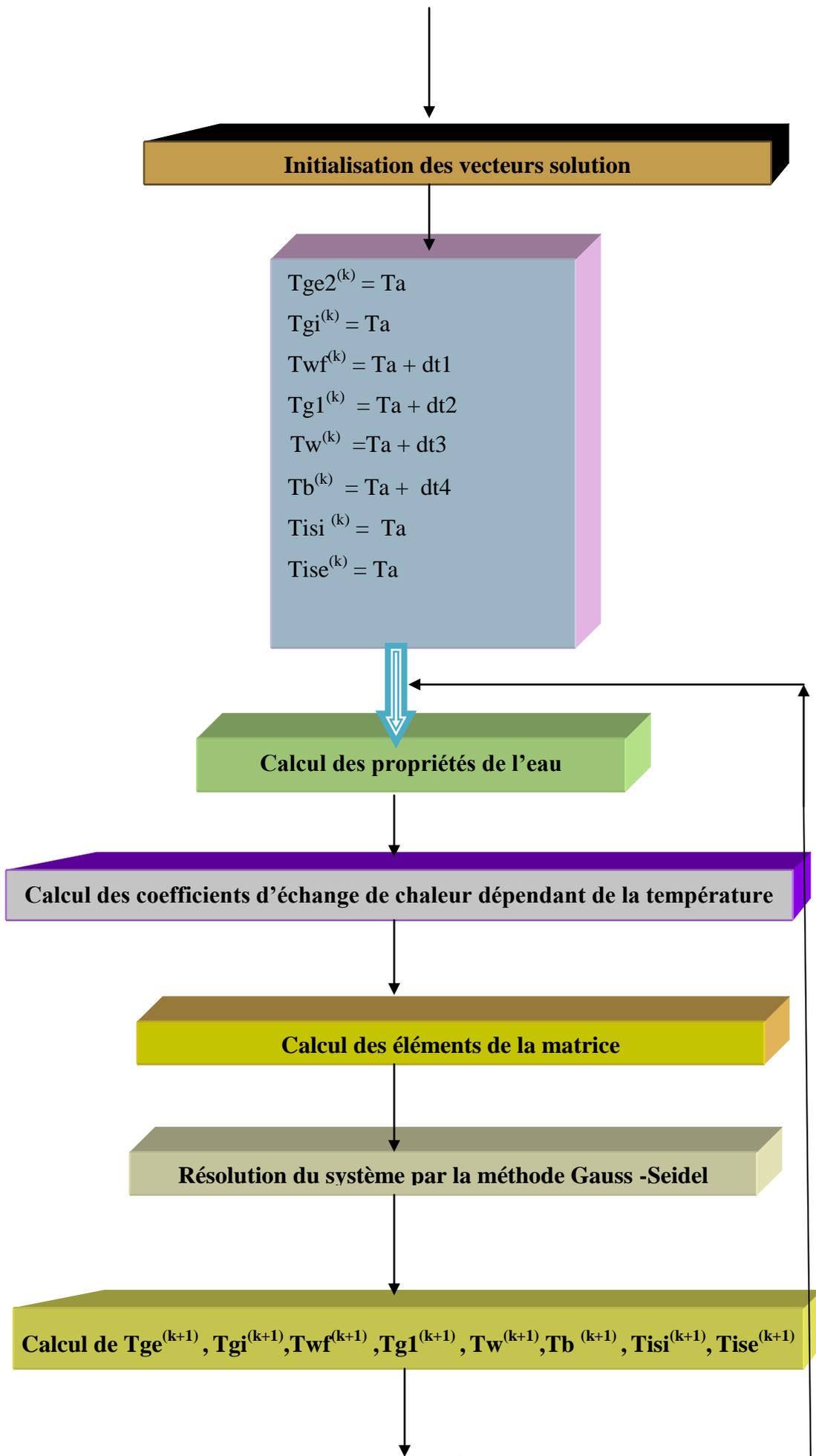
$$B_4 = \frac{m_b \times Cp_b}{A_b \times \Delta t} \times Tb^*(j) + Pb$$

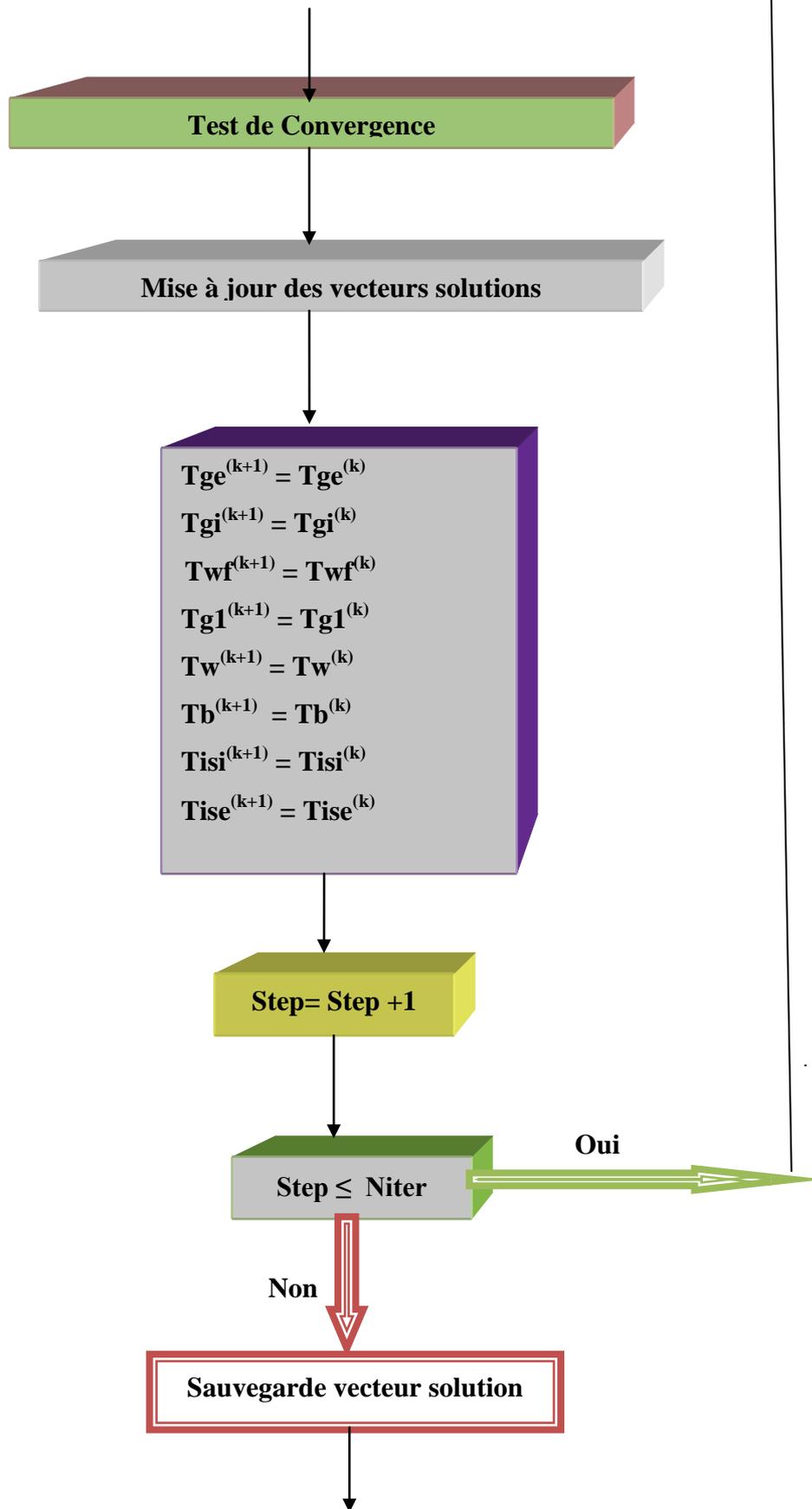
$$B_5 = \frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times T_{isi}^*(j)$$

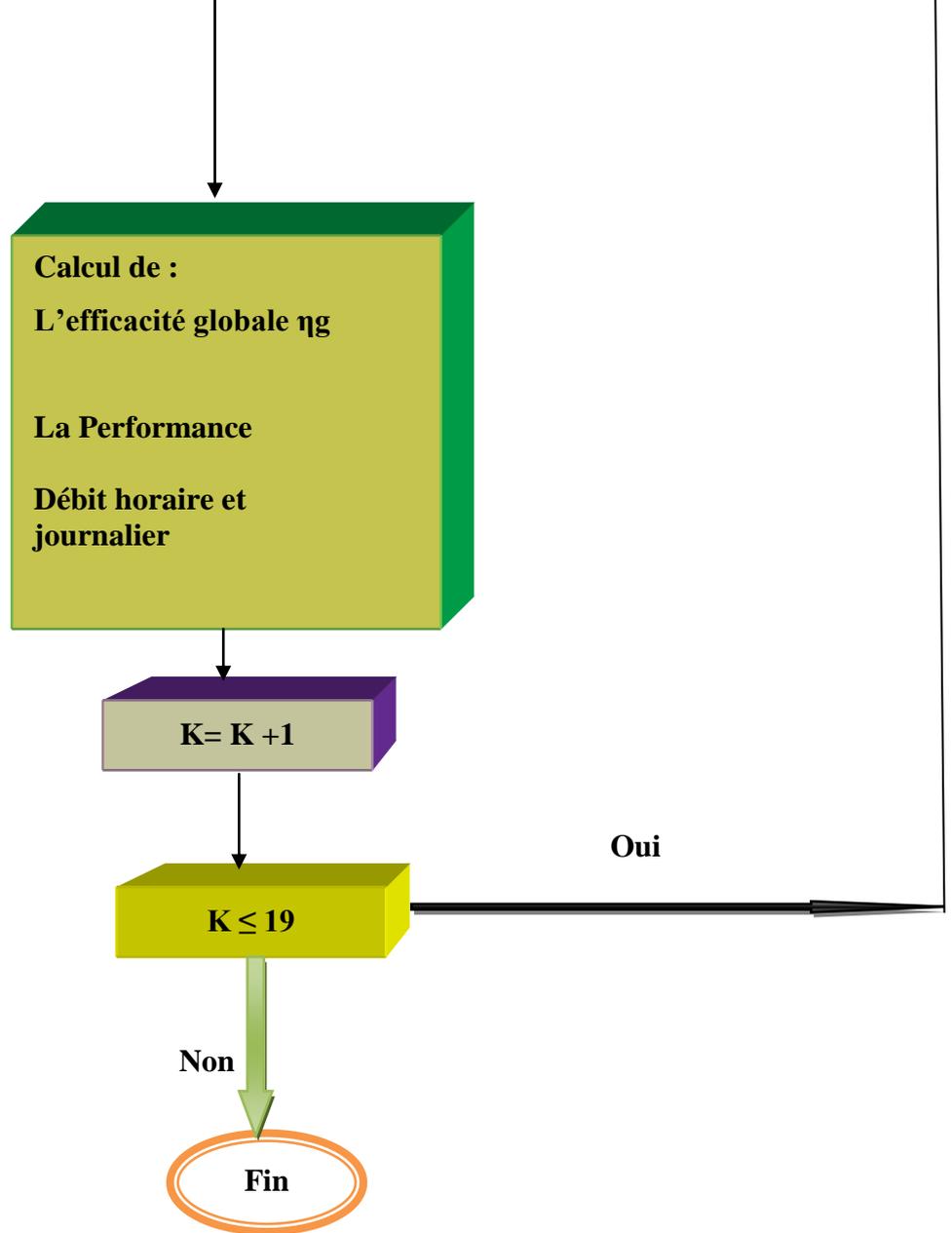
$$B_6 = \frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times T_{ise}^*(j) + U_{is} \times Ta$$

III. 4. 9. 2 Organigramme général : Distillateur solaire, type Asymétrique









III. 4. 9. 2.1 Discrétisation des équations de transfert thermique du distillateur solaire type asymétrique

Les équations de transfert thermique, régnant au niveau du système, à chaque nœud de la maille et en régime transitoire sont discrétisées et ordonnées, par rapport aux températures :

1. Au niveau de la Couverture 2

Face extérieure de la vitre2

$$\begin{aligned} & \frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2Ag_2} \times \frac{(Tge_2(j) - Tge_2^*(j))}{\Delta t} + h_{r,g-c} \times (Tge_2(j) - Tc) + h_{c,g2-a} \times (Tge_2(j) - Ta) \\ & = \frac{\lambda_{g2}}{e_{g2}} \times (Tgi_2(j) - Tge_2(j)) \end{aligned}$$

(III.104)

Face intérieure de la vitre 2

$$\frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2A_{g2}} \times \frac{(Tgi_2(j) - Tgi_2^*(j))}{\Delta t} + \frac{\lambda_{g2}}{e_{g2}} \times (Tgi_2(j) - Tge_2(j)) = h_1 \times (Twf(j) - Tgi_2(j)) + Pg_2 \quad (\text{III.105})$$

Au niveau du film d'eau

$$\frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_{wf}} \times \frac{(Twf(j) - Twf^*(j))}{\Delta t} + h_{1wf} \times (Twf(j) - Tgi_2(j)) = P_{wf} + h_{c,g1-wf} \times (Tge_1(j) - Twf(j)) - (2) \times \frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_{wf}} \times (Twf(j) - Twf_{inlet}(j)) \quad (\text{III.106})$$

Au niveau de la couverture 1

Au niveau de la saumure (bassin principal)

$$\frac{m_w \times Cp_w}{A_w} \times \frac{(Tw(j) - Tw^*(j))}{\Delta t} + h_1(Tw(j) - Tg_1(j)) = H_w(t) + h_{c,b-w} \times (Tb(j) - Tw(j)) \quad (\text{III.107})$$

Au niveau du bac absorbant

$$\frac{m_b \times Cp_b}{A_b} \times \frac{(Tb(j) - Tb^*(j))}{\Delta t} + h_{c,b-w} \times (Tb(j) - Tw(j)) + h_{cd,b-is} \times (Tb(j) - Tisi(j)) = H_b(t) \quad (\text{III.108})$$

Au niveau de l'isolant

Face intérieure de l'isolant

$$\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is}} \times \frac{(Tisi(j) - Tisi^*(j))}{\Delta t} = h_{cd,b-is} \times (Tb(j) - Tisi(j)) \quad (\text{III.109})$$

Face extérieure de l'isolant

$$\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{A_{is}} \times \frac{(Tise(j) - Tise^*(j))}{\Delta t} = \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times (Tisi(j) - Tise(j)) - Uis(Tise(j) - Ta) \quad (\text{III.110})$$

Note: Dans ces équations, Δt désigne le pas de temps et (*) le temps $(t - \Delta t)$.

Le développement du système d'équations sera ainsi ordonné comme suit :

Couverture 2

Face extérieure

$$\begin{aligned} & \frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2Ag_2 \times \Delta t} + (h_{r,g2-c} + h_{c,g2-a} + \frac{\lambda_{g2}}{eg_2}) \times Tge_2(j) - \frac{\lambda_{g2}}{eg_2} (Tgi_2(j)) \\ & = \frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2Ag_2 \times \Delta t} \times (Tge_2^*(j)) + h_{r,g-c} \times (Tc) + h_{c,g-a} \times (Ta) \end{aligned} \quad (III.111)$$

Face intérieure

$$-\frac{\lambda_{g2}}{eg_2} \times Tge_2(j) + \left(\frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2A_{g2} \times \Delta t} + \frac{\lambda_{g2}}{eg_2} + h_1 \right) \times Tgi_2(j) - h_1 \times Twf(j) = \frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2A_{g2} \times \Delta t} \times Tgi_2^*(j) + H_{g2}(t) \quad (III.112)$$

Film d'eau

$$\begin{aligned} & -h_1 \times Tgi_2(j) + \left(\frac{m_w \times Cp_{wf}}{A_w \times \Delta t} + h_{1wf} + h_{c,g1-wf} + 2 \frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_{wf}} \right) \times Twf(j) - h_{c,g1-wf} \times (Tge_1(j)) \\ & - 2 \frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_{wf}} \times Twf_{inlet}(j) = \frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_{wf} \times \Delta t} \times Twf^*(j) + H_{wf}(t) \end{aligned} \quad (III.113)$$

Au niveau de la Vitre 1

$$\begin{aligned} & -h_{c,g1-wf} \times (Twf(j)) + \left(\frac{m_{g1} \times Cp_{g1}}{A_{g1} \times \Delta t} + h_{1,w-g1} + h_{c,g1-wf} \right) \times (Tg_1(j) - h_{1,w-g1} \times (Tw(j))) = \\ & \left(\frac{m_{g1} \times Cp_{g1}}{A_{g1} \times \Delta t} \right) \times (Tg_1(j)^*) + H_{g1}(t) \end{aligned} \quad (III.114)$$

Au niveau de la saumure

$$-h_{1,w-g1} \times (Tg_1(j)) + \left(\frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_{1,w-g1} + h_{c,b-w} \right) \times (Tw(j)) - h_{c,b-w} \times (Tb(j)) = \frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} \times (Tw^*(j)) + H_w(t) \quad (III.115)$$

Au niveau de l'absorbeur

$$\begin{aligned} & -h_{c,b-w} \times Tw(j) + \left(\frac{m_b \times Cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{c,b-w} + h_{cd,b-is} \right) \times Tb(j) - h_{cd,b-is} \times Tisi(j) \\ & = \frac{m_b \times Cp_b}{A_b \times \Delta t} \times (Tb^*(j)) + H_b(t) \end{aligned} \quad (III.116)$$

Face intérieure de l'isolant

$$-h_{cd,b-is} \times (Tb(j)) + \left(\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \Delta t} + h_{cd,b-is} \right) \times Tisi(j) - \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times T_{isi}(j) = \frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times (Tisi^*(j)) \quad (III.117)$$

Face extérieure de l'isolant

$$-\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \times Tisi(j) + \left(\frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + U_{is} \right) \times Tise(j) = \frac{M_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times Tise^*(j) + U_{is} \times (Ta) \quad (III.118)$$

Ces équations forment un système d'équations linéaires sous forme $A^* X = B$. On résout ce système par les méthodes itératives de Gauss Seidel (voir annexe).

On forme la matrice A, qui s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \cdot A_{17} \cdot A_{18} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \cdot A_{27} \cdot A_{28} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \cdot A_{37} \cdot A_{38} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \cdot A_{47} \cdot A_{48} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \cdot A_{57} \cdot A_{58} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \cdot A_{67} \cdot A_{68} \\ A_{71} \cdot A_{72} \cdot A_{73} \cdot A_{74} \cdot A_{75} \cdot A_{76} \cdot A_{77} \cdot A_{78} \\ A_{81} \cdot A_{82} \cdot A_{83} \cdot A_{84} \cdot A_{85} \cdot A_{86} \cdot A_{87} \cdot A_{88} \end{pmatrix} \mathbf{x} = \begin{pmatrix} Tge_2 \\ Tgi_2 \\ Twf \\ Tg_1 \\ Tw \\ Tb \\ Tisi \\ Tise \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \end{pmatrix}$$

(III.119)

Avec

$$A_{11} = \frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2A_{g2} \times \Delta t} + h_{r,g-a} + h_{c,g-a} + \frac{\lambda_{g2}}{e_{g2}}$$

$$A_{12} = -\frac{\lambda_{g2}}{e_{g2}}$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{14} = 0$$

$$A_{16} = 0$$

$$A_{17} = 0$$

$$A_{18} = 0$$

$$A_{21} = -\frac{\lambda_{g2}}{e_{g2}}$$

$$A_{22} = \left(\frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2A_{g2} \times \Delta t} + \frac{\lambda_{g2}}{e_{g2}} + h_1 \right)$$

$$A_{23} = -h_1$$

$$A_{24} = 0$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{26} = 0$$

$$A_{27} = 0$$

$$A_{28} = 0$$

$$A_{31} = 0$$

$$A_{32} = -h_1$$

$$A_{33} = \left(\frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_w \times \Delta t} + h_{c,g1-wf} + h_{1wf} + 2 \frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_{wf}} \right)$$

$$A_{34} = -h_{c,g1-wf}$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{36} = 0$$

$$A_{37} = 0$$

$$A_{38} = 0$$

$$A_{41} = 0$$

$$A_{42} = 0$$

$$A_{43} = -h_{c,g1-wf}$$

$$A_{44} = \left(\frac{m_{g1} \times Cp_{g1}}{A_{g1} \times \Delta t} + h_{c,w-g1} + h_{c,g1-wf} \right)$$

$$A_{45} = -h_{1,w-g1}$$

$$A_{46} = 0$$

$$A_{47} = 0$$

$$A_{48} = 0$$

$$A_{51} = 0$$

$$A_{52} = 0$$

$$A_{53} = 0$$

$$A_{54} = h_{1,w-g1}$$

$$A_{55} = \left(\frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} + h_{1,w-g1} + h_{c,b-w} \right)$$

$$A_{56} = -h_{c,b-w}$$

$$A_{57} = 0$$

$$A_{58} = 0$$

$$A_{61} = 0$$

$$A_{62} = 0$$

$$A_{63} = 0$$

$$A_{64} = 0$$

$$A_{65} = -h_{c,b-w}$$

$$A_{66} = \left(\frac{m_b \times Cp_b}{A_b \times \Delta t} + h_{c,b-w} + h_{cd,b-is} \right)$$

$$A_{67} = -h_{cd,b-is}$$

$$A_{68} = 0$$

$$A_{71} = 0$$

$$A_{72} = 0$$

$$A_{73} = 0$$

$$A_{74} = 0$$

$$A_{75} = 0$$

$$A_{76} = -h_{cd,b-is}$$

$$A_{77} = \frac{m_{is} Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} + h_{cd,b-is}$$

$$A_{78} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{81} = 0$$

$$A_{82} = 0$$

$$A_{83} = 0$$

$$A_{84} = 0$$

$$A_{85} = 0$$

$$A_{86} = 0$$

$$A_{87} = -\frac{\lambda_{is}}{e_{is}}$$

$$A_{88} = \frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} + U_{is}$$

$$B_1 = \frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2Ag_2 \times \Delta t} \times (Tge_2 * (j)) + h_{r,g-c} \times (Tc) + h_{c,g-a} \times (Ta) + Hg_2(t)$$

$$B_2 = \frac{m_{g2} \times Cp_{g2}}{2A_{g2} \times \Delta t} \times Tgi_2 * (j)$$

$$B_3 = \frac{m_{wf} \times Cp_{wf}}{A_{wf} \times \Delta t} \times Twf * (j) + Hwf(t)$$

$$B_4 = \left(\frac{m_{g1} \times Cp_{g1}}{A_{g1} \times \Delta t} \right) \times (Tg_1 1^*) + H_{g1}(t)$$

$$B_5 = \frac{m_w \times Cp_w}{A_w \times \Delta t} \times (Tw^*(j)) + H_w(t)$$

$$B_6 = \frac{m_b \times Cp_b}{A_b \times \Delta t} \times (Tb^*(j)) + H_b(t)$$

$$B_7 = \frac{m_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times (Tisi^*(j))$$

$$B_8 = \frac{M_{is} \times Cp_{is}}{2A_{is} \times \Delta t} \times Tise^*(j) + U_{is} \times (Ta)$$

Chapitre IV. Résultats et discussion

IV.1 Introduction

La résolution des systèmes d'équations différentielles non linéaires se concrétise à travers un programme de simulation numérique développé en langage « Matlab » et en application de la méthode itérative implicite de Gauss-Seidel [163], où un pas de temps égal à une heure est utilisé dans la simulation. Ceci, nous a permis d'obtenir des résultats en conformité avec les objectifs fixés auparavant : Etude et comparaison entre deux modèles de distillateurs solaires symétriques et asymétrique à effet de serre implantés dans la région de Constantine.

En tenant compte des coordonnées géographiques du lieu d'implantation : avec une latitude de $36^{\circ}22'$ et une longitude de $6^{\circ} 37'$, et dans des conditions climatiques, où le choix du jour de calcul s'est fait à partir des statistiques données par le Journal de la météo underground 2013; représenté par la journée du 1^{er} Aout 2005 (choix décennal :2002-2012), et qui est caractérisée par un ciel clair , et où la température ambiante maximale à atteint 44°C et la température moyenne était relativement élevée par rapport aux autres journées. Cette étude, est basée sur un facteur principal, représenté par l'effet des différentes orientations : est- ouest et sud-nord, sur la performance des deux systèmes. En plus, nous avons pris en considération l'impact de certains paramètres opérationnels tels que l'angle d'inclinaison, la profondeur de l'eau de bassin, l'effet des coefficients d'échange internes et externes et enfin l'effet de l'épaisseur de l'isolant sur la productivité des deux distillateurs cités auparavant. Ainsi, les résultats obtenus sont utilisés pour comparer le rendement relatif aux deux unités de distillateurs solaires, en vue de sélectionner le distillateur le plus performant.

IV.2. Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.

Les figures (IV.1 à IV.4) représentent la variation temporelle de la température ambiante de la journée considérée et de l'intensité du rayonnement solaire aux différents angles d'inclinaison (10° , 30° et 45°) dans les différentes orientations possibles : est –ouest et

sud –nord, pour respectivement les deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre.

La variation journalière du rayonnement solaire des deux distillateurs solaires montre un changement (comportement) identique par rapport aux différentes orientations et ce pour les deux unités de distillation et où on peut constater que l'allure des courbes du rayonnement solaire croît, continuellement, avec le temps jusqu'à atteindre sa valeur maximale, puis ensuite, elle diminue progressivement pour enfin atteindre son niveau (valeur) minimum, vers la fin de la journée.

Avec plus détail, il est intéressant d'observer l'allure des courbes du rayonnement solaire concernant respectivement l'orientation est – ouest (figures IV.1 et IV. 3) et l'orientation sud –nord (figures IV.2 et IV.4) des distillateurs solaires symétrique et asymétrique et à effet de serre, en tenant compte de la variation des angles d'inclinaison du plus petit 10° au moyen 30° jusqu'au plus grand 45° .

A travers les figures (IV.1 et IV. 3), on constate que durant la période de la matinée, le rayonnement solaire commence à augmenter rapidement concernant l'orientation est –ouest, avec une meilleure réception enregistrée pour les angles d'inclinaison et en ordre croissant allant de 10° à 45° respectivement. Contrairement et durant l'après midi, on constate un effet inverse qui se produit pour la même orientation, pour les différents angles d'inclinaison, où le rayonnement solaire commence à diminuer rapidement et en ordre décroissant allant du plus grand 45° jusqu'au plus petit de 10° en passant par l'angle 30° .

Les figures (IV.2 et IV.4) montrent la variation horaire du rayonnement solaire pour l'orientation sud – nord, aux différents angles d'inclinaison de la journée considérée qui est la plus chaude. On constate que les courbes du rayonnement solaire se comportent de façon uniforme vis-à-vis du rayonnement solaire reçu par les deux unités de distillation pour les différents angles d'inclinaison. Durant la matinée, le rayonnement horaire croît avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison (de 10° à 45°) jusqu' à atteindre sa valeur maximale. Tandis que durant la période de l'après midi, le même phénomène se poursuit, et cette fois ci en ordre décroissant et avec des valeurs maximales enregistrés pour respectivement des angles d'inclinaison de 10° , 30° et 45° .

Pour compléter la description du cycle pris par l'allure des courbes du rayonnement solaire des deux modèles de distillateurs solaires, implantés dans de différentes orientations, ainsi que le changement subi par rapport aux angles d'inclinaison, nous avons établi une comparaison entre les valeurs maximales du rayonnement solaire dans les conditions décrites auparavant.

En effet, pour le distillateur solaire type asymétrique à double effet et à une seule face, les figures (IV.1 et IV.2), montrent les valeurs maximales du rayonnement solaire obtenues dans les directions est-ouest et sud-nord, pour les différents angles d'inclinaison de respectivement 10° , 30° et 45° , dont elles sont de l'ordre suivant : en avance d'une heure (11h00) de l'ordre de $944,26 \text{ W/m}^2$, de 2 heures (10h00) de l'ordre de $931,78 \text{ W/m}^2$, et de 3 heures (9h00) de l'ordre de $893,55 \text{ W/m}^2$, anticipant celles reçues lors de l'orientation sud-nord : à 12h00 de l'ordre de respectivement $978,97 \text{ W/m}^2$, $953,91 \text{ W/m}^2$ et $864,11 \text{ W/m}^2$.

Par contre, pour le distillateur solaire de type symétrique et à double pente (deux faces), les figures (IV.3 et IV.4) indiquent que les intensités maximales du rayonnement solaire reçu, concernant respectivement les orientations est-ouest et sud-nord et pour des angles d'inclinaison de respectivement 10° , 30° et 45° , sont en avance d'une heure (12h00) de l'ordre de $948,35 \text{ W/m}^2$, de 2 heures (11h00) de l'ordre de $931,82 \text{ W/m}^2$, et de 3 heures (10h00) de l'ordre de $902,88 \text{ W/m}^2$, anticipant celles reçues lors de l'orientation sud-nord : à 13h00 de l'ordre de respectivement $973,10 \text{ W/m}^2$, $947,57 \text{ W/m}^2$, et $857,91 \text{ W/m}^2$.

En outre, ces résultats sont vérifiés dans les figures (IV.5 et IV.6) spécifiant la variation des valeurs maximales du rayonnement solaire obtenues avec les angles d'inclinaison de respectivement 10° , 30° et 45° et concernant les deux types de distillateurs solaires : asymétrique et symétrique, orientés vers respectivement les directions est-ouest et sud-nord, où on peut constater les remarques suivantes:

- Le maximum de rayonnement solaire, par rapport aux différents angles d'inclinaison, pour différentes orientations et pour les deux types de distillateurs solaires est obtenu lors d'un angle d'inclinaison de la couverture à 10° .
- Ce maximum de rayonnement solaire est obtenu, lors de l'orientation sud-nord que lors de l'orientation est-ouest.
- Ces mêmes valeurs maximales du rayonnement solaire se distinguent au niveau du distillateur solaire de type asymétrique.

Cependant et lorsqu'on veut comparer globalement l'allure des courbes du rayonnement solaire atteignant les deux types de distillateurs solaires, par rapport aux angles d'inclinaison et par rapport aux orientations est-ouest et sud-nord et durant toute la journée considérée, on peut constater que :

- Au niveau de la direction est-ouest, la variation horaire du rayonnement solaire de la journée considérée change de position par rapport aux angles d'inclinaison.

- L'allure des courbes du rayonnement solaire est instable dans la direction considérée, elle est en décalage horaire vis-à-vis des différents angles d'inclinaison et pour les deux types de distillateurs solaires.

- Au niveau de la direction sud – nord, les courbes du rayonnement solaire indiquent qu'il ya une uniformité dans la réception du rayonnement solaire vis-à-vis des différents angles d'inclinaison, et où l'allure des courbes indique qu'il ya une nette stabilité en conformité avec une durée de réception plus longue. Cela peut être expliqué par la concordance de la réception d'un maximum de rayonnement solaire horaire simultanément avec les différents angles d'inclinaison et de la concentration du rayonnement solaire dans la direction considérée.

On peut donc conclure, à travers cette comparaison, que le maximum de rayonnement solaire est obtenu, pour les deux distillateurs solaires, au niveau de l'orientation sud –nord, pour les différents angles d'inclinaison de la couverture, où un maximum de rayonnement solaire est obtenu au niveau du distillateur solaire de type asymétrique à un angle d'inclinaison de 10° .

Un phénomène intéressant est remarqué dans cette étude, en l'occurrence, la possibilité de la pénétration rapide du rayonnement solaire à l'intérieur des unités de distillation, dont ceci est du aux caractéristiques optiques de la couverture en verre, qui se distingue par sa forte transmittance ainsi que sa faible réflectance. Ceci explique l'augmentation de la quantité d'irradiation qui passe au fond du bassin du distillateur qui est largement suffisante pour satisfaire les besoins en échauffement de l'eau de bassin.

Par ailleurs, avec un angle d'inclinaison de la vitre plus petit, la distance (la longueur caractéristique) représentée par une distance entre la couverture et l'eau de bassin (Hauteur du distillateur) au minimum, le passage du rayonnement solaire devient plus facile et atteignant rapidement l'eau de bassin et permettant aussi un maximum de volume d'air, mélangé avec la vapeur, d'être purgé au niveau de la zone de condensation [164]. En plus, il y a la contribution, non négligeable, d'une transmittance élevée de la couverture en verre, pour de différents angles d'inclinaison.

Ce résultat est en concordance avec l'étude expérimentale réalisée par Garg et Mann [150] qui ont trouvé lors de cette étude, portée sur un distillateur solaire à une seule pente (une seule face) et implanté dans une latitude élevée, reçoit plus de rayonnement solaire qu'un distillateur à double versant (double pente) implanté dans les mêmes conditions et où ces deux distillateurs sont orientés vers respectivement les directions est-ouest et sud-nord .

On peut déduire à travers les résultats obtenus, que le distillateur solaire de type asymétrique, à une seule face et à double effet est plus favorable à recevoir le maximum de rayonnement solaire pour une orientation sud-nord et avec un angle d'inclinaison optimale de 10° .

La distribution de la température ambiante dans la journée considérée (1^{er} août 2005) est représentée dans les figures (IV.1 à IV.4). A travers ces figures, on peut constater qu'il y a une distribution appropriée de la température, en particulier vers l'orientation sud-nord, pour les deux distillateurs solaires, et où la valeur la plus élevée de la température ambiante (44°C) est enregistrée aux environs de 13h00, coïncidant avec le même temps horaire, où l'intensité du rayonnement solaire atteint son maximum, pour le distillateur solaire de type symétrique. Cependant, pour le distillateur solaire de type asymétrique et à double effet, et dont la valeur maximale du rayonnement solaire reçu par ce dernier est en avance d'une heure par rapport à la valeur maximale de la température ambiante, qui est de l'ordre de 41°C , enregistrée à 12:00, pour l'orientation sud-nord. Cela nous indique que la conception de ce type de distillateur solaire produit plus de performance à cette orientation.

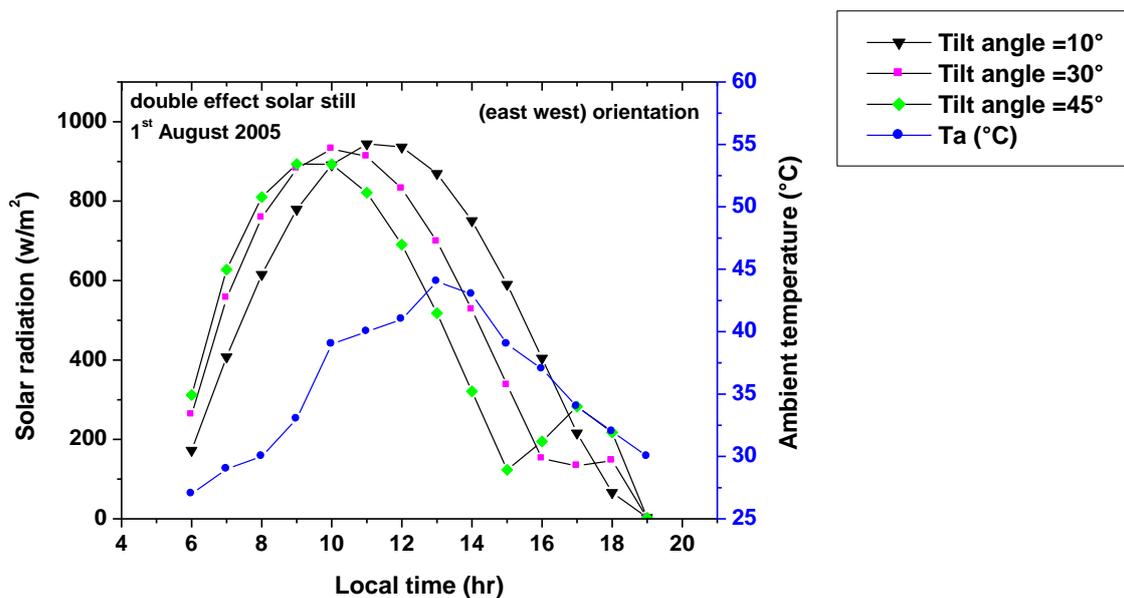


Figure IV.1 : Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type asymétrique à double effet orienté vers l'est – ouest.

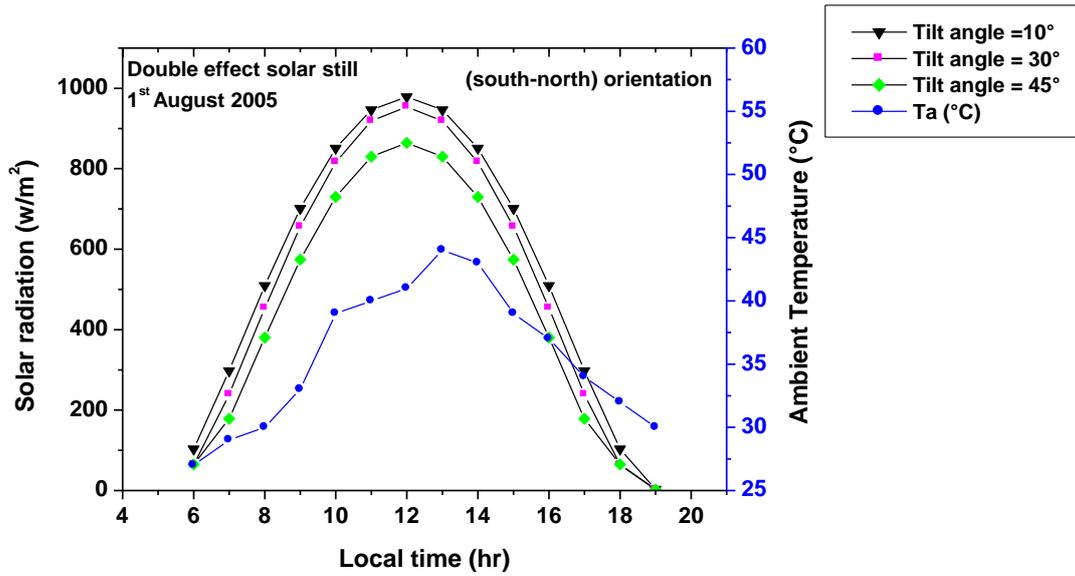


Figure IV.2 : Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type asymétrique à double effet orienté vers le sud – nord.

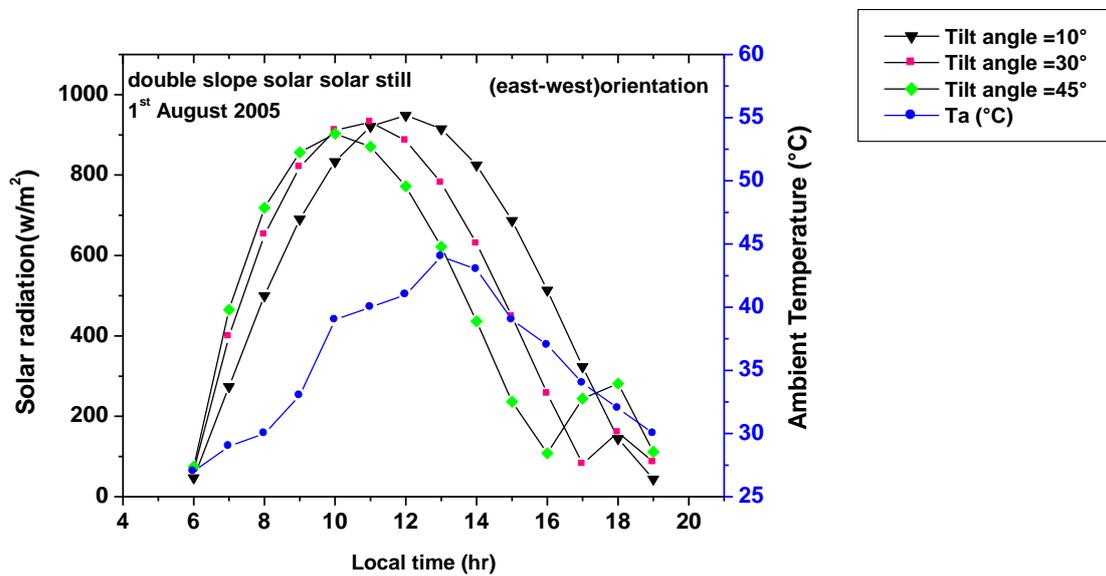


Figure IV.3 : Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type symétrique à double pente, orienté vers la direction est – ouest.

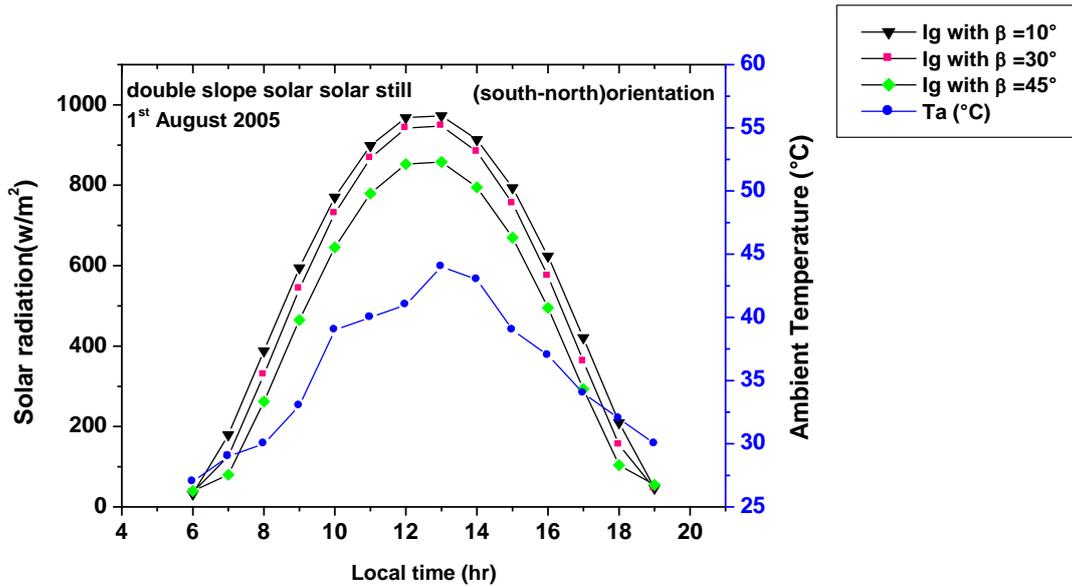


Figure IV.4 : Variation temporelle de la température ambiante et du rayonnement solaire incident avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type symétrique à double pente orienté vers la direction sud – nord.

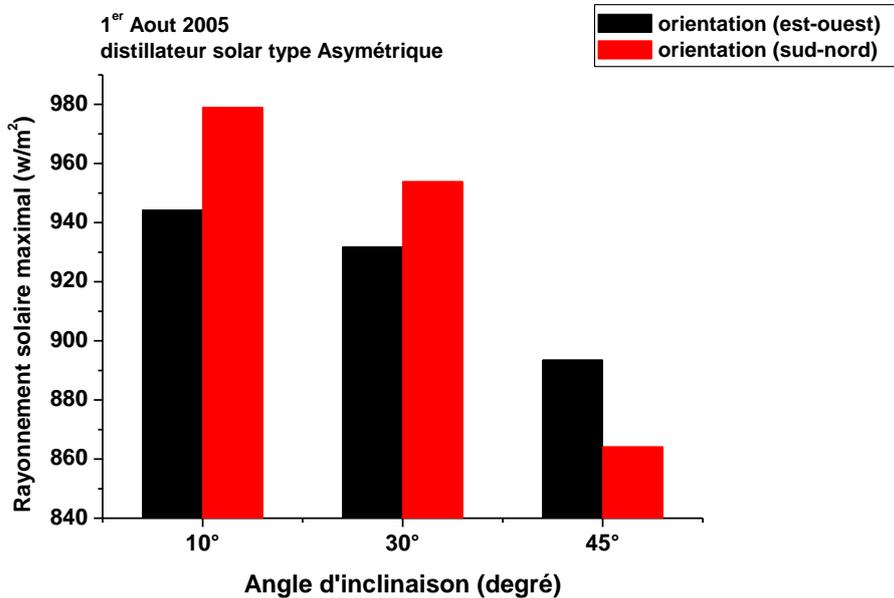


Figure IV.5 : Variation du rayonnement solaire incident (maximum) avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type asymétrique orienté vers les directions est-ouest et sud – nord.

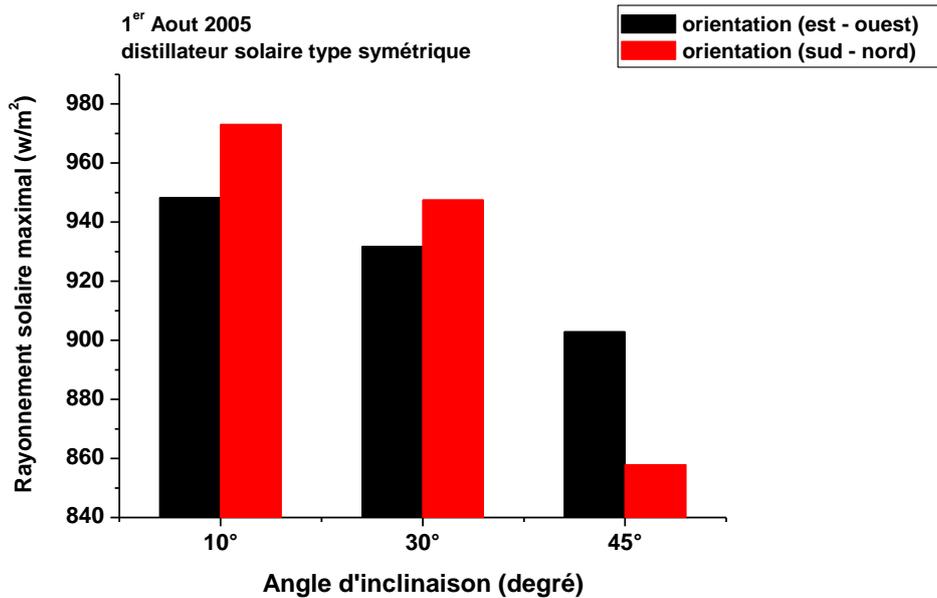


Figure IV.6 : Variation du rayonnement solaire incident (maximum) avec les différents angles d'inclinaison, pour un distillateur solaire de type symétrique orienté vers les directions est-ouest et sud –nord.

IV.3. Influence de l'angle d'inclinaison sur la productivité journalière des deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.

En relation avec le résultat obtenu, Il est très bien connu que la productivité des distillateurs solaires augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire et de la température ambiante [150,165].

Dans le même contexte, nous avons introduit l'effet de l'angle d'inclinaison de la couverture en verre sur la productivité journalière des deux distillateurs solaires respectivement symétrique à double pente et asymétrique à double effet, par la variation des différents angles (10 °, 30 ° et 45°), et pour les différentes directions possibles : est -ouest et sud-nord.

Les figures (IV.7 et IV.8) montrent que lors la diminution des angles d'inclinaison de la vitre de manière décroissante allant du plus grand au plus petit (45 °, 30° et 10 °), conduisant à une augmentation de la production journalière des deux distillateurs solaires implantés dans les directions est-ouest et sud- nord, mais le maximum de la productivité journalière est obtenu dans la direction sud-nord.

Ce résultat est obtenu grâce à l'apport de l'orientation prise (sud –nord), où on constate une augmentation de la productivité journalière de l'ordre de 31.61% à 39.33% pour le

distillateur solaire de type asymétrique et de 23,69% à 24,45 % pour le distillateur de type symétrique, lorsque les angles d'inclinaison des couvertures sont variés de 45° à 10°.

On peut donc, déduire et confirmer en même temps que parmi les angles d'inclinaison utilisés, le plus petit (10°) est certes, l'angle d'inclinaison optimale qui cumule le maximum de distillat (productivité) pour les deux types de distillateurs solaires, implantés dans les directions est-ouest et sud-nord durant la journée considérée, la plus chaude en été.

Ceci est peut-être dû au fait que l'angle de déclinaison " δ " possède une valeur positive en été, qui est en relation avec la variation du rayonnement solaire durant la même journée, ce qui conduit à une baisse de la réflexion du rayonnement solaire de la vitre lorsque l'angle d'inclinaison diminue [66].

Ce résultat est comparé à de nombreuses études expérimentales et théoriques qui ont affirmé que l'angle d'inclinaison de la couverture devrait être à sa minimum valeur, particulièrement durant la période estivale [166,167].

Kamal [168], et Tiwari et al. [143] ont également prouvé, dans leurs études sur les types de distillateurs solaires à simple ou à double pente, qu'un angle de 10° représente comme étant l'angle d'inclinaison optimale durant la saison estivale.

D'autres études ont été élaborées par Garg et Mann [150] sur les mêmes types de distillateurs et ont trouvés qu'un angle de 10° représente l'angle d'inclinaison optimale de la vitre et ils sont aussi arrivés à conclure que l'angle d'inclinaison de la vitre doit être faible durant la période estivale et plus large durant la saison hivernale.

En résumé, la production d'eau provenant des deux types de distillateurs solaires est plus élevée lorsque la direction est prise vers le sud-nord, qui est dû au fait que la production du distillat augmente étroitement avec le rayonnement solaire reçu. Cela est attribué à l'effet du rayonnement solaire qui provoque l'échauffement de l'eau de bassin à l'intérieur des distillateurs solaires, dans lequel se produit une plus grande quantité de vapeur.

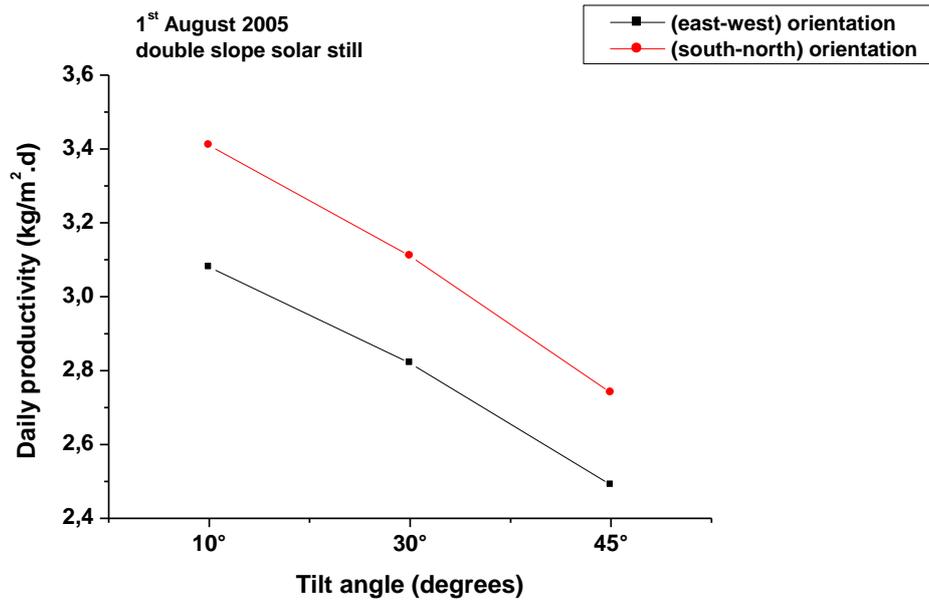


Figure IV.7. Effet de l'angle d'inclinaison sur la productivité journalière du distillateur solaire, type symétrique orienté vers l'est-ouest et vers le sud-nord.

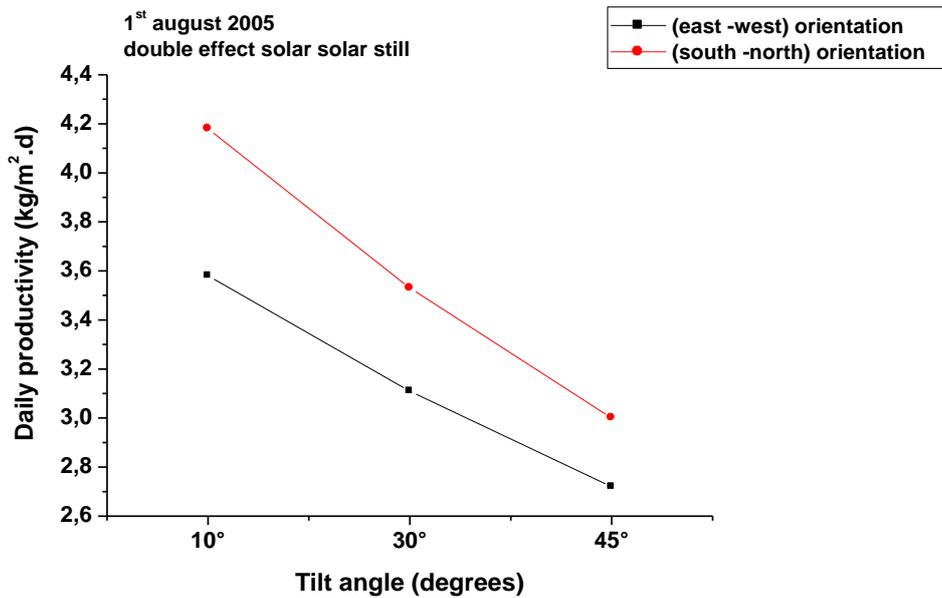


Figure IV.8. Effet de l'angle d'inclinaison sur la productivité journalière du distillateur solaire, type asymétrique orienté vers l'est-ouest et vers le sud-nord.

IV.4. Influence de la profondeur de l'eau, sur la productivité journalière des deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.

La productivité d'un distillateur solaire repose sur un paramètre important parmi tant d'autres et qui constitue sa colonne vertébrale, c'est en l'occurrence l'eau de bassin (la

saumure), où tout se joue par rapport à lui. Il est bien évident que l'eau de bassin (saumure) représente le principal paramètre pouvant marquer la performance d'un distillateur solaire et dont tous les autres paramètres, intérieurs et extérieurs, du distillateur solaire ont tendance à être liés avec cet important paramètre. A cet effet, il est impératif de tenir compte de ses caractéristiques physico-chimiques qui pourraient donner ou améliorer le rendement du distillateur solaire. Dans cette étude, nous avons tenu compte de l'effet de la profondeur de l'eau dans le bassin sur la productivité journalière au niveau des deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre, implantés dans les directions est-ouest et sud-nord et pour des conditions optimales, où l'angle d'inclinaison est pris à 10° (Figures IV.9 et IV.10). A travers ces figures, on peut constater que les profondeurs de l'eau prises, sont de l'ordre de respectivement 0.02 m, 0.04, 0.06, 0.08, jusqu'à la valeur maximale de 0.10 m. Il est bien clair que l'allure que prend les deux courbes nous montre que la profondeur de l'eau diminue avec l'augmentation de la production journalière et où un maximum de productivité est obtenu à une profondeur de l'eau de 0.02 m, dans le cas de direction nord-sud, pour les deux distillateurs solaires. C'est ainsi qu'on enregistre au niveau de cette dernière direction une augmentation de la productivité de 10.71% pour le distillateur symétrique et de 16.75% pour le distillateur asymétrique.

En général, l'augmentation du rendement des deux distillateurs est due au fait que lorsque la profondeur de l'eau se trouvant dans le bassin diminue durant la journée, claire et ensoleillée, et que cette même eau se caractérise par une capacité thermique plus faible, ce qui conduit à une température plus élevée dans le bassin, d'où on enregistre un taux d'évaporation plus élevé, particulièrement au niveau de la direction sud-nord. Ceci est étroitement lié à la réception d'un rayonnement solaire élevé. Vis-à-vis de l'effet de la profondeur de l'eau, on peut considérer que le rayonnement solaire est le paramètre qui a le plus d'effet sur la productivité des deux distillateurs solaires, car il fournit de l'énergie (chaleur) nécessaire pour l'évaporation de l'eau de bassin, où avec la même irradiation solaire le taux d'évaporation augmente avec la masse réduite de l'eau se trouvant sur la plaque de l'absorbeur [169]. Il est bien connu que la profondeur de l'eau est inversement proportionnelle à la productivité des distillateurs solaires [169,147,145], et qu'une profondeur de 0,02 m s'avère la mieux indiquée (valeur optimale) par les chercheurs [164,147], pour une meilleure orientation du distillateur solaire, implanté vers le sud-nord [164].

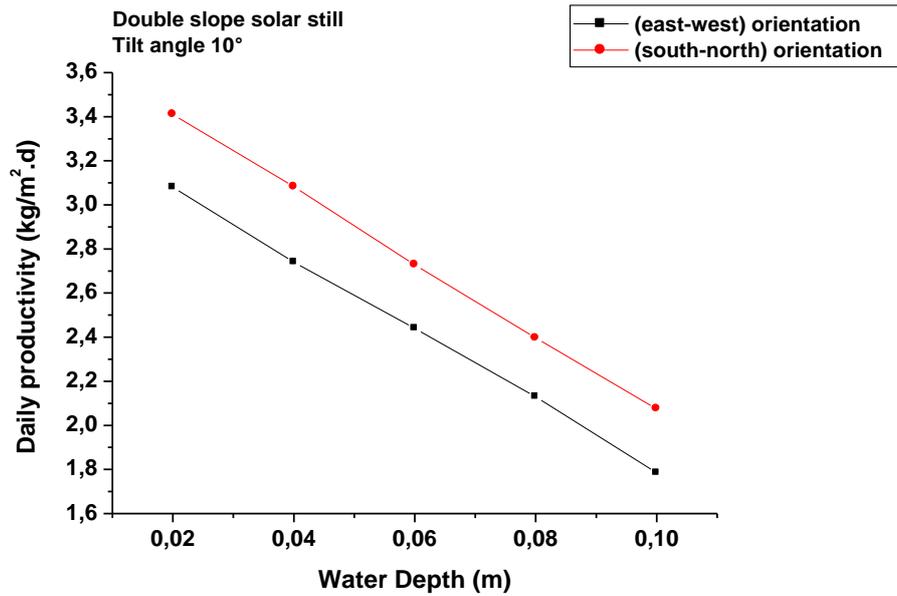


Figure IV.9. Effet de la profondeur de l'eau, sur la productivité journalière du distillateur solaire de type symétrique à double pente, orienté vers l'est- ouest et sud – nord.

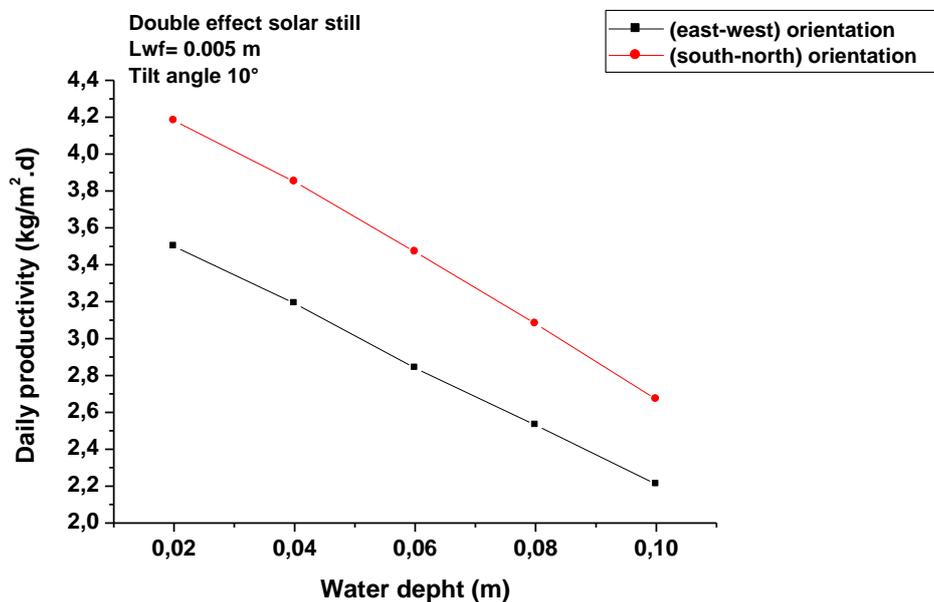


Figure IV.10. Effet de la profondeur de l'eau, sur la productivité journalière du distillateur solaire de type asymétrique à double effet, orienté vers l'est- ouest et sud – nord.

En liaison avec la productivité des deux distillateurs solaire, il est bien évident que le processus d'évaporation –condensation représente un facteur déterminant du cumul du

distillat, à l'intérieur de la chambre des distillateurs ; il est la conséquence du rayonnement solaire atteignant le bas de l'absorbeur, provoquant dans un premier temps de l'échauffement de l'eau se trouvant dans le bassin, du à l'augmentation de sa température. Cette dernière, constitue un facteur important pour la production de la quantité d'eau évaporée. L'évaporation de l'eau est aussi un phénomène de surface, où seules les molécules de surface, interagissant avec l'air, qui s'évaporent et ce en fonction de la température de l'eau, du niveau d'humidité de l'air et de l'énergie cinétique au niveau de la surface d'eau, contrairement à l'ébullition, qui se produit dans toute la masse d'eau. L'eau évaporée atteint ainsi la face intérieure de la vitre en se transformant en gouttelettes d'eau, provoquant un phénomène de condensation qui est subi par un facteur refroidisseur extérieur : soit par la vitesse du vent à l'extérieur de l'enclave des distillateurs solaires ou bien par le film d'eau, qui est en écoulement continu, entre les deux compartiments du distillateur solaire de type asymétrique. En conclusion, le processus évaporation –condensation est un phénomène lié directement à la température d'évaporation et à la température de condensation et où celles-ci sont, à leur tour, liées conjointement au niveau de la surface supérieure de l'eau se trouvant dans le bassin et au niveau de la surface de la face inférieure de la vitre, entraînant la formation de gouttelettes d'eau distillée, déterminant ainsi la productivité des distillateurs solaires. C'est par cette hypothèse mise en évidence que nous avons saisi la formule de corrélation entre les valeurs des températures de l'eau de bassin et celles correspondant la face intérieure de la vitre, ainsi que le taux de production horaire au niveau des différentes orientations des distillateurs solaires de type symétriques et asymétriques. L'expression du coefficient de corrélation (r) et celle de la racine au carré de la moyenne de déviation, en pourcentage (e) sont données par Chapra et Canale [170]:

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum(x_i) \sum(y_i)}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

IV.1

$$\text{et } e = \sqrt{\frac{\sum(e_i)^2}{N}}$$

IV.2

$$\text{ou } e_i = \frac{x_i - y_i}{x_i}$$

IV.3

IV.5. Variation temporelle de la température de l'eau et celle de la face intérieure de la vitre des deux distillateurs de type symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.

En outre, cette corrélation se concrétise dans les figures (IV.11 à IV.14) qui représentent la variation temporelle de la température de l'eau de bassin et celle de la face intérieure de la vitre des deux distillateurs de type symétrique et asymétrique au niveau des orientations considérées, à savoir est-ouest et sud –nord. On peut donc constater qu'il existe une dépendance apparente de la production horaire du processus d'évaporation- condensation, pour les deux types de distillateurs solaires. C'est ainsi que l'allure des courbes des températures intérieures au niveau de la vitre et de l'eau de bassin et celle concernant la production horaire, conduit à un excellent processus de corrélation avec ($r = 0,9868$ à $0,9997$ et $e = (3,35\% - 20,03\%)$). Ce résultat se trouve validé par plusieurs chercheurs qui ont rapporté dans leurs études, que l'augmentation dans la production de l'eau de bassin et celles des températures des différents composants de distillateur solaire se concrétisent sous l'effet de l'augmentation du rayonnement solaire, conduisant à une excellente corrélation entre la distribution des températures et la production du distillateur solaire [66,171]. Cependant, il est admis que le rayonnement solaire représente le paramètre qui le plus d'effet sur la productivité du distillateur solaire car il fournit l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau, c'est donc à partir des figures précédentes qu'on peut constater que l'augmentation du taux de la production est subordonnée à l'augmentation de la différence (l'écart) entre la température de l'eau et celle de la vitre considérée. Entre autres, cette augmentation est liée à celle du rayonnement solaire horaire. L'augmentation de l'écart de température entre l'eau de bassin et celle de la vitre induit une augmentation de la circulation naturelle de la masse d'air à l'intérieur de la chambre du distillateur provoquant, à la fois, l'augmentation de l'évaporation et de la condensation entre l'eau de bassin et la vitre.

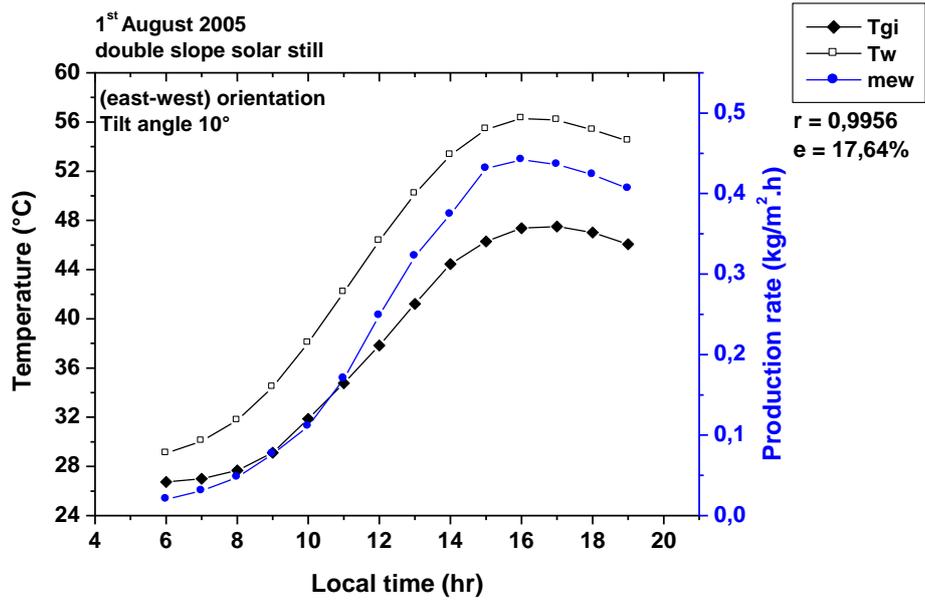


Figure IV.11: Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers l'est – ouest.

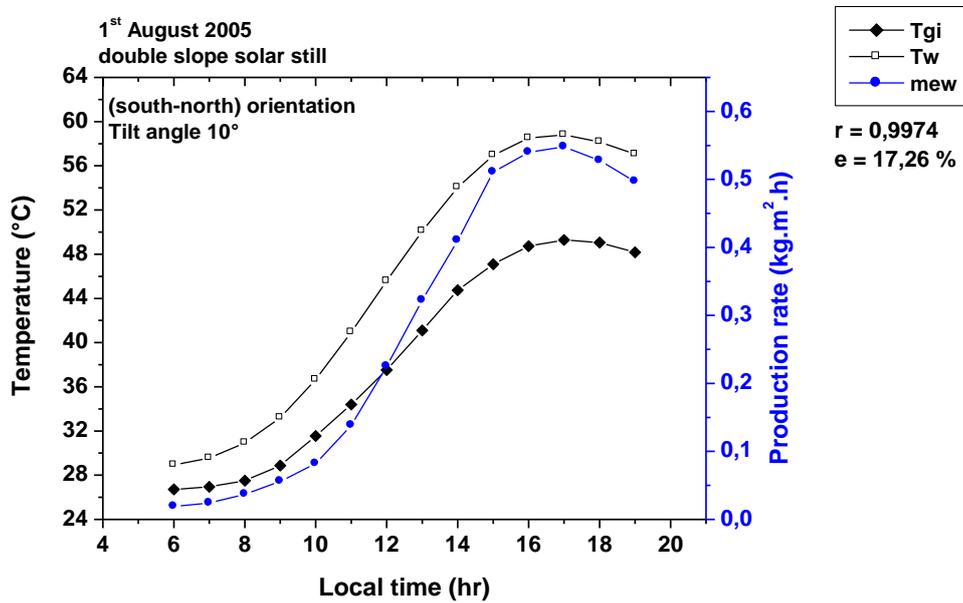


Figure IV.12 : Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire de type symétrique, orienté vers le sud - nord.

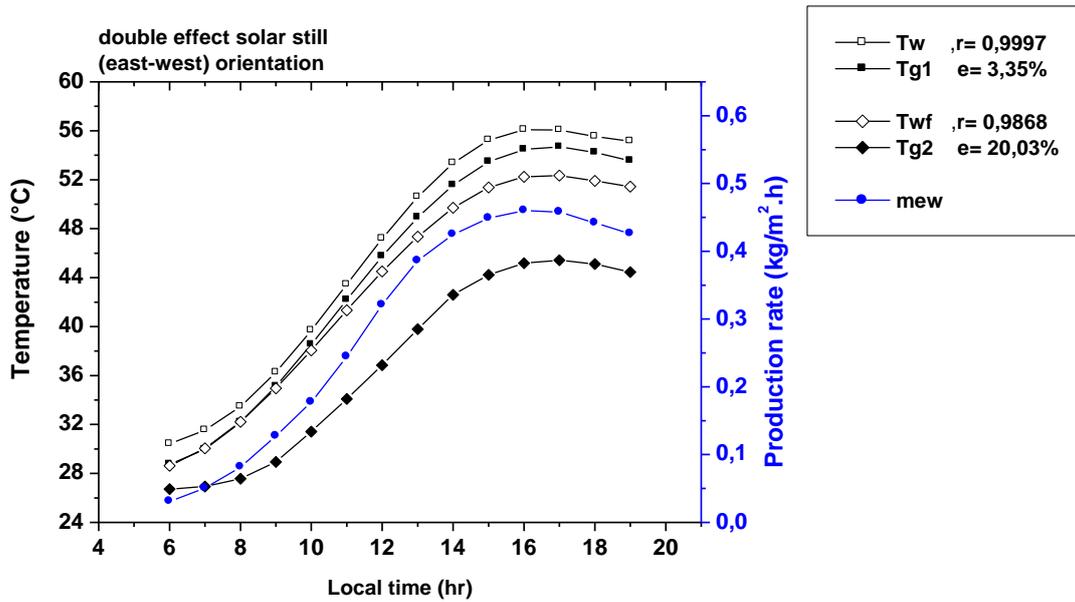


Figure IV.13 : Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet, orienté vers l'est – ouest.

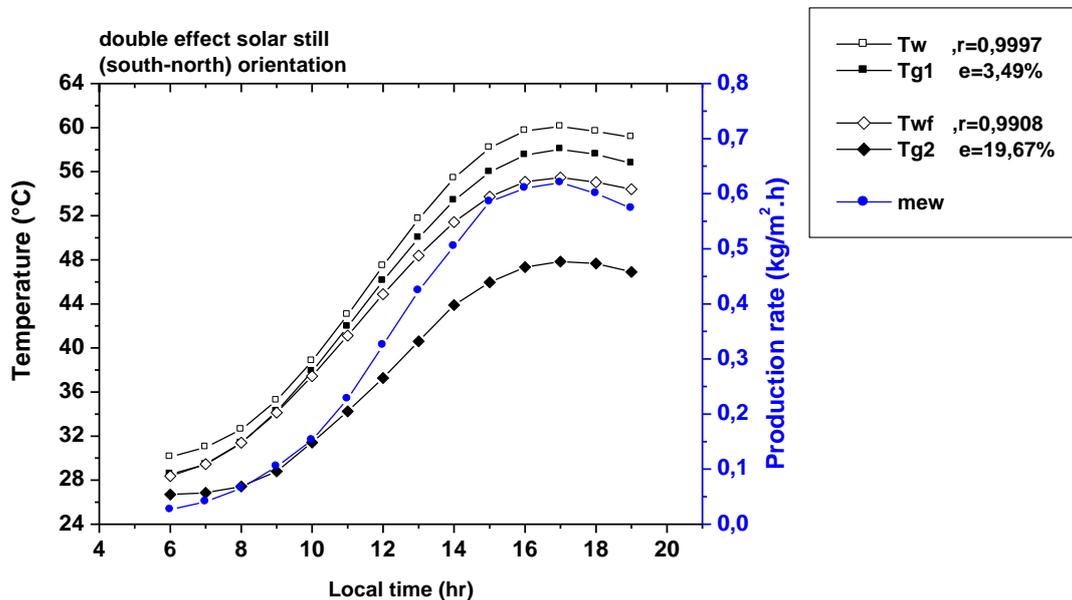


Figure IV.14 : Variation temporelle de la température de l'eau de bassin et de la face intérieure de la vitre, avec la production horaire du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet, orienté vers le sud - nord.

IV.6. Comparaison entre la production horaire des deux modèles de distillateurs solaires de types symétrique et asymétrique orientés vers l'est –ouest et le sud – nord.

Les figures (IV.15, IV.15 a, IV.15 b), indiquent une comparaison entre la production horaire des deux distillateurs solaires considérés, de types symétrique et asymétrique et orientés vers les directions est –ouest et sud – nord, en étant pris dans des conditions optimales.

L'allure des courbes de la production horaire des deux unités de distillation montre une progression de celle-ci, où elle commence avec une lenteur, durant les premières heures matinales et ce en raison d'une faible énergie solaire fournie durant cette période en minimisant le chauffage des deux unités de distillation. Le taux de production horaire atteint son maximum, pour les deux distillateurs solaires, aux environs de 17h00, pour l'orientation sud-nord et à 16h00 pour l'orientation est-ouest. Cependant, après 16h00 et 17h00, la production commence à diminuer progressivement jusqu'à sa valeur atteindre sa valeur minimum. A travers cette constatation et cette analyse, on peut déduire qu'il existe une concordance et une similitude dans la production horaire au niveau des deux distillateurs solaires symétrique à double pente et asymétrique à double effet, pour les deux orientations est-ouest et sud- au nord et dont le coefficient de corrélation (r) et la racine au carré de la moyenne de déviation (e) sont de l'ordre de 0,9904 à 0,9946 et de 26,95% à 32,04% respectivement. A travers de la figure (IV.15), on peut constater qu'il existe une concordance ou une similitude au niveau du taux de production des deux distillateurs solaires, à double pente et à double effet pour les orientations est-ouest et sud- au nord, et dont le coefficient de corrélation (r) et la racine au carré de la moyenne de déviation (e) sont de l'ordre de 0,9904 à 0,9946 et de 26,95% à 32,04% respectivement. Dans le même contexte de comparaison, on peut noter, en premier lieu, que la valeur maximale de la production horaire est obtenue au niveau de l'orientation sud-nord comparée à celle obtenue au niveau de l'orientation est-ouest, pour les deux types de distillateurs solaires, en raison de la concentration maximale du rayonnement solaire lorsque l'orientation est au sud-nord.

Plusieurs chercheurs ont constaté et approuvé, dans leurs études, que la production horaire augmente lorsque l'orientation est au sud-nord [164]. Alors que dans un deuxième cas, la production horaire obtenue par le distillateur solaire de type asymétrique est nettement supérieure à celle obtenue au niveau du distillateur de type symétrique (figure IV.15). Ceci est dû à la grande concentration (maximum) du rayonnement solaire sur une seule face, au niveau du système à double effet d'une part, et d'autre part, par l'abaissement de la

température de la couverture intermédiaire séparant les deux compartiments du système considéré par un refroidissement continu, du à l'écoulement du film d'eau sur la vitre, contribuant ainsi à l'augmentation de sa productivité [55], ce qui conduit à collecter un maximum d'eau fraîche. L'écoulement du film d'eau de refroidissement induit un gain de chaleur latente de condensation, d'où cette chaleur est régénérée par le passage cette eau dans le bassin. Le second effet de l'évaporation et de la condensation est l'utilisation de la chaleur latente de la première condensation, augmentant ainsi la production. En conclusion, le distillateur solaire de type asymétrique et à double effet donne un taux de production horaire supérieur, pour les deux orientations est-ouest et sud-nord.

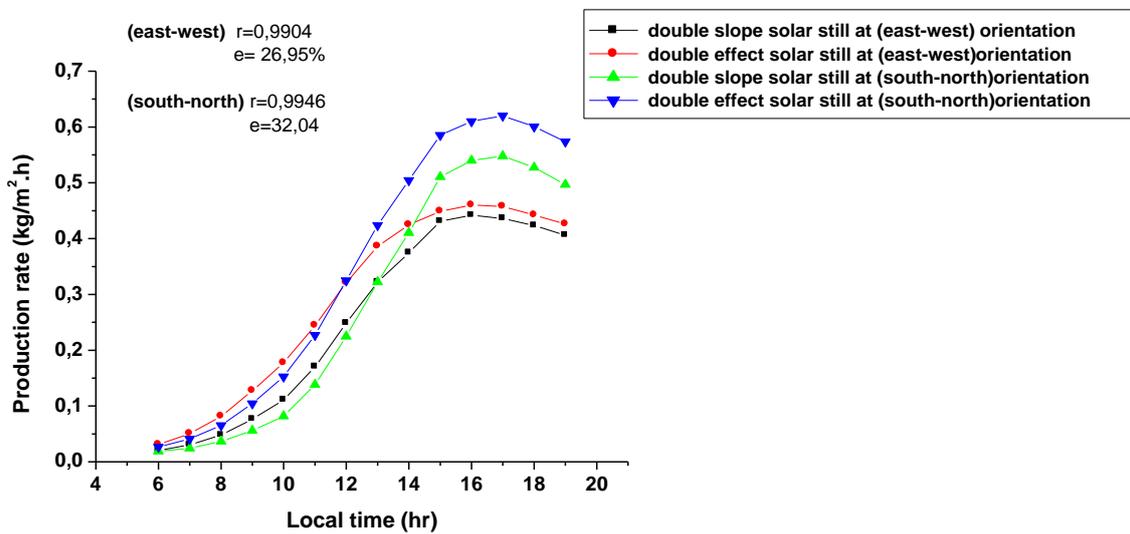


Figure IV.15 : Comparaison entre la production horaire des deux modèles de distillateurs solaires de types symétrique et asymétrique orientés vers l'est –ouest et le sud – nord.

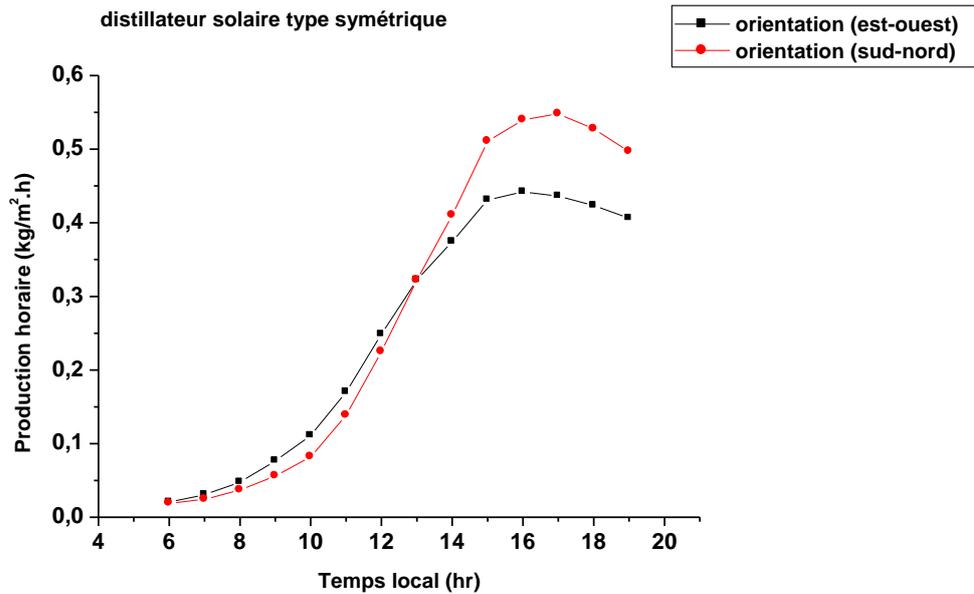


Figure IV.15a : Variation de la production horaire du distillateur solaire de type symétrique orienté vers l'est-ouest et le sud-nord.

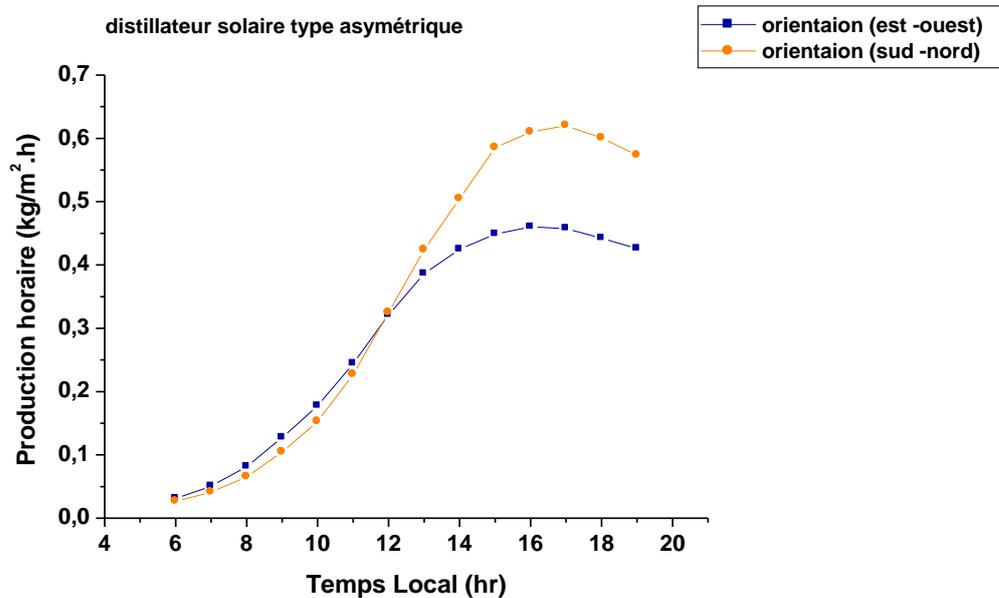


Figure IV.15b : Variation de la production horaire du distillateur solaire de type asymétrique orienté vers l'est-ouest et le sud-nord.

IV.7.Comparaison entre la production journalière des deux distillateurs solaires de types symétrique et asymétrique à double effet dans les conditions optimales

La figure (IV.16) illustre bien la production journalière en eau, issue des deux distillateurs solaires implantés à différentes orientations en tenant compte des paramètres

optimums obtenus. On peut donc constater que la productivité journalière issue du système asymétrique, avec un procédé à double effet est plus élevée que celle issue du système symétrique à double pente, particulièrement lorsque l'orientation est au sud-nord, donnant une augmentation de l'ordre de 22,57%, par contre lorsque l'orientation est à est-ouest, elle est aux environs de 16,23%. En tenant de l'avantage du système à double effet, l'orientation sud-nord est considérée comme responsable de l'augmentation de la productivité journalière du distillateur à double effet, de l'ordre de 16,76%. En comparaison avec d'autres résultats obtenus par les chercheurs Rajamanickam et Ragupathy [164] lors de leur étude effectuée sur un distillateur solaire symétrique à double pente, où ils ont trouvé que le rendement maximum obtenu se trouve dans la direction sud-nord, en comparaison avec celui obtenu lorsque la direction est en est-ouest, mais ces valeurs trouvées restent éloignées par rapport aux résultats obtenus dans notre étude. Dans l'ensemble, la productivité journalière d'un tel distillateur solaire reste affectée et liée à l'orientation, tel que rapporté dans de nombreuses études réalisées et qui ont confirmé que l'orientation a un effet significatif sur l'augmentation de la productivité de l'eau [164, 172, 173,174].

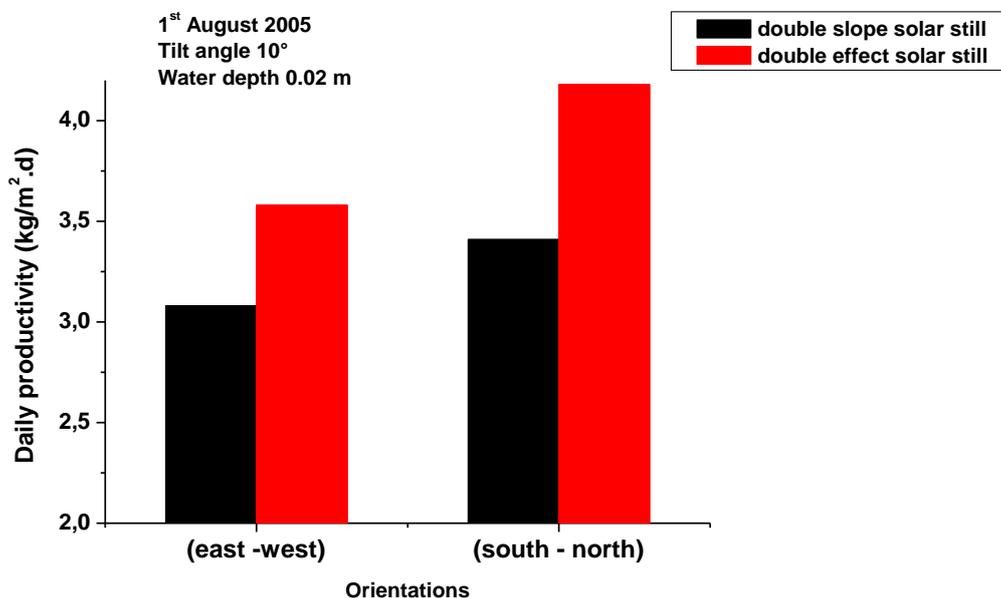


Figure IV.16 : Comparaison entre la production journalière des deux distillateurs solaires de types symétrique et asymétrique à double effet, pour des conditions optimales durant la journée la plus chaude (2002- 2012).

IV.8. Variation temporelle du coefficient d'échange de chaleur global intérieur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.

En relation avec les processus interne et externe des deux distillateurs solaires considérés, nous avons tenu compte, dans notre étude, des facteurs aussi importants tels que l'effet des coefficients d'échange de chaleur sur la performance des deux systèmes en considération. L'apport des coefficients d'échange de chaleur est prépondérant, non seulement pour les échanges de chaleur internes ou externes mais aussi pour le bilan thermique des distillateurs solaires. Les transferts de chaleur qui se produisent au niveau des deux types de distillateurs solaire sont respectivement subdivisés en deux modes : transfert de chaleur interne et externe. Le mode de transfert de chaleur externe est gouverné par les processus de conduction, de convection et de rayonnement qui s'effectuent indépendamment les uns des autres. Ces types de transfert de chaleur se réalisent entre les éléments extérieurs tels que la couverture, la base des distillateurs solaires et le milieu ambiant.

Le second mode de transfert de chaleur interne englobe les transferts de chaleur par rayonnement, par convection et par rayonnement. Le transfert de chaleur obtenu par convection se produit simultanément avec le transfert de chaleur par évaporation. Ces deux processus sont indépendants du transfert de chaleur par rayonnement.

A partir de ce facteur qui est d'importance majeure pour la performance des deux distillateurs solaires, nous avons émis une projection sur les deux unités de distillation solaire symétrique et asymétrique et à effet de serre et où nous avons tenu compte dans notre étude la relation entre les coefficients d'échange de chaleur globaux et les angles d'inclinaison de la vitre.

Les figures (IV.17 à IV.20) montrent la variation temporelle des coefficients de transfert de chaleur globaux internes avec les différents angles d'inclinaison des couvertures des deux types de distillateurs solaires implantés vers l'est-ouest et le sud-nord, à savoir 10°, 30° et 45°.

On peut constater qu'il y a une similitude entre l'allure des courbes des coefficients de globaux de transfert de chaleur, et celles liées aux angles d'inclinaison, à l'orientation est-ouest (figures IV.17 et IV.18) et à l'orientation sud-nord (figures IV.19 et IV.20) et ce pour les deux types de distillateurs solaires :

- C'est ainsi qu'on enregistre un décalage horaire à l'est-ouest en période de la matinée, pour les angles d'inclinaison et ordre décroissant allant de 45°, 30° et 10° (figures IV.17 et

IV.18), et inversement l'après midi (changement inversé), car il y a changement de position du rayonnement solaire pour cette orientation.

- Tandis qu'au niveau de l'orientation sud –nord, on peut constater que la variation temporelle des courbes des coefficients globaux de transfert de chaleur internes avec les différents angles d'inclinaison est illustrée dans les figures (IV.19 et IV.20).

On constate, à partir de l'allure des courbes des coefficients globaux de transfert de chaleur interne, qu'il y a une nette stabilité durant toute la journée solaire, vis-à-vis des différents angles d'inclinaison des couvertures, où on peut constater deux phénomènes : une tendance progressive durant la matinée et une tendance régressive durant l'après midi, en suivant respectivement l'ordre décroissant des angles d'inclinaison (45° , 30° et 10°). Avec la même logique, les plus fortes valeurs des coefficients globaux de transfert de chaleur interne sont obtenues pour un angle d'inclinaison minimale de 10° et ce pour les deux couvertures des distillateurs solaires symétrique et asymétrique.

En conclusion, ces résultats indiquent la coïncidence en simultanée des courbes des coefficients globaux d'échange interne de chaleur des deux types de distillateurs solaires avec celles obtenues avec le rayonnement solaire et par rapport à leurs comportements au niveau des orientations est –ouest et sud –nord et des angles d'inclinaison, ce qui explique son (rayonnement solaire) influence directe et son implication dans la détermination des valeurs optimales des coefficients globaux d'échange interne de chaleur.

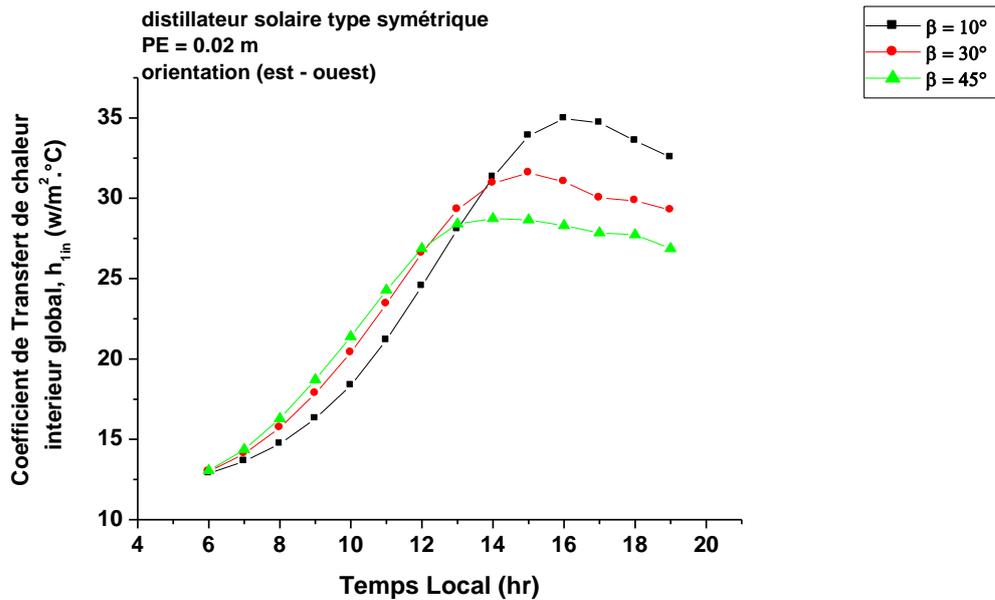


Figure IV.17 : Variation temporelle du coefficient d'échange de chaleur global intérieur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire, type symétrique orienté vers l'est –ouest.

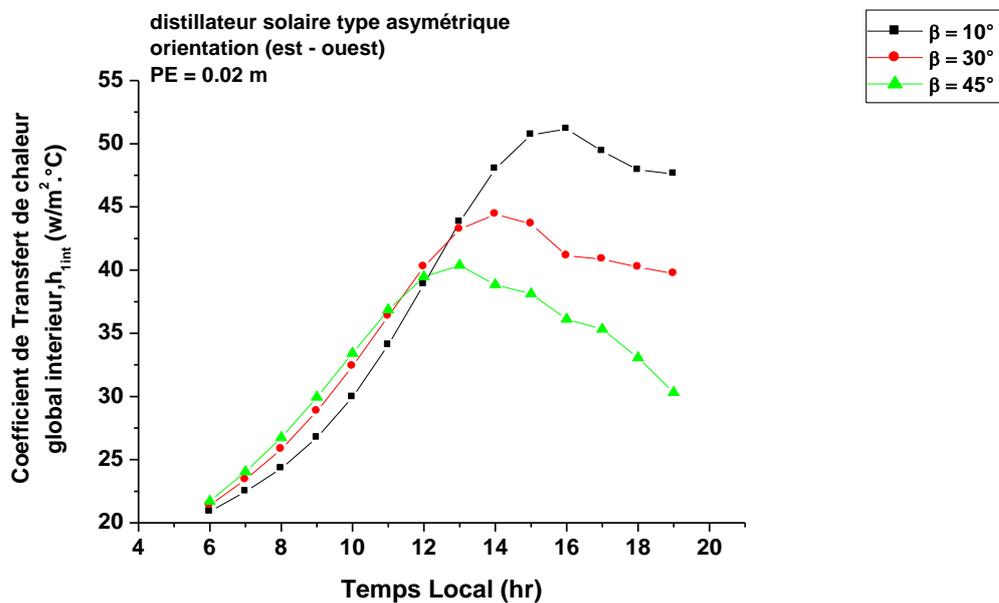


Figure IV.18 : Variation temporelle du coefficient d'échange de chaleur global intérieur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type asymétrique orienté vers l'est–ouest.

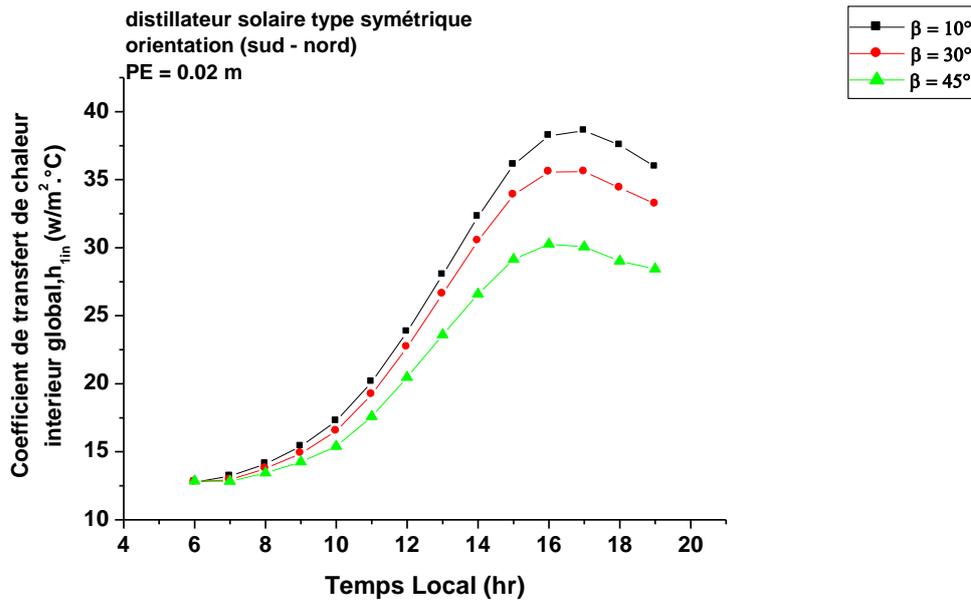


Figure IV.19 : Variation temporelle du coefficient d'échange de chaleur global intérieur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type symétrique orienté vers le sud- nord.

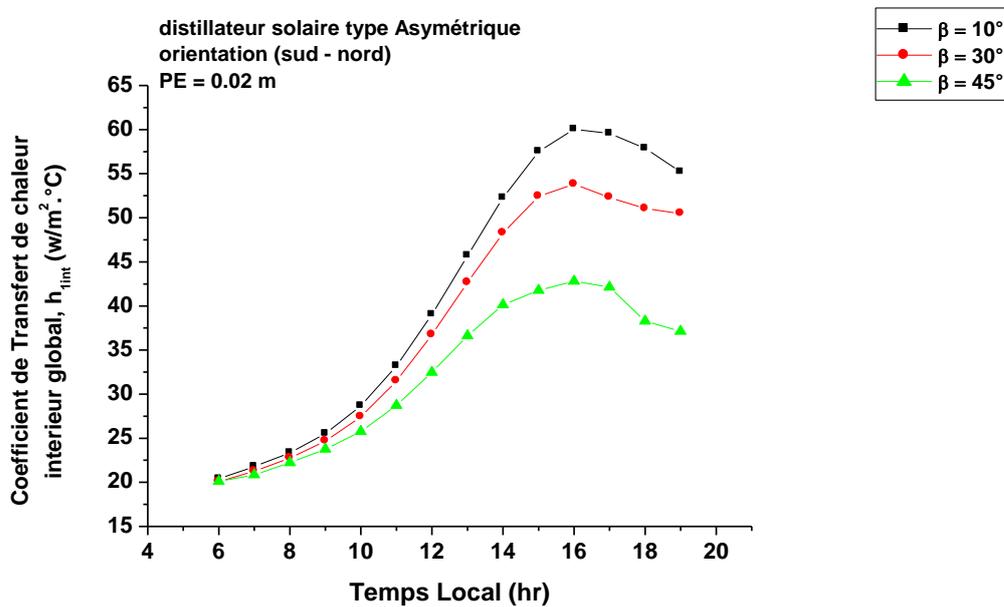


Figure IV.20 : Variation temporelle du coefficient d'échange de chaleur global intérieur avec les différents angles d'inclinaison du distillateur solaire type asymétrique orienté vers le sud- nord.

IV.9. Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement des deux types de distillateurs solaire symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.

Les figures (IV.21 à IV.24) illustrent la Variation temporelle des coefficients globaux d'échange interne de chaleur par convection, évaporation et rayonnement qui sont obtenus dans des conditions optimales pour les deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre, implantés dans les différentes orientations considérées : est – ouest et sud -nord. On remarque que ces coefficients sont issus du modèle thermique élaboré par les relations de Dunkle [123].

A partir des précédentes figures, on peut constater que l'allure de la courbe du coefficient d'échange de chaleur par évaporation subit un changement significatif durant toute la journée considérée, suivie, avec moindre degré, par celle du coefficient d'échange de chaleur par rayonnement, alors que le coefficient d'échange de chaleur par convection est nettement inférieur par rapport aux deux précédents.

Comparé au résultat rapporté par Dunkle [123], le coefficient d'échange de chaleur par convection est proportionnel à la différence de la température entre la surface de l'eau se trouvant dans le bassin et celle de la face intérieure de la vitre ; cependant sa dépendance de la température de la surface de l'eau de bassin n'est pas assez forte, en comparaison avec le coefficient d'échange de chaleur par évaporation qui subit un changement considérable avec la même température de l'eau, à cause de sa dépendance directe de la pression partielle qui est très sensible à la température [175].

Cependant, on n'a pas vraiment enregistré un changement significatif du coefficient d'échange de chaleur par rayonnement, du moment où sa dépendance est due uniquement à la différence de température entre la surface de l'eau de bassin est celle de la vitre.

Dutt et al, ont déterminé, dans leur étude sur le distillateur solaire, que le coefficient d'échange de chaleur par évaporation représente une excellente fonction de la température, tandis que les coefficients d'échange de chaleur par convection et par rayonnement varient faiblement (très peu) avec la température [61]. La contribution des différents coefficients d'échange de chaleur dans l'élaboration du coefficient global d'échange interne se présente comme suit : Le coefficient d'échange de chaleur par évaporation constitue une part significative du coefficient d'échange total interne avec un taux élevé (environ 70%), suivi par le coefficient d'échange par rayonnement avec un taux de 23% et le reste est destiné pour le coefficient d'échange de chaleur par convection (7%).

A partir d'une analyse faite par Tiwari et al. [143], lors d'une étude expérimentale sur l'optimisation de l'angle d'inclinaison donnant le maximum de production possible par un distillateur solaire, ils ont observé qu'il existe une réduction significative dans le coefficient d'échange de chaleur par évaporation du à l'augmentation de l'angle d'inclinaison en périodes estivale et hivernale ; le cas contraire induit une augmentation remarquable du coefficient d'échange de chaleur par évaporation donnant le maximum de production par un distillateur solaire avec un angle d'inclinaison optimisé minimale de 10°.

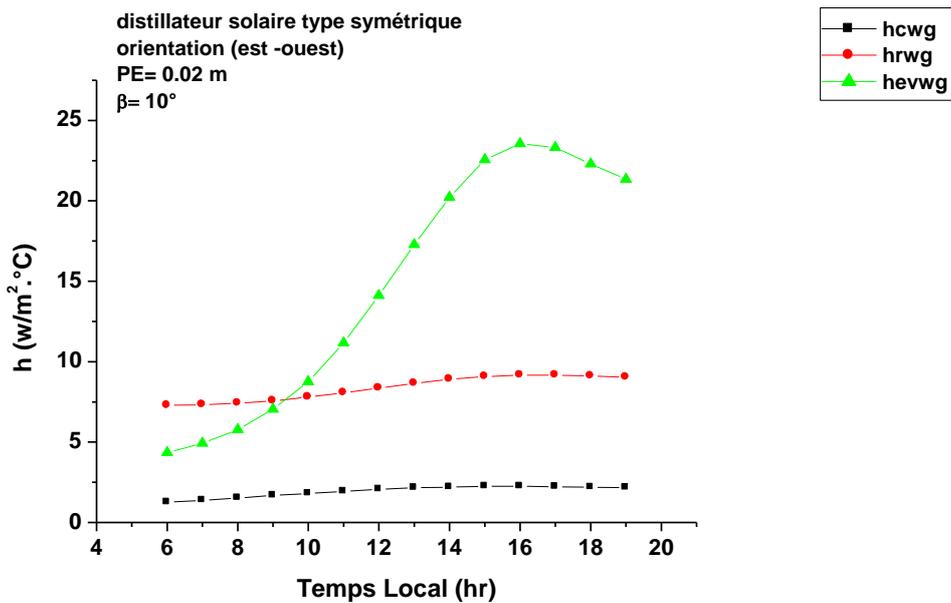


Figure IV.21 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type symétrique, orienté vers l'est-ouest.

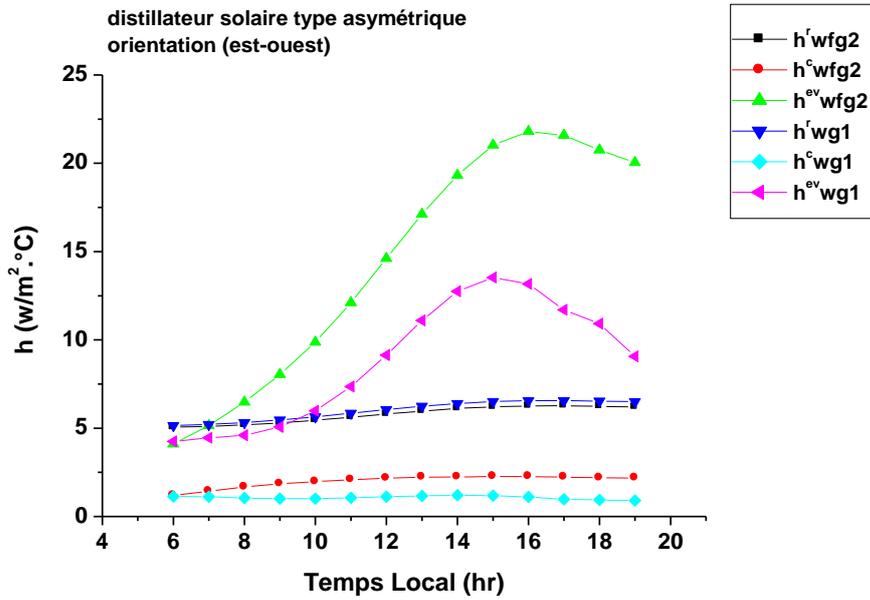


Figure IV.22 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type asymétrique, orienté vers l'est-ouest.

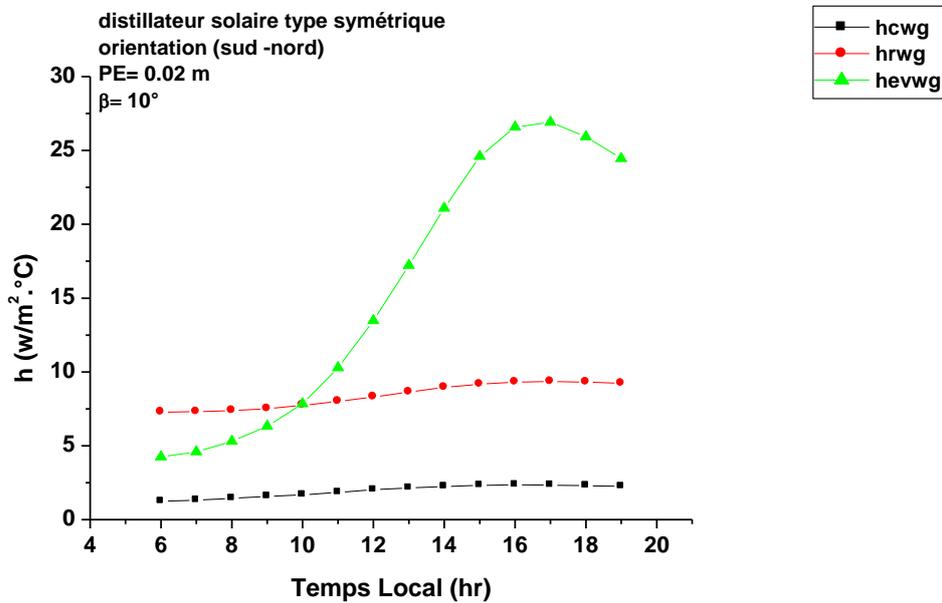


Figure IV.23 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type symétrique, orienté vers le sud-nord.

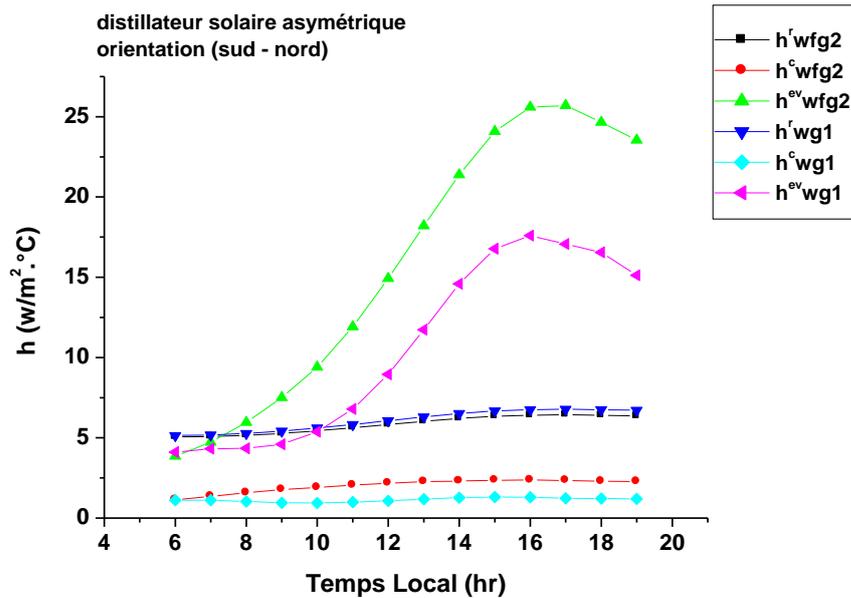


Figure IV.24 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur par convection, par évaporation et par rayonnement pour un distillateur solaire type asymétrique orienté vers le sud -nord.

IV.10. Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire des deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique dans les différentes orientations.

Dans le même contexte, Les figures (IV.25 à IV.28) montrent la variation temporelle des différents coefficients d'échange intérieur de chaleur avec la production horaire, dans des conditions optimales pour les deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique, implantés vers les orientations est -ouest et sud - nord.

On constate que l'allure de la courbe du coefficient d'échange de chaleur par évaporation a une tendance identique à celle de la production horaire durant toute la journée considérée, et vers les orientations prévues, avec plus d'avantage pour l'orientation sud -nord. Par contre les courbes des coefficients d'échange de chaleur par convection et par rayonnement ne suivent pas la même n'ont pas la même tendance, ceci s'explique que le coefficient de transfert de chaleur par évaporation contribue majoritairement dans la production des distillateurs solaires, d'où on peut dire que le coefficient de transfert de chaleur par évaporation est très recommandé pour plus de productivité. Des études ont conclu que le coefficient d'échange par évaporation est très désirable pour l'augmentation de la production du distillateur

[176,43], ceci conforte le résultat trouvé dans notre étude (analogie), pour les deux types de distillateurs solaires ayant différents angles d'inclinaison et implantés dans différentes orientations.

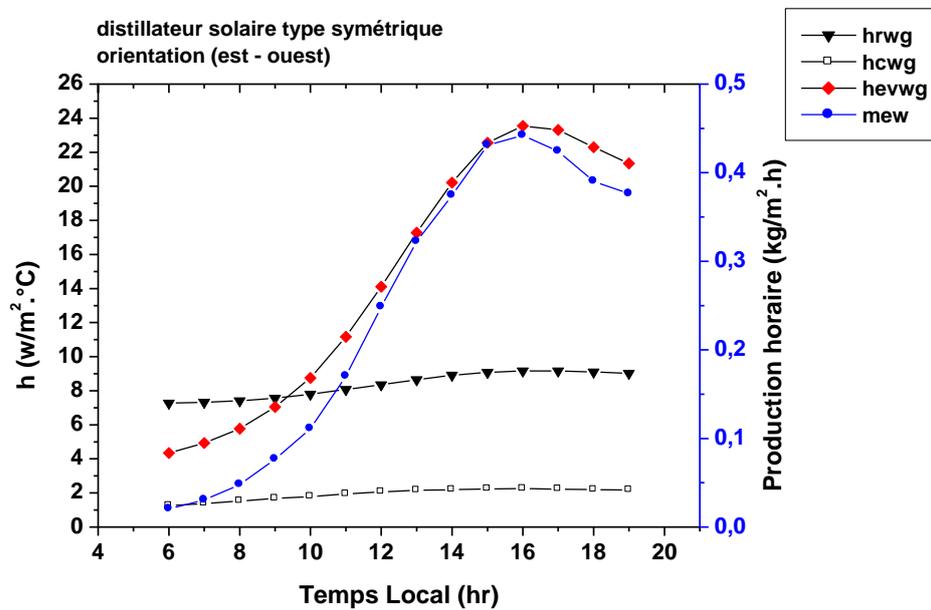


Figure IV.25 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers l'est-ouest.

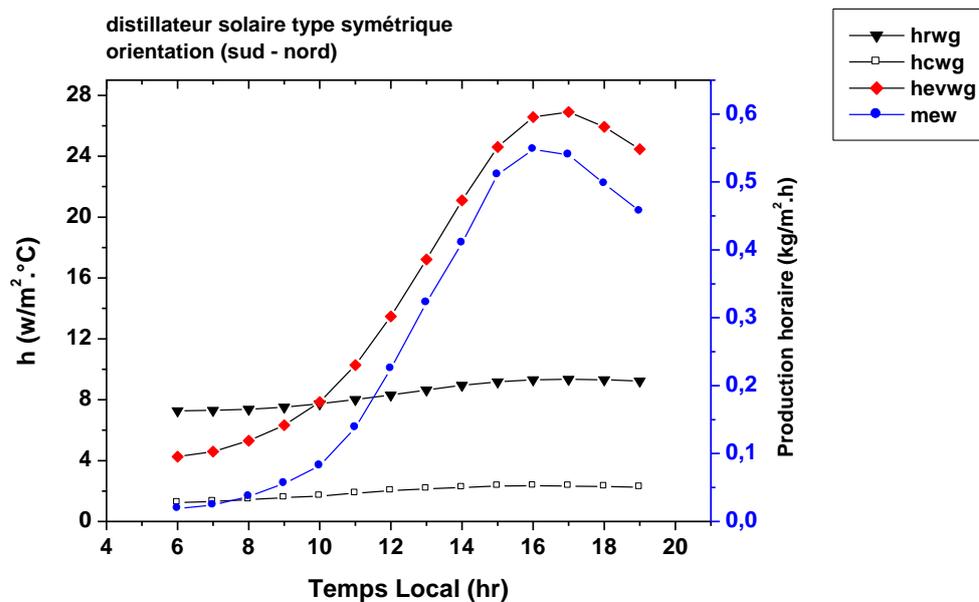


Figure IV.26 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieur avec la production horaire du distillateur solaire de type symétrique, orienté vers le sud - nord.

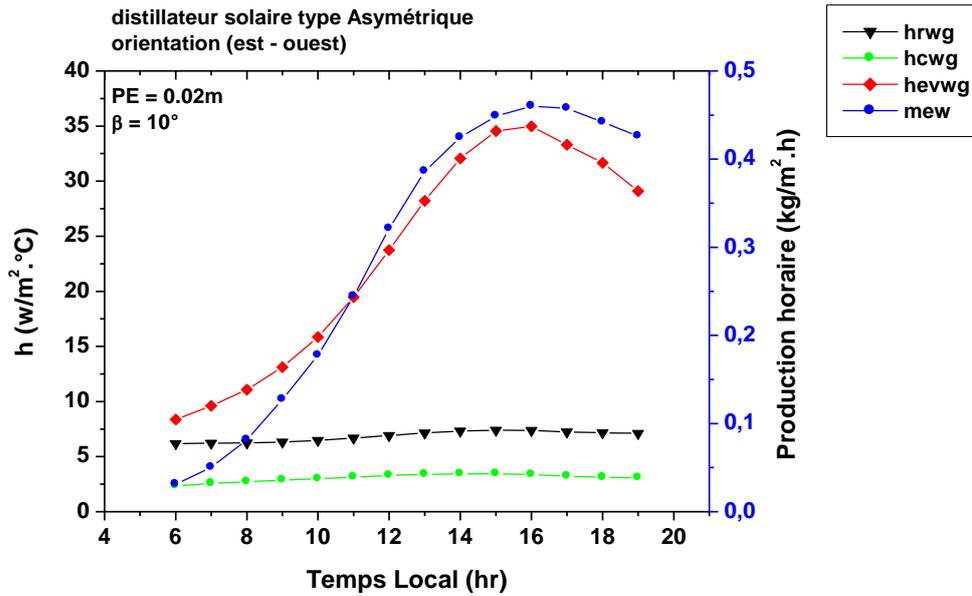


Figure IV.27 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieure avec la production horaire du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers l'est -ouest.

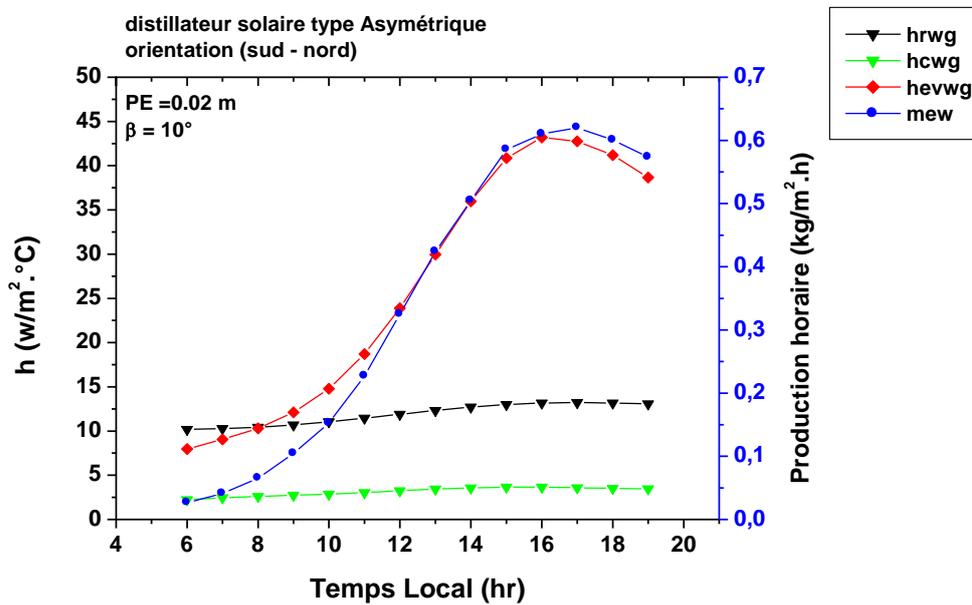


Figure IV.28 : Variation temporelle des coefficients d'échange de chaleur intérieure avec la production horaire du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers le sud - nord.

IV.11. Variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur et de la température ambiante, dans les conditions optimales des deux distillateurs solaires, types : symétrique et asymétrique, orientés vers l'est –ouest et au sud nord.

Les Figures (IV.29 à IV.32) représentent la variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur (h_2) avec la température ambiante des deux types de distillateurs solaires symétrique et asymétrique, mis dans des conditions optimales et orientés vers l'est- ouest et sud – nord.

Du moment que le coefficient d'échange extérieur est une fonction de la température ambiante de l'air extérieur et de la vitesse du vent [176], et dont ceci est vérifié à travers l'allure de la courbe du coefficient d'échange extérieur dans les différents cas d'orientation : est – ouest et sud – nord, on peut donc constater que le coefficient d'échange extérieur a une tendance identique à celle de la température ambiante, durant toute la journée la plus chaude, considérée dans notre étude. Ceci s'explique par la dépendance du coefficient d'échange extérieur (h_2) des deux paramètres extérieurs cités auparavant.

En relation avec la distribution de la température ambiante qui se présente comme appropriée vis à vis d'un important paramètre extérieur qui est le rayonnement solaire incident, et comme elle constitue une véritable fonction du coefficient d'échange extérieur, d'où ceci implique l'effet transitoire du rayonnement solaire sur le coefficient d'échange extérieur.

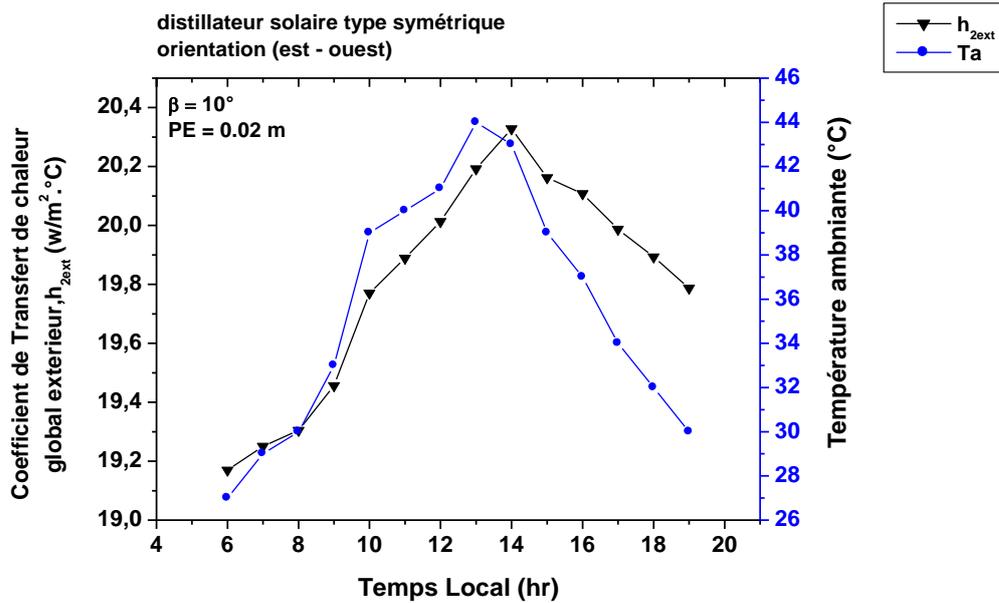


Figure IV.29 : Variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur et de la température ambiante, dans les conditions optimales du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers l'est –ouest.

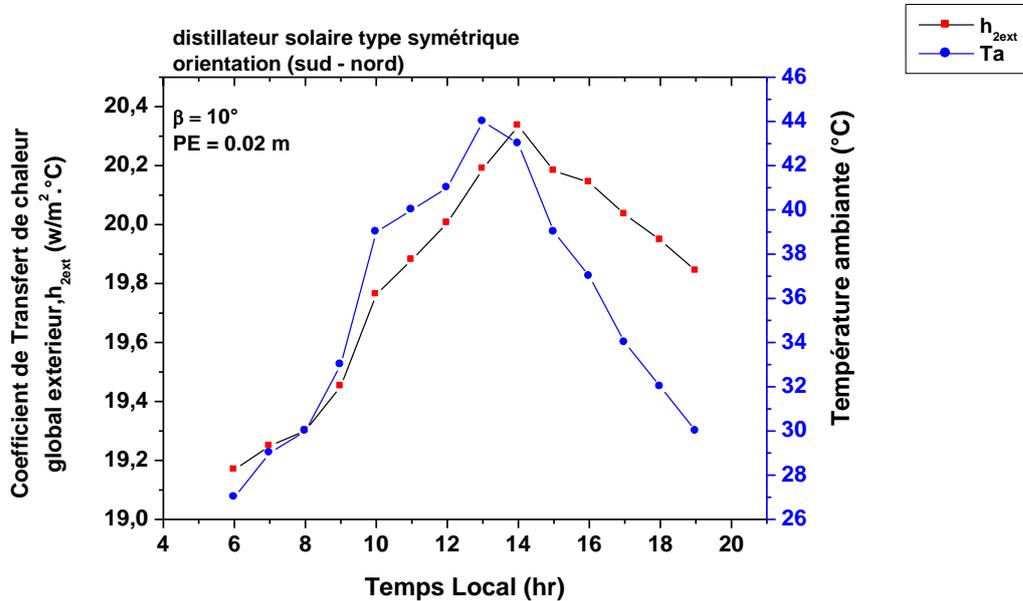


Figure IV.30 : Variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur et de la température ambiante dans les conditions optimales du distillateur solaire, type symétrique, orienté vers le sud-nord.

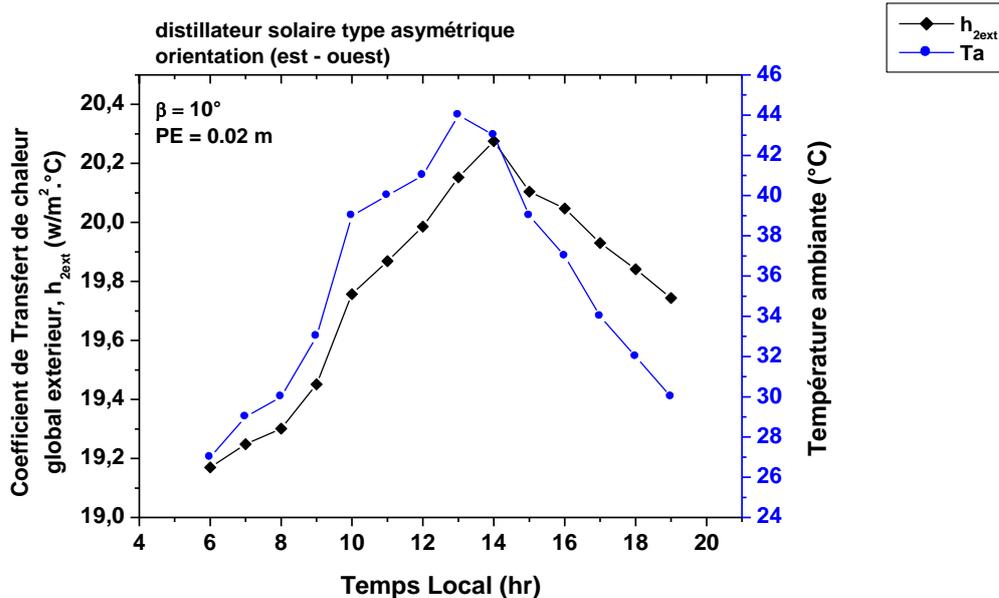


Figure IV.31 : Variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur et de la température ambiante dans les conditions optimales du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers l'est –ouest.

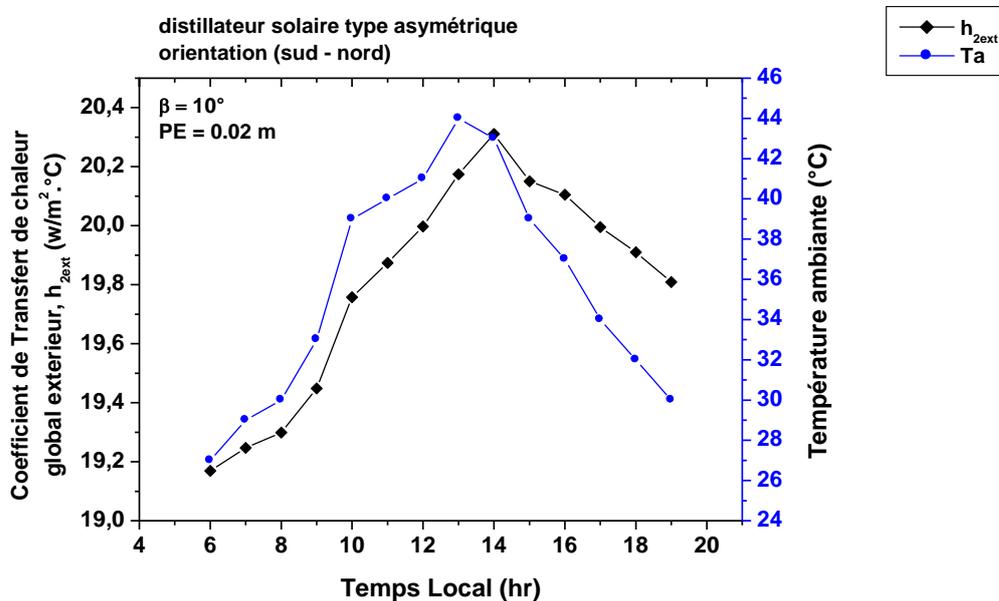


Figure IV.32 : Variation temporelle du coefficient global d'échange de chaleur extérieur et la température ambiante dans les conditions optimales du distillateur solaire, type asymétrique, orienté vers au sud - nord.

IV.12. Effet de la l'épaisseur de l'isolant sur la productivité des deux types de distillateur solaires : symétrique et asymétrique dans les différentes orientations

Pour conserver l'énergie thermique à l'intérieur des distillateurs solaires et minimiser les pertes vers l'extérieur des deux unités de distillation, nous avons introduit le polystyrène comme isolant. A cet effet, nous avons vérifié, dans notre étude, son effet sur la productivité des deux distillateurs solaires mis dans des conditions optimales et dans les directions est – ouest et sud – nord, et ce en variant son épaisseur (de 0.02 à 0.10 m).

Les figures (IV.33 et IV.34) , schématisent, pour chaque type de distillateur solaire, une parfaite comparaison entre les deux orientations considérées, où l'allure des courbes montre que la productivité journalière augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant de 0.02 jusqu'à la valeur maximale pour une épaisseur de 0.10 m. A partir de ce constat, on peut déduire que la conservation de l'énergie thermique est assurée car la productivité se trouve augmentée, entraînant une augmentation de la température de l'eau de bassin qui provoque de son côté l'accélération du phénomène d'évaporation au niveau de la surface de l'eau de bassin. Ce résultat est identique à celui trouvé dans des études menées auparavant et qui ont qu'une parfaite isolation des distillateurs solaires fait augmenter la température de l'eau de bassin de 67% [57].

En tenant compte aussi de productivité maximale obtenue pour une épaisseur de l'isolant de 0.10 m, plusieurs recherches chercheurs ont indiqué que la limite pratique d'une épaisseur optimale d'un tel isolant est de l'ordre de 0.10 m, et au delà de cette valeur, un désagrément dans la conception peut être constaté, en portant préjudice au distillateur solaire et n'ajoutant pas grande chose à son efficacité [177,147,178].

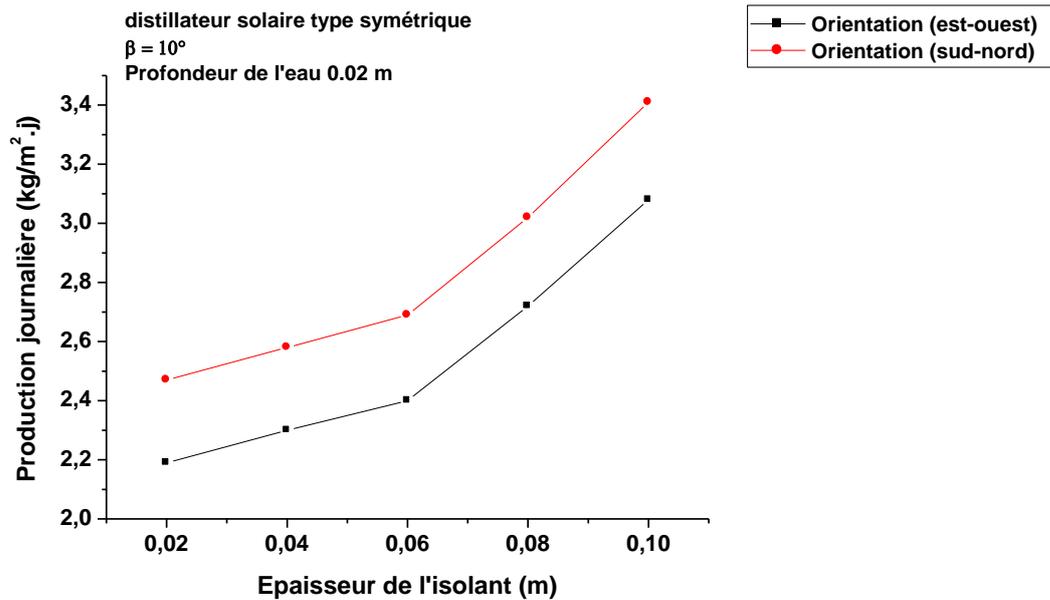


Figure IV.33 : Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la productivité journalière du distillateur solaire, type symétrique à effet de serre.

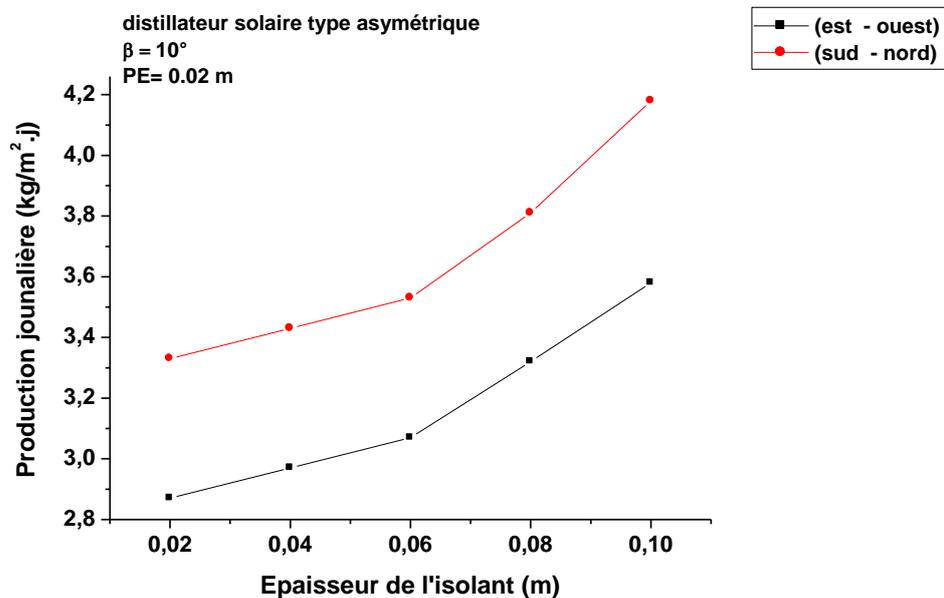


Figure IV.34 : Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la productivité journalière du distillateur solaire, type asymétrique à effet de serre.

Les figures (IV.33 et IV.34) , montrent l'allure des courbes représentatives de la production journalière, qui sont subdivisées en deux parties apparentes par rapport aux épaisseurs de l'isolant de 0.02 à 0.06 m et de 0.06 à 0.10 m respectivement, où on peut

constater que l'épaisseur de 0,06 m constitue le point d'interface pour le changement de direction vis-à-vis de la productivité correspondante dont cette dernière subit une légère croissance de l'ordre de 6 à 9% destinée pour la première partie et une croissance plus importante de la productivité allant de 16 à 29% , pour respectivement les deux distillateurs solaires considérés et dans les directions. Ceci explique que la productivité des distillateurs solaires croît légèrement dans la première partie et voit sa croissance grandement augmenter pour des épaisseurs supérieures à 0,06 m jusqu'à atteindre sa valeur maximale. Des chercheurs ont trouvé dans leur étude expérimentale que la productivité du distillateur solaire est significative lors de l'utilisation d'un isolant thermique d'une épaisseur supérieure à 0.06 m [179].

V.13. Conclusion

Un programme de simulation numérique est mis en place, afin d'étudier et de comparer numériquement, l'effet des différentes orientations sur la performance d'un distillateur solaire de type symétrique et à double pente avec celle issue d'un distillateur solaire de type asymétrique et à double effet aussi, et ce dans les mêmes conditions climatiques liées à la région de Constantine (Est de l'Algérie). Le 1^{er} Août 2005, est pris comme étant le jour de calcul car il est considéré comme le jour le plus chaud durant la dernière décennie (2002-2012).

Les résultats obtenus montrent qu'un angle de 10 ° représente l'angle optimal d'inclinaison avec lequel les deux distillateurs solaires peuvent recevoir le maximum de rayonnement solaire aux différentes considérées ainsi qu'une profondeur d'eau de 0,02 m représente la profondeur optimale de l'eau de bassin. De plus, la stabilité du rayonnement solaire constatée au niveau de l'orientation sud- nord conduit à une réception élevée du rayonnement solaire par les deux distillateurs solaires par rapport à l'autre orientation est – ouest, mais la plus grande valeur est obtenue pour le distillateur solaire de type asymétrique. Par conséquent, cette orientation donne un cumul élevé de la production horaire pour les deux distillateurs solaires. Cependant, la production horaire au niveau du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet semble plus élevée que celle enregistrée au niveau d'un distillateur solaire symétrique à double pente.

Le rayonnement solaire est impliqué dans l'optimisation des coefficients globaux d'échange interne de chaleur. La contribution des différents coefficients d'échange de chaleur dans l'élaboration du coefficient global d'échange interne se présente comme suit : Le

coefficient d'échange de chaleur par évaporation constitue une part significative du coefficient total d'échange interne avec un taux élevé d'environ 70%, suivi par le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement d'environ 23% et le reste est destiné pour le coefficient d'échange de chaleur par convection avec une part de 7%. Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation contribue majoritairement dans la production des distillateurs solaires, et où le coefficient de transfert de chaleur par évaporation est très recommandé pour plus de productivité.

La limite pratique d'une épaisseur optimale de l'isolant est de l'ordre de 0.10 m, et où une valeur plus grande ne peut pas avoir un effet positif à l'efficacité du système. L'épaisseur de 0,06 m constitue le point d'interface de changement de la direction vis à vis de la productivité correspondante, dont cette dernière subit une légère croissance de l'ordre de 6 à 9% , destinée pour la première étape et une croissance plus élevée de 16 à 29% pour respectivement les deux distillateurs solaires de type asymétrique et symétrique et dans les orientations considérées.

Les résultats issus de cette étude indiquent que non seulement distillateur solaire type asymétrique, implanté vers la direction sud-nord donne plus de productivité (22,57 %) par rapport au système de type symétrique et à double pente, mais il enregistre encore plus d'augmentation (16,76 %) dans la direction est-ouest, dans le cas des données météorologiques liées à la zone étudiée (Constantine, Algérie).

Finalement, on peut dire que l'orientation représente un paramètre important qui aide à améliorer la performance du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet, en associant l'optimisation d'autres opérationnels paramètres. Ceci nous conduit à obtenir un type de distillateur solaire parmi les plus simples et les moins coûteux car construit avec des matériaux locaux, avec une disponibilité de l'eau saumâtre et d'un ensoleillement suffisant. Il est donc suggéré que cette question mérite d'être étudiée profondément.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

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. Les enjeux du monde d'aujourd'hui qui se dirige vers ces deux ressources critiques qui sont inextricablement liés l'eau et l'énergie solaire. Le travail effectués dans le cadre de cette thèse, rapporte une contribution enchaînée aux travaux précédant dans ce domaine, après une recherche bibliographique approfondie effectuées dans le chapitre (I), sur les techniques et les modèles de dessalement de l'eau à la recherche des solutions qui peuvent accroître la disponibilité de l'eau potable, ceci nous a permis de constater que le dessalement de l'eau par différentes techniques et plus particulièrement la distillation solaire peut constituer une alternative au problème de la pénurie en eau, notamment dans les régions intérieures (aride, semi arides et au Sahara), qui sont caractérisées par la présence des eaux saumâtres et l'énergie solaire qui est largement disponible durant la majeure partie de l'année .

Au chapitre (II) , Cette partie est consacrée au : Gisement solaire et Thermique solaire qui comporte essentiellement la description de la source de l'énergie solaire 'le soleil', les données astronomiques du soleil-terre, nous avons exposés le rayonnement solaire comme énergie émise par le soleil qui nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques, en liaison aussi nous avons tenu en compte aussi des paramètres pouvant influencer l'énergie captée par un système distillation solaire et qui doivent être maîtrisés au préalable tels que : le mouvement terre-soleil, la position du soleil par rapport à la terre et l'orientation du distillateur solaire, dans ce cadre nous avons mis en valeur la meilleure position possible et utile d'un distillateur solaire pour capter le maximum de rayonnement solaire vis à vis de sa conception et de son orientation. En conséquence de cette meilleure position des unités de distillation adaptées, l'exploitation de cette énergie sera plus rentable dans le cas de l'intervention des principaux mécanismes de transfert chaleur et de masse dans le cadre de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, qui tend à améliorer les phénomènes de l'évaporation –condensation dans l'unité de distillation et qui conduit à recueillir le maximum de distillat.

Dans une autre étape (Chapitre III), Cette partie représente l'étude et l'analyse et la modélisation thermique des deux distillateurs solaires de type symétrique et asymétrique à effet de serre, une synthèse de cette démarche a abouti à la conception de chacun des deux modèles proposés à l'étude. Dans ce contexte , notre étude à permet l'optimisation d'un

nouveau concept de distillateur solaire type asymétrique à double effet possédant une seule pente, se compose de deux bassins étagés (à double effet), possédant une vitre (couverture intermédiaire) qui sert comme toit du bassin principal (1er effet) et en même temps comme base du deuxième bassin (second effet), la température de cette vitre est réduite par un film d'eau de refroidissement s'écoulant continuellement sur le verre. Cette disposition présente l'avantage d'augmenter la différence de température entre l'eau de bassin (premier effet) et la vitre et utilise la chaleur latente dans la vapeur d'eau de condensation sur la vitre du premier effet (bassin) afin de produire plus d'eau fraîche dans le second effet, l'autre modèle c'est un distillateur type conventionnel type symétrique à double pente et recouvert d'une vitre à deux versants (deux faces), une seule face de la couverture recevra les rayons solaires venant du sud, tandis que l'autre face elle sera du côté de l'ombre des rayons solaires. Les deux modèles sont implantés dans la région de Constantine ou règne dans les mêmes conditions climatiques, car nous avons choisi la journée la plus chaude durant la décennie allant de (2002 à 2012). On signale aussi que malgré l'apparition de cette différence existante entre les deux modèles sur le plan conception, mais conservent les mêmes qualités de matériaux de construction composants leur structure avec des caractéristiques physiques et optiques communs, ce qui a permis d'un côté d'absorber le maximum de rayonnement solaire et d'un autre côté de minimiser les pertes de chaleur, engendrant une augmentation de la température de l'eau de bassin qui tend à augmenter la production en intégrant les paramètres influant sur le fonctionnement des deux systèmes, à savoir les paramètres externes et internes. Enfin la mise en valeur des bilans énergétiques pour chacun des composants des deux modèles de distillateur solaire est basée sur des hypothèses explicites conduisant à élaborer des systèmes d'équations différentielles pour chacun des deux systèmes, ou nous avons introduit la méthode de résolution et le principe de la programmation.

Pour nous permettre de comparer les deux distillateurs solaires en vue de sélectionner le distillateur le plus performant, notre étude est basée sur un facteur principal, représenté par l'effet des différentes orientations : est-ouest et sud-nord, sur la performance des deux unités de distillations solaire, ceci est mis en valeur dans le chapitre 4. Nous avons pris en considération l'impact de certains paramètres opérationnels tels que :

L'impact du rayonnement solaire incident en concordance avec les angles d'inclinaison 10° ; 30° et 45° .

L'effet de la profondeur de l'eau de bassin.

L'effet des coefficients d'échange internes et externes.

L'effet de l'épaisseur de l'isolant sur la productivité des deux distillateurs solaire.

Un certain nombre de conclusions ont été dégagés après avoir validés les résultats obtenus avec comparaison avec celles obtenus par nombreux chercheurs :

- 10 ° représente l'angle optimal d'inclinaison de la couverture avec lequel les deux distillateurs solaires peuvent recevoir le maximum de rayonnement solaire aux différentes considérées dans les deux orientations (est-ouest) et (sud- nord).
- la stabilité du rayonnement solaire constatée au niveau de l'orientation sud- nord conduit à une meilleure réception du rayonnement solaire par les deux distillateurs solaires en comparaison avec l'orientation est – ouest, mais la valeur la plus élevée est obtenue pour le distillateur solaire de type asymétrique.
- la production horaire au niveau du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet semble plus élevée que celle enregistrée au niveau d'un distillateur solaire symétrique à double pente.
- 0,02 m représente la valeur optimale de la profondeur de l'eau de bassin des deux distillateurs solaire.
- Le coefficient d'échange de chaleur par évaporation constitue une part significative du coefficient total d'échange interne avec un taux élevé d'environ 70%, suivi par le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement d'environ 23% et le reste est destiné pour le coefficient d'échange de chaleur par convection avec une part de 7%. Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation contribue majoritairement dans la production des distillateurs solaires, il est très recommandé pour plus de productivité des deux unités de distillation.
- La limite pratique d'une épaisseur optimale de l'isolant est de l'ordre de 0.10 m, et où une valeur plus grande ne peut pas avoir un effet positif à l'efficacité du système.
- Les résultats issus de cette étude indiquent que non seulement distillateur solaire type asymétrique, implanté vers la direction sud-nord donne plus de productivité (22,57 %) par rapport au système de type symétrique et à double pente, mais il enregistre encore plus d'augmentation (16,76 %) dans la direction est-ouest, dans le cas des données météorologiques liées à la zone étudiée (Constantine, Algérie).

Enfin, on peut dire que l'orientation représente un paramètre important qui aide à améliorer la performance du distillateur solaire de type asymétrique et à double effet, en associant l'optimisation d'autres opérationnels paramètres. Ceci nous conduit à obtenir un type de distillateur solaire parmi les plus simples et les moins coûteux car construit avec des

matériaux locaux, avec une disponibilité de l'eau saumâtre et d'un ensoleillement suffisant. Il est donc suggéré que cette question mérite d'être étudiée profondément.

Perspectives :

Suite aux travaux effectués au cours de cette thèse et afin de concrétiser ces résultats très intéressantes , diverses perspectives peuvent être envisagées surtout en effectuant des travaux expérimentaux dans les diverses zones de 'Algérie connues comme zone aride, semi arides ou dans les profondeurs du Sahara qui sont caractérisés par une forte intensité du rayonnement solaire et la disponibilité en quantité de l'eau saumâtre sans négliger l'intégration d'autres paramètres local de chaque région, cela va bénéficier de ce potentiel important qui va sans doute contribuer à solutionner le problème de manque d'eau potable.

ANNEXE (1)

A1. Résolution des systèmes d'équations linéaires par La méthode itérative

A1.1. Introduction :

Les méthodes les plus fréquemment utilisées dans la résolution des systèmes d'équation linéaires sont des méthodes itératives stationnaires ou on a une formule itérative à un pas dans lesquelles on génère une suite vectorielle $(X^{(0)}, X^{(1)}, \dots, X^{(n)})$ convergente et plus rapidement possible, vers le vecteur solution (X^*) , dans cas on dira que la méthode converge.

A1.2. Méthode de Gauss Seidel [163] :

Il existe plusieurs méthodes itératives qui peuvent solutionner les systèmes d'équation linéaires parmi lesquelles qu'on a choisi : la méthode de Gauss Seidel d'itération qui est plus rapide en convergence et qui permet d'économiser plus de mémoire. On veut résoudre le système d'équation linéaire ci-dessous qui correspond à notre modèle :

$$\text{Soit : } A \times T = B \quad \text{A1.1}$$

- A : désigne une matrice carré d'ordre n ;
- B : est une matrice colonne ;
- T : représente le vecteur des inconnus ; $T = (T_1, T_2, T_3, \dots, T_n)$.

La matrice A étant décomposée en :

$$A = M - N \quad \text{A1.2}$$

$$\text{Ou } M = D - L \quad \text{A1.3}$$

$$\text{Et } N = U \quad \text{A1.4}$$

Avec D : matrice diagonale

L : matrice inférieure

U : matrice supérieure

La matrice 'A' peut s'écrire comme suit :

$$A = (D - L) - U \quad \text{A1.5}$$

La méthode itérative associée à l'égalité précédente consiste à partir d'un vecteur initial $T^{(0)}$ à générer la suite $T^{(1)}, T^{(2)}, \dots, T^{(k+1)}$ de la manière suivante :

$$T^{(1)} = (D - L)^{-1} \times U \times T^{(0)} + (D - L)^{-1} \times B \quad \text{A1.6}$$

Ce système peut être écrit :

$$(D - L) \times T^{(1)} = U \times T^{(0)} + B \quad \text{A1.7}$$

$$D \times T^{(1)} = L \times T^{(1)} + U \times T^{(0)} + B \quad \text{A1.8}$$

On aura :

$$T^{(1)} = D^{-1} x L x T^{(1)} + D^{-1} x U x T^{(1)} + D^{-1} x B \quad (\text{A1.9})$$

.....

$$T^{(k+1)} = D^{-1} x L x T^{(k+1)} + D^{-1} x U x T^{(k+1)} + D^{-1} x B \quad (\text{A1.10})$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient :

$$T_1^{(k+1)} = (B_1 - A_{12} \times T_2^{(k)} - A_{13} \times T_3^{(k)} - \dots - A_{1n} \times T_n^{(k)}) / A_{11} \quad (\text{A1.11})$$

$$T_2^{(k+1)} = (B_2 - A_{21} \times T_1^{(k+1)} - A_{23} \times T_3^{(k)} - \dots - A_{2n} \times T_n^{(k)}) / A_{22} \quad (\text{A1.12})$$

.....

$$T_n^{(k+1)} = (B_n - A_{n1} \times T_1^{(k+1)} - A_{n2} \times T_2^{(k+1)} - \dots - A_{n,n-1} \times T_{n-1}^{(k+1)}) / A_{nn} \quad (\text{A1.13})$$

A1.3. Algorithme et condition de convergence

L'algorithme de Gauss- seidel se résume comme suit :

$$Ti(k+1) = \left[Bi - \sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} \times T_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n A_{ij} \times T_j^{(k)} \right] / A_{ii} \quad (\text{A1.14})$$

On arrête les itérations si le système d'équations converge on aura :

$$|T_i^{k+1} - T_i^{(k)}| < \varepsilon \quad (\text{A1.15})$$

Où

$$\left| \frac{T_i^{k+1} - T_i^{(k)}}{T_i^{(k+1)}} \right| < \varepsilon \quad (\text{A1.16})$$

$$k = 1, 2, \dots, k_{max}$$

ANNEXE (2)

Propriétés physiques de l'eau et de l'air humide (T: température en °C, Corrélations entre 0 et 100 °C)

A2.1. Les expressions des propriétés physiques de l'eau sont données par [180]:

$$\lambda = -8.87 \times 10^{-6} T^2 + 2.238 \times 10^{-3} T + 0.5536 \text{ (W/ m. } ^\circ\text{C)}, \quad (r^2 = 0.9987) \quad (\text{A2.1})$$

$$C_p = 4180 \text{ (J/ kg. } ^\circ\text{C)} \quad (\text{A2.2})$$

$$\mu = 10^{-4} (0.00200 T^2 - 0.3389 T + 17.199) \text{ (Pa s)}, \quad (r^2 = 0.9815) \quad (\text{A2.3})$$

$$\rho = -0.00380 T^2 - 0.0505 T + 1002.6 \text{ (kg/m}^3\text{)}, \quad (r^2 = 0.9982) \quad (\text{A2.4})$$

$$L_v = 2495 - 2.346 T \text{ (Kj/ kg)}, \quad 0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C} \quad (\text{A2.5})$$

A2.2. Les expressions des propriétés physiques de l'air humide (mélange air – vapeur) sont données sous forme d'équation standard par Toyama et al. [20] en fonction de la température moyenne T_i , telle que :

$$T_i = (T_w + t_g)/2 \quad (\text{K}) \quad (\text{A2.6})$$

- La chaleur spécifique de l'air humide :

$$C_p = 999.2 + 0.1434 T_i + 1.01 \times 10^{-4} T_i^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_i^3 \text{ (J/kg .K)} \quad (\text{A2.7})$$

- La conductivité thermique :

$$K = 0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} T_i \text{ (W/m .K)} \quad (\text{A2.8})$$

- La viscosité dynamique :

$$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.62 \cdot 10^{-8} T_i \text{ (kg/m.s)} \quad (\text{A2.9})$$

- La densité du mélange (air –vapeur) :

$$\rho = 353.44/(T_i+273.15) \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (\text{A2.10})$$

- Le coefficient d'expansion volumique :

$$\beta_p = 1/ (T_i+273.15) \quad (\text{K}^{-1}) \quad (\text{A2.11})$$

2.3. Tableau A2.1 : Propriétés physiques de certains matériaux pouvant être utilisées comme absorbeur ou isolant [180].

Nature du corps	Masse Volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur massique Cp (J/kg. °C)	Conductivité λ (w/m. °C)
Cuivre	8954	383	386
Aluminium	2707	896	204
Acier pure	7897	452	73
Acier inox	7864	460	20
Zinc pure	7144	384	112.2
Laiton	8522	385	111
Béton plein	2300	878	1.75
Bois léger	525	3143	0.15
PVC	1459	930	0.21
Polyéthylène	929	1830	0.46
Polystyrène expansé	25	1380	0.033
Laine de verre	40	880	0.041
Polyuréthane	85	1300	0.045
Liège expansé	120	2100	0.044
Verre	2700	840	0.93
Plexiglas	1190	1465	0.19

2.4 Evaluation des pertes d'énergie dans un distillateur solaire à simple effet.

Tableau A 2.2 Pertes d'énergie dans un distillateur de type conventionnel bassin [182].

Nature des pertes	Pourcentage des radiations solaires(%)
1. évaporation du distillat (efficacité)	31
2. pertes d'énergie au sol et aux côtés	02
3. radiations solaires reflétées par le couvercle	11
4. radiations solaires absorbées par le couvercle	05
5. radiations de bassin d'eau au couvercle	26
6. convection interne	08
7. re-évaporation du distillat et pertes non-comptées	17
Total	100

ANNEXE (3)
PROGRAMME DE CALCUL
Programme informatique en langage "Matlab"

```
% Programmation 'Distillateur solaire symétrique '  
% Programme principal  
% Les structures de données utilisées:  
% Lecture des paramètres et des constantes *****  
NIter= .....  
format long  
% Ptés glass de la couverture en verre (g).  
eg = 0.003;  
cpg =840;  
Rog = 2700;% cor  
cpg =840;  
lambdag = 0.93;  
% Ptés absorbeur en 'aluminium'  
lambdab =204;  
eb = 0.001;  
Rob=2707;  
cpb=896;  
% Ptés Polystyrène comme isolant  
Rois=25;  
eis = 0.10;  
Cpis = 1380;  
lambdais =0.033;  
% Unité de temps  
dt = 1;  
% Hauteur caractéristique de l'eau  
Lhw=0.02;  
% *****  
Et = -0.103;% L'equation du temps (heure)  
% Ic = 1366.069;  
Ro = 0.2; % Albedo
```

```

Beta =10;% angle d'inclinaison de la couverture en degré ( en degré)
Io = 1367; % constante solaire
C = 0.97;
Fi = 36.22; % Latitude en degré
L = 6.37; % longitude
Sigma = 20.24; % angle d'inclinaison
a = 0.88;% a et b:Coefficient de trouble du ciel
b = 0.26;
V=(2.22)*ones(14,1); % Vm (vitesse moyenne du vent), 1°AOUT 2005
Ta =[300;302;303;306;312;313;314;316;317;312;310;307;305;303];% 1°AOUT 2005
Tl=[6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;16;17;18;19]; % Temps local
Tu =Tl-1; % Temps universel
% *****
Tge=zeros(14,1); % 13 lignes une colonne
Tgi=zeros(14,1); % 13 lignes une colonne
Tw=zeros (14, 1);
Tb=zeros (14, 1);
Tisi=zeros (14, 1);
Tise=zeros (14, 1);
Tge=zeros (14, 1);
Thrga= zeros (14, 1);
Thrwg= zeros (14, 1);
Thcwg= zeros (14, 1);
Thevwg= zeros (14, 1);
Thcbw= zeros (14, 1);
Thcga=zeros (14, 1);
Th=zeros (14, 1);
Prw=zeros (14, 1);
Prg=zeros (14, 1);
TRow=zeros (14, 1);
Tlambdaw=zeros (14, 1);
Tcpw=zeros (14, 1);
TBetad=zeros(14,1);
TMuw=zeros (14, 1);

```

```

TLv=zeros (14, 1);
TQevwg=zeros (14, 1);
Tmd=zeros (14, 1);
% *****TRAITEMENT *****
% calcul des coefficients d'échange indépendant de la température
% Coefficient d'échange Thermique par conduction à travers la vitre
hcdg = lambdag / eg;
% Coefficient d'échange Thermique par conduction à travers l'absorbeur
hcdbis = lambdab / eb;
% Coefficient d'échange Thermique par conduction à travers l'isolant
hcdis = lambdais / eis;

% Coefficient d'échange Thermique par convection due à la vitesse du vent
entre la vitre et le milieu ambiant
hcga =[14;1];
hcga = 5.7 + 3.8 * V;

% *****calcul de l'intensité du rayonnement global "IG " *****
% calcul_IG (w/m2);
% Les angles sont en radian
disp ('Tl=');
disp (Tl);
disp('Tu=');
disp(Tu);
W = 15*(Tu-12)+L+Et/4; % angle horaire
disp ('W=');
disp (W);
%-----
Sinh=cos(Fi*pi/180)*cos(Sigma*pi/180)*cos(W*pi/180)+sin(Fi*pi/180)*sin(Sigma*pi/180);
disp('Sinh = ');
disp (Sinh);
%-----
ToD = a * exp (-b ./ Sinh ); %
Disp('ToD = ');

```

```

disp (ToD);
%-----
IDh = Io * C*ToD;
disp('IDh = ');
disp(IDh);
%-----
Cosi = cos((Fi-Beta)*pi/180)*cos(Sigma*pi/180)*cos(W*pi/180)+sin((Fi-Beta)*pi/180)...
      *sin(Sigma*pi/180);%i angle d'incidence
disp('Cosi = ');
disp(Cosi);
%-----
ID = IDh .* Cosi;
disp('ID = ');
disp(ID);
%-----
Tod = 0.2710 - 0.2939 * ToD ; %
disp ('Tod = ');
disp (Tod);
%-----
Idh = Io * C*Sinh.*Tod;
disp ('Idh = ');
disp (Idh);
%-----
Idc = Idh * (1+cos (Beta*pi/180))/2
disp ('Idc = ');
disp (Idc);
%-----
Ids = Ro * (1-cos(Beta*pi/180))/2 * (Idh.*Sinh+Idh);
disp ('Ids = ');
disp (Ids);
%-----
Id = Idc + Ids;
disp ('Id = ');
disp (Id);

```

```

%-----
IG = ID +Id;
disp ('IG = ');
disp (IG);
% ***** fin*****
%***** calcul de la puissance absorbée par la vitre "Pg " *****
% calcul_Pg(w/m2);
% Pour le rayonnement direct
RD=0.04;
TD = 0.923071;
alphagD = 1-RD-TD;
disp('alphagD=');
disp(alphagD);
% Pour le rayonnement diffusé
i=acos(Cosi); angle d'incidence
sinteta=0.667*sin (i); n1/n2 =1/1.5=0.667
teta=asin(sinteta);
RNg = (sin(teta-i).^2./sin(teta+i)).^2;
RPg = (tan(teta-i).^2./tan(teta+i) ).^2;
Rdg = (RNg +RPg)/2;
KG = 0.002;
Tag = exp (-KG*eg/cos(teta));
Trg = (1- Rdg)/(1+Rdg);
Tdg = Trg .* Tag';
alphaGd = 1- Rdg - Tdg;
% Pg = (ID * alphagD) + (Id .*alphaGd);
% ***** calcul de la puissance absorbée par la nappe d'eau Pw *****
% calcul_Pw (w/m2);
alphawD = 1.59537534607637;
n1=1; % coef d'extraction de l'air
n2=1.33; % coef d'extraction de l'eau
Sinteta=0.751879699*sin(i); n1/n2=0.751879699
teta=asin(Sinteta);
RNw =(sin(teta-i).^2./sin(teta+i)).^2;

```

```

RPw = (tan(teta-i).^2./tan(teta+i) ).^2;
Rw = RNw +RPw;
alphaw = 0.3;
alphab = 0.95;
TRw = alphaw -Rw;
Rdw = RNw +RPw;
Trw = (1 - Rdw)/(1+ Rdw);
Kw = 0.0000004714;
Taw = exp(-Kw * Lhw /cos(teta));
Tdw = Trw .* Taw';
alphawd = Tdw .*(alphaw+Trw*alphab);
% 2 manieres pour alphawd
Pw = (ID * alphawD) + (Id .*alphawd);

%*****calcul de la puissance absorbée par l'absorbeur "Pb" *****
% calcul_Pb (w/m2);
TDb = 0.996951;
n3 =1.33; coef d'extraction de l'eau
n4 = 1.44; coef d'extraction de l'absorbeur
sinteta=0.923611111*sin(i);
teta=asin(sinteta);
RNb = (sin(teta-i).^2./sin(teta+i)).^2;
RPb = (tan(teta-i).^2./tan(teta+i) ).^2;
Rdb = (RNb +RPb)/2;
Tab = exp (-KG*eb/cos(teta));
Trb = (1- Rdb)/(1+Rdb);
Tdb = Trb .* Tab';
Pb = alphab*( (ID *TDb) + (Id.*Tdb) ) ./ (1-(1- alphab)*Rdb);
clc;% efface l'ecran
% ***** calcul de la temperature du ciel " Tc" *****
calcul_Tc(°K);
% Ta temperatures ambiantes en (°K)
Tc = 0.0552*(Ta).^1.5;
% conditions initiales*****

```

```

conditions_ini;% 6h
%*****conditions initiales*****
% Initialisation des vecteurs solution conditions; températures à 6h ;
tge = Ta(1,1);
tgi =Ta(1,1) +1;
tw = Ta(1,1) +2;
tb = Ta(1,1) +3;
tisi = Ta(1,1) +1 ;
tise= Ta(1,1);
% pour chaque temps on fait NIter itérations
for tps =1:14
for step=1:NIter
%*****calcul des propriétés de l'eau et de l'air humide*****
Prg(tps,1) = exp(25.32- 5144/tgi);
Prw (tps,1) = exp(25.32- 5144/tw);
Row = 999.879395+0.04694*(tw-273) -0.66725*0.01*(tw-273)^2+0.208229*0.0001*(tw-
273)^3;
lambdaw =0.5692+0.1858*0.01*(tw-273)-0.74999*0.00001*(tw-273)^2;
cpw =4216.664 - 3.165*(tw-273)+0.0886749*(tw-273)^2-0.10106375*0.01*(tw-
273)^3+0.44909529*0.00001*(tw-273)^4;
Betadw= 1/(tw);
Muw =(5.449- 0.1067*(tw-273)+ 7.325*0.0001* (tw-273)^2)/3600;
Lv = 3044205.5 -1679.1109 * tw - 1.14258 *tw^2;
Roair= 353.44/((tw+tgi)/2)+273.15;
lambdaair =abs (0.0244+0.7673*0.0001*((tw)+(tgi))/2);
Alphaair=(7.7255*0.0000000001)*(((tw+tgi)/2)+ 2730 )^(1.83);
Muair=(1.718*0.00001)+(4.620*0.00000001)*((tw+tgi)/2);

*****calcul des coefficients d'échange dépendant de la température *****
% Calcul des coefficients d'échange par rayonnement entre la vitre et le milieu extérieur;
Epsg = 0.88;
Sigma =0.0000000567;
hrga = 0.88* 0.0000000567 *( (tge.^2 + Tc(tps,1).^2) * (tge+Tc(tps,1)));

```

%Calcul du coefficient d'échange par rayonnement entre l'eau du bassin et face intérieure de la vitre;

%Epsw = 0.82;

hrwg = 0.82* 0.0000000567 *((tw.^2 + tgi.^2) * (tw+ tgi));

%Calcul du coefficient d'échange par convection entre l'eau du bassin et face intérieure de la vitre;

hcwg = abs(0.884* ((tw - tgi) + ((Prw(tps,1)-Prg(tps,1))*twf)/(268.9*1000-Prw(tps,1)))
.^(1/3));

%Calcul du coefficient d'échange par évaporation entre l'eau du bassin et face intérieure de la vitre;

hevwg = 16.273*0.001*(hcwg)*((Prw(tps,1)-Prg(tps,1))/(tw-tgi));

%Calcul du coefficient d'échange par convection entre l'eau du bassin et l'absorbeur ;

Gr = abs(Betad *Row.^2*9.81*Lhw.^3*(tb-tw))./Muw.^2;

Pr = (Muw*cpw)/lambdaw;

hcbw =((0.54*lambdaw)/(Lhw))*((Gr*Pr)^(0.25));

% Calcul du coefficient d'échange interne global ;

h1=hrwg+hcwg +hevwg;

% Calcul du coefficient d'échange externe ;

h2=hcga(tps,1)+hrga;

%*****calcul des éléments de la matrice*****

A = zeros(6,6);

A(1,1) = ((Rog * eg * cpg)/ (2* dt)) + hrga + hcga(tps,1) +(lambdag / eg);

A(1,2) = -lambdag /eg;

A(2,1) = -lambdag /eg;

h1 = hrwg + hcwg +hevwg;

A(2,2) = ((Rog * eg * cpg)/ (2* dt)) + (lambdag / eg)+h1;

A(2,3) = -h1;

A(3,2) = -h1;

A(3,3) = (Row *Lhw*cpw/dt) +h1 +hcbw;

A(3,4) = -hcbw;

```

A(4,4) = (Rob*eb*cpb)/(1) + hcbw +hcdbis;
A(4,3) =-hcbw;
A(4,5) = -hcdbis;
A(5,4) =-hcdbis;
A(5,5) = Rois*eis*Cpis/2*dt+hcdbis+lambdais/eis;
A(5,6) = -lambdais/eis;
A(6,5) =-lambdais/eis;
h2= hcga(tps,1)+hrga;
A(6,6) =Rois*eis*Cpis/2*dt+lambdais/eis+h2;
B(1,1)=( (Rog * eg * cpg)/ (2* dt) ) *tge +hrga*Tc(tps,1) + hcga(tps,1)*Ta(tps,1);
B(2,1) = ( (Rog * eg * cpg)/ (2* dt) ) *tgi+ PG(tps,1);
B(3,1) = (Row *Lhw*cpw/dt)*tw +Pw(tps,1);
B(4,1)=(Rob*eb*cpb)*tb +Pb(tps,1);
B(5,1) = (Rois*eis*Cpis/2*dt)*tisi;
B(6,1) = (Rois*eis*Cpis/2*dt)*tise +(h2*Ta(tps,1));
%***** fin éléments_mat*****

%*****methode Gauss Seidel*****

% fonction Gauss_Seidel
% Entrées : matrice carrée A, vecteur colonne Bn,1
%Sorties : vecteur solution Xn,1
%Résoudre A X = B,
n=6;
Eps = 0.00001*ones (n, 1);
kmax =100;
%Initialisation du vecteur solution
Xkplus à l'itération k+1
Xkplus = Xk;
clc;
for k= 1:kmax
    for i=1:n % indice du tableau X
        S1 =0;
        for j=1:i-1
            S1 =S1 + A(i,j)*Xkplus(j);

```

```

    end %for j
    S2 =0;
    for j=i+1: n
        S2 =S2 + A(i,j)*Xk(j);
    end %for j
    Xkplus(i) = ( B(i,1) -S1 -S2)/A(i,i) ;
end % for i
if (abs (Xkplus - Xk)./ abs (Xkplus))< Eps
    break; %sortie de la boucle k
end %if
Xk = Xkplus;
end % for k
%*****fin fonction Gauss_Seidel*****

%***** Test de convergence *****
S= zeros(1,n);
for i= 1,n
    for j=1,n
        if i<>j
            S(1,i)=S(1,i)+abs(A(i,j)/A(i,i))
        end
    end
end
Un = ones(1,n)
if S < Un
    disp(" méthode convergente")
else
    disp(" méthode non convergente")
end
***** Fin test de convergence*****

%***** Résolution du système par Gauss Seidel*****
% Initialisation du vecteur solution de la méthode Gauss Seidel

```

```

Xk(1,1)=tge;
Xk(2,1)=tgi;
Xk(3,1)=tw;
Xk(4,1)=tb;
Xk(5,1)=tisi;
Xk(6,1)=tise;
disp('step=');
disp(step);
disp('Xk='); % vecteur solution trouvé par Gauss Seidel
disp(Xk);
% Mise à jour des vecteurs solution ( températures)
tge=Xk(1,1);
tgi=Xk(2,1);
tw=Xk(3,1);
tb=Xk(4,1);
tisi=Xk(5,1);
tise=Xk(6,1);
disp('tps');
disp(tps);
disp('step');
disp(step);
disp('tge');
disp(tge);
disp('tgi');
disp(tgi);
disp('tw');
disp(tw);
disp('tb');
disp(tb);
disp('tisi');
disp(tisi);
disp('tise');
disp(tise);

```

```

    end% for step
***** Sauvegarde des vecteurs solution *****
% Conversion des températures en degré celsius
Tge(tps,1)=tge-273;
Tgi (tps,1) =tgi-273;
Tw(tps,1)=tw-273;
Tb (tps,1)=tb-273;
Tisi(tps,1)=tisi-273;
Tise(tps,1)=tise-273;

% Calcul rendement *****
rendement;
% conversion des températures en degré celsius
Tge(tps,1)=tge-273;
Tgi (tps,1) =tgi-273;
Tw(tps,1)=tw-273;
Tb (tps,1)=tb-273;
Tisi(tps,1)=tisi-273;
Tise(tps,1)=tise-273;
% stocker les variables trouvées pour le temps courant -tps- dans des tableaux globaux ;
Tlambdaw(tps,1)=lambdaw;
TRow(tps,1)=Row;
Tcpw(tps,1)=cpw;
TBetad(tps,1)=Betad;
TMuw(tps,1)=Muw;
TLv(tps,1)=Lv;
Thrga(tps,1)=hrga;
Thrwg(tps,1)=hrwg;
Thcwg(tps,1)=hcwg;
Thevvg(tps,1)=hevvg;
Thcbw(tps,1)=hcbw;
Th(tps,1)=h;
TQevvg(tps,1)=Qevvg;
Tmd(tps,1)=md;

```

```

end %for tps
%***** Calcul du rendement *****
%keyboard;
% calcul de la quantité de chaleur échangée par évaporation entre l'eau et la vitre
Qevwg =hevwg*(tw-tgi); % à chaque heure
% Calcul du débit d'eau distillée à chaque heure "md" ou (mew)
md= mew =(Qevwg/Lv)*3600;
(%) Calcul de l'efficacité globale "ηg"
ηg = (Qevwg./IG) ; (%) (ou bien) en
ηg =(md*Lv/ IG) ;
(%) Calcul de la quantité de chaleur reçu par la masse d'eau par unité de temps
(%) Condition de calcul de alphas,
if i=0-30
    alphas= 0.8514
else if i=30-45
    alphas=0.833485
else if i=45-60
    alphas=0.7718
end
end
end
Qw =alphas*IG; Qw en (w/h)
(%) Calcul de l'efficacité interne (ηi) à chaque heure, i= angle d'incidence
ηi = (Qevwg./Qw); % ou bien en
ηi =(md*Lv /Qw) ;
(%) Calcul de la production journalière"mdj"
mdj=sum(Tmd);
(%) Calcul du Facteur de Performance Horaire "FPH"
FPH= (md./Qw)*100;
(%) Calcul de performance brut "FP"
FP= (md./Qw)*100;
(%) Calcul de la quantité d'énergie entrée en une journée
Qwj= sum(Qw);

```

(%) Calcul du Facteur de Performance Brut "FPB"

FPB=mdj/Qwj;

%disp('FPB');

%disp(FPB);

%FP= (Tmd. /Qw);

%disp('FP');

%disp(FP);

***** Fin calcul rendement*****

*****Affichage des résultats*****

disp('Tge=');

disp(Tge);

disp('Tgi');

disp(Tgi);

disp('Tw');

disp(Tw);

disp('Tb');

disp(Tb);

disp('Tisi');

disp(Tisi);

disp('Tise');

disp(Tise);

disp('Prg');

disp(Prg);

disp('Prw');

disp(Prw);

disp('Pw');

disp(Pw);

disp('IG');

disp(IG);

disp('PG');

disp(PG);

disp('Pb');

disp(Pb);

disp('TLv');
disp(TLv);
disp('Thrga');
disp(Thrga);
disp('Thrwg');
disp(Thrwg);
disp('Thcwg');
disp(Thcwg);
disp('Thevvg');
disp(Thevvg);
disp('Thcbw');
disp(Thcbw);
disp('hcga');
disp(hcga);
disp('Th');
disp(Th);
disp('TRow');
disp(TRow);
disp('Tlambdaw');
disp(Tlambdaw);
disp('TBetad');
disp(TBetad);
disp('TMuw');
disp(TMuw);
disp('Tcpg');
disp(Tcpg);
disp('TQevvg');
disp(TQevvg);
disp('ng');
disp(ng);
disp('Qw');
disp(Qw);
disp('ni');
disp(ni);

```
disp('Tmd');
disp(Tmd);
disp('FPH');
disp(FPH);
disp('FP');
disp(FP);
disp('Qwj');
disp(Qwj);
disp('mdj');
disp(mdj);
disp('FPB');
disp(FPB);
plot(Tl,IG);
%plot(hcga,V); %NEW
***** FIN DU PROGRAMME *****
```

Références Bibliographiques

- [1] Renewable In Global Energy Supply, An IEA Fact Sheet, International Energy Agency, Novembre 2002.
- [2] ADEME, Efficacité Energétique, Panorama Mondial – Synopsis, Conseil Mondial de l’Energie.
- [3] Le baromètre du solaire thermique, Systèmes solaires n°163, EurObserv’ER, Octobre 2004.
- [4] Baromètre de la géothermie, Systèmes solaires n°156, EurObserv’ER, Août 2003.
- [5] Wood Energy Barometer, Systèmes solaires n°158, EurObserv’ER, Décembre 2003.
- [6] Y. Himri et al., An investigation on wind power potential in Tindouf region Algeria, In: Proceedings of world academy of science, engineering and technology, vol. 32, WASET 2008 congress [ISSN: 1307-6884].
- [7] J.W. Lund, D.H. Freeston, T.L. Boyd, Worldwide direct uses of geothermal energy, In: Proceedings of world geothermal congress of Antalya, Turkey; 2005.
- [8] Boudghene, A. Stambouli, Overview and perspectives of the Algerian renewable energy. In: Programme environment conference (2007).
- [9] S.Hattabi, Algeria in pole position, Published in Energy and Mines sector, Periodic review of the Energy and Mines sector, Link, no. 2; p. 105. , April 2004.
- [10] G.N.Tiwari, H.N. Singh, and R.Tripathi, Present status of solar distillation, Solar Energy, 75(2003) 367-373.
- [11] L.Saikku, A. Rautiainen and P.E. Kauppi, The sustainability challenge of meeting carbon dioxide targets in Europe by 2020, Energy Policy 36 (2008) 730-742.
- [12] UN, Development goals report 2007, New York, United Nations.
- [13] M. Parry, O. Canziani, and J. Palutikof, Key IPCC conclusions on climate change impacts and adaptations, WMO Bulletin, 57(2) (2008) 77-85.
- [14] B. Bouchekima, G. Bernard, R. Ouahes, M. Diboun, Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire, Int. J. Therm. Sci . 39(2000) 442-459.
- [15] R .Tripathi, G.N. Tiwari, "Performance Evaluation of a Solar Still by Using the Concept of Solar Fractionation, Desalination169 (2004) 69- 80.
- [16] Alain Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnelles d'approvisionnement en eau douce, Edition : Technique et Documentation, Paris(2001).

- [17] A. Maurel, Desalination of sea water and brackish water, Saint Paul Lez Durance, CEA, p14, May 1990.
- [18] C.Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, and T. Melin, State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination* 216(2007)1-76.
- [19] K.A. Al-Shayji, Modeling, Simulation and Optimization of Large-Scale Commercial Desalination Plants, Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, (1998).
- [20] B.Boucekima, B. Gros, R. Oahes, and M.Diboun, Performance study of the capillary film solar distiller, *Desalination* 116(1998)185-192.
- [21] A.D.Khawajia, I.K.Kutubkhanaha, J-M.Wieb, Advances in seawater desalination technologies, *Desalination* 221(2008) 47–69.
- [22] P. Danis, Dessalement de l'eau de mer, *Techniques de l'Ingénieur*, J 2700. Juin 2003.
- [23] D. Mowla, G.Karimi, Mathematical modelling of solar stills in Iran, *Solar Energy* 55 (1995)389-393.
- [24] O.K. Buros, The ABCs of Desalting, Second ed., International Desalination Association, Topsfield, Mass, 2000.
- [25] Sidem, "Fresh water through desalination", Paris, 27 Mai 1997.
- [26] C .Galus , "Les techniques de dessalement de l'eau de mer prennent de l'essor", extrait du monde, 23, 2000.
- [27] R. Vaillantl , Problème du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. , Editions Eyrolles (1975) , France.
- [28] W. E. Johnson, State of the art of freezing processes, their potential and future, *Desalination* 19(1976) 349 – 358.
- [29] J.H. Fraser, Absorption freezing vapor compression – process selection, pilot plant design, process economics, *Desalination*, 33 (1980) 85-98.
- [30] Sodha et al., Double basin solar still, *Energy Conversion*, 20(1), 23 (1981c).
- [31] G.N. Tiwari, and B.Rao,Transit Performance of single basin solar still with water flowing over the glass cover,*Desalination*,48 (1),101 (1983).
- [32] K.K. Vinoth, R.K. Bai, Performance study on solar still with enhanced condensation, *Desalination*; 230(1–3) (2008) 51–61.
- [33] AY. Maalej, Solar still performance, *Desalination* 82 (1991) 197–205.
- [34] M.A.S. Malik, N .Tiwari, A. Kumar, M.S. Sodha, Active and passive solar distillation: a review, *Solar distillation*, UK: Pergamon Press; 1982.

- [35] K.K. Murugavel, Chockalingam, K. Srithar, Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still, *Desalination* 220(2008) 677–86.
- [36] K .Sampath kumar, T.V. Arjunan, P. Pitchandi, P. Senthilkumar, Active solar distillation — a detailed review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 1503–26.
- [37] K. Aayush Varun, Solar stills: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(2010) 446–53.
- [38] V. Velmurugan, K. Srithar, Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity, a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011)1294–304.
- [39] A.E. Kabeel, S.A. El-Agouz, Review of researches and developments on solar stills, *Desalination* 276(2011)1–12.
- [40] Julie Beauséjour , Conception d'un distillateur solaire pour le traitement des effluents d'une tannerie Mexicaine , Thèse de M. Sc. A de Génie Civil, Université de Montréal, Canada, 2003.
- [41] E. Sartori, Solar still versus solar evaporator: A comparative study between their thermal behaviours, *Solar Energy* 56 (2) (1996)199-201.
- [42] H.Ali, Experimental study on air motion effect inside the solar still performance, *Energy Conversion & Management* (32) (1991)67-70.
- [43] S. Suneja, G.N.Tiwari, Effect of water flow on internal heat transfer solar distillation, *Energy Conversion & Management* 40 (5) (1999)509-518.
- [44] H.S.Kwatra , Performance of a solar still: Predict effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature, *Solar Energy* 56(3) (1996) 261-266.
- [45] P.I.Cooper, The absorption of radiation in solar stills, *Solar energy* (12) (333-346) 1969.
- [46] S .Kumar, G.N. Tiwari , H.N. Singh, Annual performance of an active solar distillation system, *Desalination* (5) (1) (2000) 79-88.
- [47] B.A. Akash, M.S. Mohsen, W. Nayfeh, Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions, *Energy Conversion & Management* 40 (9)(2000) 67-70.
- [48] Minasian and Al-Karagouli, An improved solar still: The wick-basin type, *Energy Conversion & Management* (36) (3) (1995) 213-217.
- [49] H.Tanaka, T. Nosoko , T. Nagata, A highly productive basin-type multiple effect coupled solar still, *Desalination* (130) (3) (2000) 279-294.
- [50] N. Al Mahdi , Performance prediction of a multi-basin solar still, *Energy* 17(1) (1992) 87–93.

- [51] M.S. Sodha, J.K. Nayak, G.N. Tiwari, Ashvini Kumar, Double basin solar still, *Energy Conversion and Management* 20(1979)23–32.
- [52] S. Harpreet, Kwatra, Performance of a solar still: predicted effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature, *Solar energy* 56(3) (1996) 261–266.
- [53] V.S.V. Bapeshwararao, U.Singh, G.N. Tiwari, Transient analysis of double basin solar still, *Energy Conversion and Management* 23(2) (1983) 83–90.
- [54] S. Toyama, T. Aragaki, K. Murase, Simulation of a multi effect solar distillator, *Desalination* 45(1983)101–8.
- [55] B.A.K. Abu-Hijleh, Enhanced solar still performance using water film cooling of the glass cover, *Desalination* 107(1996) 235–44.
- [56] G.N. Tiwari, H.P. Madhuri Garg, Effect of water flow over the glass cover of a single basin solar still with an intermittent flow of waste hot water in the basin, *Energy Conversion and Management* 25(1985) 315–22.
- [57] Mousa Abu-Arabi, Yousef Zurigat, Hilal Al-Hinaib, Saif Al-Hiddabib, Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling, *Desalination* 143(2002)173–82.
- [58] B.A.K. Abu-Hijleh, A.M. Hasan, Water film cooling over the glass cover of a solar still including evaporation effects, *Energy* 22(1) (1997) 43–48.
- [59] H. Yousef, M. Abu-Arabi, Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit, *Applied Thermal Engineering* 24(2004)1061–72.
- [60] J. Prakash, K. Kavathekar, Performance prediction of a regenerative solar still, *Solar and Wind Technology* 3(2) (1986) 119–25.
- [61] D.K. Dutt, Kumar Ashok, J.D. Anand, G.N. Tiwari. Performance of a double-basin solar still in the presence of dye, *Applied Energy* 32(1989) 207–223.
- [62] G.N. Tiwari, S. Chetna, Y.P. Yadav. Effect of water depth on the transient performance of a double basin solar still, *Energy Conversion and Management* 32(3) (1991)293–301.
- [63] H. Yeh, Experimental studies on upward-type double effect solar distillers with air flow through the second effect, *Energy* 18(11) (1993) 1107–1111.
- [64] M.A. Hamdan, A.M. Musa, B.A. Jubran, Performance of solar still under Jordanian climate, *Energy Conversion and Management* 40(1999) 495–503.
- [65] G.M. Cappelletti, An experiment with a plastic solar still, *Desalination* 142(2002) 221–227.

- [66] H. Al-Hinai, M.S.Al-Nassri, B.A. Jubran, Parametric investigation of a double- effect solar still in comparison with a single-effect solar still. *Desalination* 150 (2002)75–83.
- [67] K. Fukui, N .Takehiro, T. Hiroshi, N .Takashi, A new maritime life saving multiple-effect solar still design, *Desalination* 160(2004) 271–83.
- [68] A.A. Al-Karaghoulia, W.E. Alnaserb, Experimental comparative study of the performances of single and double basin solar-stills, *Applied Energy* 77(2004) 317–25.
- [69] A.A. Al-Karaghoulia, W.E. Alnaserb, Performances of single and double basin solar-stills. *Applied Energy* 78 (2004) 347–54.
- [70] A. Kumar, J.D.Anand, G.N.Tiwari, Transient analysis of a double slope-double basin solar distiller, *Energy Conversion and Management* 31(2) (1991)129–139.
- [71] T. Rajaseenivasan, T. Ilango, K.K. Murugavel, Comparative study of double basin and single basin solar still, *Desalination* 309(2013) 27–31.
- [72] G.N. Tiwari, S. Sangeeta, Performance evaluation of an inverted absorber solar still. *Energy Conversion and Management* 39 (1998) 173–80.
- [73] S. Sangeeta, G.N.Tiwari, Effect of water depth on the performance of an inverted absorber double basin solar still, *Energy Conversion and Management* 40(1999)1885–97.
- [74] S .Sangeeta, G.N. Tiwari, S.N. Rai, Parametric study of an inverted absorber double-effect solar distillation system, *Desalination* 109 (1997)177–86.
- [75] S. Sangeeta, G.N .Tiwari, Parametric studies of an inverted absorber triple effect solar still, *Energy Conversion and Management* 40(1999)1871–84.
- [76] S. Sangeeta, G.N.Tiwari, Optimization of number of effects for higher yield from an inverted absorber solar still using the Runge–Kutta method, *Desalination* 120(1998)197–209.
- [77] G.N.Tiwari , Enhancement of dally yield in a double basin solar still, *Energy Conversion and Management* 25(1)(1985) 49–50.
- [78] Y.P. Yadav, Transient analysis of double-basin solar still integrated with collector. *Desalination* 71(1989) 151– 64.
- [79] G.N. Tiwari, S.A.Lawrence, Thermal evaluation of high temperature distillation under an active mode of operation, *Desalination* 85 (1992)135–45.
- [80] S. Kumar, G.N. Tiwari, Optimization of daily yield for an active double effect distillation with water flow, *Energy Conversion and Management* 40(1999) 703–15.
- [81] S.Kumar, G.N.Tiwari, Performance evaluation of an active solar distillation system. *Energy* 21(9) (1996) 805–808.

- [82] N.S.Al Baharna, N .Al Mahdi, F.Zaky , Performance integrated analysis of a triple-basin still with a natural circulation solar heater, *Energy Conversion and Management* 34(7) (1993) 545–556.
- [83] Y.P. Yadav, Performance analysis of a solar still coupled to a heat exchanger, *Desalination* 91(135–44)1993.
- [84] A.Kumar, M. Singh, J.D. Anand, Transient performance of a double-basin solar still integrated with a heat exchanger, *Energy* 14(10)(643–52) 1989.
- [85] G.N Tiwari, S.B.Sharma, Analytical study of double effect distillation under active mode of operation, *Energy* 16(6) (951–8)1991.
- [86] H.E.S.Fath , High performance of a simple design, two effect solar distillation unit, *Desalination* 107(223–33)1996.
- [87] A.Madhlopa, C.Johnstone, Numerical study of a passive solar still with separate condenser, *Renewable Energy* 34(1668–77) 2009.
- [88] Pierre Henri COMMUNAY, *Le gisement solaire: Méthodes et calcul, Héliothermique* 2002.
- [89] R. Bernard, G. Menguy and M. Schwartz, *Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et documentation, 2^{ème} édition.* 1980 (215).
- [90] P. Bessemoulin, J. Oliviéri, *Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, La météorologie 8^{ème} série n° 31 septembre (2000) 42-59.*
- [91] Zekai ,Sen. *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*, Springer 2008
- [92] Bent Sørensen, *Renewable Energy: Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy, and Planning Aspects.* (3rd.ed), Elsevier 2004.
- [93] J.M. Chassériaux, *Conversion thermique du rayonnement solaire*, Dunod, Paris, 1984.
- [94] A. Ricaud, *Photopiles solaire de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédé*, Presse polytechnique et universitaire roman Lausanne, les CH-1015, (1997) 15-24.
- [95] Alain Ricaud, *Gisement solaire et transferts énergétiques*, Jan-2011.doc. Université de CERGY-PONTOISE .France.
- [96] J. Bernard, *Génie énergétique, Energie solaire, calculs et optimisation*, Ellipes édition marketing, 2004 .
- [97] M. Capderou, *Atlas Solaire De l'Algérie*, EPAU, Tome I, II, III. (1986).
- [98] P.I. Cooper, Digital of transient solar still process, *solar energy* (12) 313 (1969).
- [99] Viorel Badescu, *Modeling solar radiation at the earth's surface*, Springer (2008).

- [100] G.N.Tiwari, Fundamentals design Modeling and Applications, centre for Energy studies, Indian institute of Technology, Alpha Science edition, February 8, 2002, New Delhi,India.
- [101] P.M. Tekaekara, Solar energy engineering, Ed. A.A.M. Sayigh, Academic Press, New-York.
- [102] J. A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York USA, (5) (41) (2006) 85-103.
- [103] B. Boucekima, Recherche des conditions optimales pour le dessalement des eaux saumâtres à l'aide du distillateur à film capillaire. Thèse de doctorat d'état USTHB, Alger (2001).
- [104] M.Kleemann ,M.Melib, Regenerative de l'énergie , Verlag, Springer 1988 .
- [105] T.J.Jansen, Solar Engineering Technology, New Jersey: Prentice-Hall Inc. Johnson, F.S., 1954, The solar constant, Meteorology 11 (1985) 431.
- [106] T.Tesfamichael, E. Wäckelgård, Angular solar absorptance and incident angle modifier of selective absorbers for solar thermal collectors. Solar Energy 68 (2000) 335-341.
- [107] J.E. Braun, J.C.Mitchell, Solar geometry for fixed and tracking surfaces. Solar Energy, 31 (1983) 439- 444.
- [108] H.P. Garg, Fundamentals of Solar Energy. New York: John Wiley & Sons. Treatise on Solar Energy, vol. 1(1982).
- [109] Amos Madhlopa, Development of an advanced passive solar still with separate condenser, Thesis submitted for the degree of Doctor in Mechanical Engineering, Energy Systems Research Unit Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde Glasgow United Kingdom 2009.
- [110] D.J. Sailor, K. Resh, D. Segura, Field measurement of albedo for limited extent test surfaces, Solar Energy, 80 (2006) 589-599.
- [111] E.E. Anderson, Fundamentals of solar energy conversion. Reading: Addison- Wesley Publishing Company, (1983) 193-195.
- [112] B.Y.H.Liu, R.C.Jordan, Daily insolation and on surfaces tilted towards equator, ASHRAE Journal 30(10) 53(1962).
- [113] ASHRAE Handbook Fundamentals, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, SI ed. Atlanta:American Society of Heating, ASHRAE, 2001..
- [114] M.P.Thekaekara, Solar radiation measurement: Techniques and instrumentation, Solar Energy 18 (1976) 309-325.

- [115] M.Tekelioglu, B.D. Wood, Solar light transmission of polymer optical fibres. *Solar Energy*, 83 (2009)2039-2049.
- [116] B.J. Briscoe, K.P.Galvin, The effect of surface fog on the transmittance of light, *Solar Energy*, 46 (1991)191-197.
- [117] W. Chekirou, N.Boukheit, T.Kerbache, Différents Modes de Transfert de Chaleur Dans Un Absorbeur d'un Concentrateur Solaire Cylindro –Parabolique », *Rev. Energ. Ren.*, (2007).
- [118] J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*. Gauthiers – Villars, Paris, 1888.
- [119] J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V, *A heat transfer textbook*. 3rd ed. Cambridge Massachusetts: Phlogiston Press (2006).
- [120] P.T. Tsilingiris, Analysis of the heat and mass transfer processes in solar stills, *Solar Energy*, 83(2009) 420-431.
- [121] K.G.T. Hollands, T.E. Unny, G.D. Raithby, L. Konicek, Free convective heat transfer across inclined air layers, *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer*, 98 (1976) 189-193.
- [122] C .J. Sanders, J.P. Holman, Franz Grashof and the Grashof number. *Heat and Mass Transfer*, 15 (1972) 562-563.
- [123] R.V. Dunkle, Solar water distillation: the roof type solar still and a multi effect diffusion still, *International developments in heat transfer*, University of Colorado, *Proceedings of International Heat transfer Conference 5* (1961) 895–902.
- [124] S.C. Mishra, A.Shukla, V. Yadav View factor calculation in the 2-D geometries using the collapsed dimension method, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(2008) 630-636.
- [125] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, (2007) 880-915.
- [126] J.A.Sabbagh, *Heat transfer for solar energy utilization*. In: A.A.M. Sayigh, *Solar energy engineering*, New York Academic Press (1977) 83-103
- [127] J.Crepeau, Joseph Stefan: His life and legacy in the thermal sciences, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31 (2007)795-803.
- [128] G.F. Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, *Process heat transfer*, Boca Raton: CRC Press, (1994) 120-150.
- [129] J. W. Rose, *Condensation Heat Transfer Fundamentals*. *Trns.Chem Vol.76-Part A*. 1998.

- [130] W.M. Kays, M.E. Crawford, Convection heat and mass transfer, Third Edition. McGraw-Hill, Inc (1993) New York.
- [131] B.A. Jubran, M.I. Ahmed, A.F. Ismail, Y.A. Abakar, Numerical modelling of a multi-stage solar still, Energy Conversion Management 41(2000)1107-1121.
- [132] P. I.Cooper, The transient analysis of glass cover solar still, Ph.D. Thesis: University of Western Australia (1970).
- [133] S.Kumar, G.N. Tiwari, Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems, Solar Energy, 57 (1996) 459-464.
- [134] J. Rheinlander, Numerical calculation of heat and mass transfer in solar stills, Solar Energy 28 (1982) 173-178.
- [135] J. A. Clark, The steady state performance of a solar still, Solar Energy 44 (1990) 43-49.
- [136] P.T. Tsilingiris, The influence of binary mixture thermophysical properties in the analysis of heat and mass transfer processes in solar distillation systems, Solar Energy 81 (2007) 1482- 1491.
- [137] J.H. Wattmuf, W.W.S. Charters,D. Proctor, Solar and wind induced external coefficients for solar collectors, Complexx 2 (1977) 56.
- [138] V.B. Sharma, S.C. Mullick, Estimation of heat-transfer coefficients, the upward heat flow and evaporation in a solar still, ASME Journal of Solar Engineering 113 (1991) 36-41.
- [139] V. Belessiotis, E. Voropoulos, E. Delyannis, Experimental and theoretical method for determination of the daily output of a still: input-output method. Desalination, 100 (1995) 99-104.
- [140] B.A.K. Abu-Hijleh, H.A.Mousa,Water film cooling over the glass cover of a solar still including evaporation effects, Energy J. 22 (1997) 43–48.
- [141] S.A. Lawrence, S.P.Gupta, G.N. Tiwari, Effect of heat capacity on the performance of solar still with water flow over the glass cover, Energy Convers. Manag. 30 (1990) 277–285.
- [142] A. Montiel, Une législation nouvelle pour les eaux destinées à la consommation humaine .C.R. Géoscience 337 (2005)269-276.
- [143] G.N. Tiwari, J.M. Thomas, Emran Khan, Optimisation of glass cover inclination for maximum yield in a solar still, Heat Recover. Syst. CHP 14 (1994) 447–455.
- [144] Satcunathan Hansen, An investigation of some of the parameters involved in solardistillation, Sol. Energy 14 (1973) 353-363.

- [145] R.Tripathi, G.N. Tiwari, Thermal modelling of passive and active solar stills different depths of water by using the concept of solar fraction, *Solar energy* 80 (2006) 956-967.
- [146] M.A.S. Malik., G. N. Tiwari., A. Kumar., M. S. Sodha, *Solar Distillation* Oxford. UK. Pergamon Press. 1982.
- [147] A. Al. Hinaa, M.S. Al-Nassri, B.A. Jubran, Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still, *Energy conversion & Management* 43 (2002) 1639-1650.
- [148] S. Suneja, G.N. Tiwari, Effect of water depth on the performance of an inverted absorber double bassin solar still, *Energy conversion & Management* 40 (1999)1885-1897.
- [149] C. Armenta-Deu, Water distillation: a prototype to determine flow rate gains temperature and salt concentration changes in pressurized system, December 2003.
- [150] H.P. Garg, H.S. Mann, Effect of climatic operational and design parameters on the year round performance of single slope and double slope solar still under Indian arid zone conditions, *Sol. Energy* 18 (1976) 159–164.
- [151] G.N.Tiwari, *Fundamentals, Design, Modeling and Applications*, *Solar energy* (2002).
- [152] P.I. Cooper, The maximum efficiency of single-effect solar stills, *Solar Energy* 15 (1973) 205-217, Pergamon Press.
- [153] Zayouti et al, Amélioration de la condensation de la vapeur d'eau dans les distillateurs solaire, fier (2002) (Tétouan) Maroc.
- [154] F. Golestench, Thermal performance of a low thermal inertia solar still, Thesis Master of Sciences, University of Texas El Paso. 1980.
- [155] J.H. Watmuff, W.W.S. Charters, D. Proctor, Solar and wind induced external coefficients solar collectors, *Int. Heliotechnic J.* 2 (1977) 56.
- [156] G.N. Tiwari, A. Minocha, P.B. Sharma, M. Emran Khan, Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process, *Energy convers. Mgnt.* 38 (8) (1997) 761-770.
- [157] S. Toure , P. Meukam, A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan, *Renewable Energy* 11(3) (1997) 319-330.
- [158] V.B. Sharma, S.C. Mullick, Estimation of heat-transfer coefficients, the upward heatflow and evaporation in a solar still, *ASME J. Sol. Energy Eng.* 113 (1991) 36–41.
- [159] Y.P. Yadav, A.S.P. Rasad, Performance analysis of a high temperature solar distillation system, *Energy convers. Mgnt.* 36 (5) (1995) 365-374.

- [160] M.T. Chaibi, Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof, *Desalination* 128 (2000)123-138.
- [161] R.N. Morse, W.R.W. Read, Rational basis for engineering development of a solar still, *Solar energy* 12 (1968)5-17.
- [162] Eduardo Rubio, Jose' L. Fernández, Miguel A. Porta-Gándara, Modeling thermal asymmetries in double slope solar stills, *Renew. Energy* 29 (2004) 895–906.
- [163] R.L. Burden, J.D. Faires, *Numerical Analysis*, 3rd ed. PWS Publishers, Boston, 1985.
- [164] M.R. Rajamanickam, A. Ragupathy, Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a double slope solar still, *Energy Procedia* 14 (2012) 1701–1708.
- [165] J.A. Elbling, S.G. Talbert, G.O.G. Lof, Solar stills for community used-digest of technology, *Sol. Energy* 13 (1971) 263–276.
- [166] S. Aboul-Enein, A.A. El-Sebaei, E. El-Bialy, Investigation of a single-basin solar still with deep basins, *Renew. Energy* 14 (1998) 299–305.
- [167] A.J.N. Khalifa, On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes, *Energy Convers. Manag.* 52 (2011) 431–436.
- [168] W.A. Kamal, A theoretical and experimental study of the basin type solar still under the Arabian Gulf climatic conditions, *Sol. Wind Technol.* 5 (1988) 147–157.
- [169] Rajesh Tripathi, G.N. Tiwari, Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation, *Desalination* 173 (2005) 187–200.
- [170] S.C. Chapra, R.P. Canale, *Numerical Methods for Engineer*, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [171] A1-Hayek Imad, O. Omar, Badran, The effect of using different designs of solar stills on water distillation, *Desalination* 169 (2004) 121–127.
- [172] A.K. Singh, G.N. Tiwari, P.B. Sharma, E. Khan, Optimization of orientation for higher yield of solar still for a given location, *Energy Convers. Manag.* 36 (1995) 175–187.
- [173] M. Boukar, A. Harmim, Performance evaluation of a one-sided vertical solar still tested in the Desert of Algeria, *Desalination* 183 (2005) 113–126.
- [174] Eduardo Rubio-Cerda, Miguel A. Porta-Gándara, Jose' L. Fernández-Zayas, Thermal performance of the condensing covers in a triangular solar still, *Renew. Energy* 27 (2002) 301–308.
- [175] Farshad Farshchi Tabrizi et al, Effect of water flow rate on internal heat and mass transfer and daily productivity of a weir-type cascade solar still, *Desalination* 260 (2010) 239–247.

- [176] M.K. Phadatare, S.K. Verma, Influence of water depth on internal heat and mass transfer in plastic solar still. *Desalination* 217 (2007) 267–275.
- [177] S.N. Rai, G.N.Tiwari, Single basin solar still coupled with flat plate collector, *Energy Convers. Manage.* 23(1983)145–149.
- [178] H.E. Fath, S.M El-Sherbiny, A.Ghazy, Transient analysis of a new humidification–dehumidification solar still, *Desalination* 155 (2003)187–203.
- [179] Abdul Jabbar N. Khalifa , Ahmad M. Hamood , Effect of insulation thickness on the productivity of basin type solar stills: An experimental verification under local climat, *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 2457–2461.
- [180] Ives Jannot, *Thermique solaire*, octobre 2003.
- [181] S. Tayoma, T. Aragoki, K. Murase and T. Sumura, Simulation of multi-effect solar distillers, *Desalination*, 45 (1983) 101–108.
- [182] Julie Beauséjour. “Conception d’un distillateur solaire pour le traitement des effluents d’une tannerie Mexicaine“. Thèse de M. Sc. A de Génie Civil. Université de Montréal, Canada, 2003.

Résumé

Un programme de simulation numérique a été développé pour étudier l'effet des différentes orientations (est-ouest et nord-sud) sur la performance d'un distillateur solaire symétrique à double pente (à deux faces) en comparaison à celle du distillateur solaire type asymétrique à double effet (avec une seule face), afin d'obtenir les paramètres de conception optimales des deux distillateurs solaire dans les conditions climatiques de la région de Constantine (à l'est de l'Algérie), en utilisant les données météorologiques de la journée du 1er Août 2005 sélectionnée comme étant la plus chaude durant la dernière décennie (2002-2012). Les résultats obtenus montrent que 10° est l'angle d'inclinaison optimal de la couverture des deux types de distillateurs ce qui permet d'avoir une meilleure réception maximale du rayonnement solaire en favorisant l'augmentation du processus de l'évaporation – condensation. La profondeur de l'eau de bassin 0,02 m donne une plus grande productivité journalière. La stabilité du rayonnement solaire est très visible à l'orientation sud-nord, ce conduit à une bonne réception du rayonnement solaire des deux distillateurs solaires. Le coefficient d'échange de chaleur par évaporation contribue majoritairement dans la production des distillateurs solaires, avec un taux élevé d'environ 70%, suivi par le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement d'environ 23% et le reste est destiné pour le coefficient d'échange de chaleur par convection avec une part de 7%. La limite pratique d'une épaisseur optimale de l'isolant est de l'ordre de 0.10 m, cependant une valeur plus grande n'a aucun effet positif sur l'efficacité des deux systèmes de distillation. En conséquence, la productivité journalière du distillateur solaire type asymétrique dotée d'un procédé à double effet est nettement supérieure à celle correspondante au système de distillateur type symétrique à un seul effet à double pente, d'où nous pouvons remarquer une augmentation de l'ordre de 22,57% à l'orientation sud-nord, et une augmentation de 16,23% à l'orientation est-ouest. On remarque aussi que l'orientation au sud-nord améliore la performance du distillateur solaire type asymétrique par 16,76%.

Mots clés : Distillateur solaire, orientation, comparaison, Productivité.

ABSTRACT

A computer program has been developed to simulate the effect of the orientations (east–west and south–north), on the performance of a symmetric double slope solar still compared to those of an asymmetric solar still with a double effect, in order to obtain the optimum design parameters for both types, under climatic conditions of Constantine (Eastern area of Algeria), using meteorological data of 1st August of 2005 as the hottest day selected from the last decade (2002–2012). The obtained results show that 10° is the optimum inclination angle that allows receiving a maximum solar radiation for both stills by increasing the evaporation condensation processes. A water depth of 0.02 m gives higher daily production. The stability of solar radiation seen in a south–north orientation leads to high reception of solar radiation by both stills. The coefficient of heat transfer by evaporation has contributed in major in the production of solar stills (70%), followed by the coefficient of heat transfer by radiation (23%), and the left is for the heat transfer by convection (7%). The practical limit of optimal insulation thickness that gives the maximum efficiency of the two systems of distillation is about 0.10 m. As a consequence, the daily productivity of an asymmetric still, with a double effect process is found higher than that corresponding to the symmetric one with a double slope system, and where at the south–north orientation we notice an increase of 22.57% and at the east–west orientation it is of 16.23%. It is shown also that a south–north orientation enhances the performance of the asymmetric still with a double effect by 16.76%.

Keywords: Solar still, Orientation, Comparison, Productivity.

المخلص

لقد تم تطوير برنامج بالكمبيوتر لمحاكاة تأثير الاتجاهات المختلفة (شرق – غرب و شمال – جنوب) على أداء جهاز التقطير الشمسي المتناظر مزدوج الميل مقارنة بتلك الخاصة بجهاز التقطير الشمسي الغير متناظر المزدوج التأثير ، من أجل الحصول على التصميم الأمثل للوسائط لكلا النوعين من جهازي التقطير الشمسي ، في الظروف المناخية لقسنطينة (المنطقة الشرقية من الجزائر) ، وذلك باستخدام بيانات الطقس لليوم الأول من شهر أوت 2005 باعتباره أحر يوم تم اختياره خلال العشرية الماضية (2002-2012).

بينت النتائج المتحصل عليها بأن 10° زاوية الميل المثلى التي تسمح باستقبال الإشعاع الشمسي الأعظمي لكلا جهازي التقطير عن طريق زيادة عمليات التبخر و التكثيف. عمق الماء بمقدار 0,02 متر يعطي إنتاج يومي مرتفع. الاستقرار في الإشعاع الشمسي الملاحظ في اتجاه جنوب – شمال يؤدي إلى استقبال عالي من الإشعاع الشمسي من قبل كلا جهازي التقطير. أن معامل التبادل الحراري بالتبخير قد ساهم بالأغلبية في إنتاج جهازي التقطير الإشعاعي (70%) ، متبوعة بمعامل التبادل الحراري الإشعاعي (23%) ، والباقي بالنسبة لمعامل التبادل الانتقال الحراري (7%) الحد العملي للسمك الأعظمي للعزل الذي يعطي أكبر كفاءة لكلا جهازي التقطير يساوي حوالي 0.10 متر. ونتيجة لذلك، تم العثور على الإنتاجية اليومية لجهاز التقطير الشمسي الغير متناظر بمعامل مزدوج التأثير أكثر ارتفاعا من تلك الموافقة لجهاز التقطير ثنائي الميل ، ونلاحظ عند الاتجاه جنوب – شمال زيادة ب. 22.57% وعند الاتجاه شرق – غرب تكون ب 16.23%. لاحظنا أيضا أن الاتجاه جنوب – شمال يرفع (يقوي) أكثر الكفاءة لجهاز التقطير الشمسي الغير متناظر و المزدوج التأثير ب 16.76%.

الكلمات المفتاحية: جهاز التقطير، الاتجاه، المقارنة، الإنتاجية.