

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE 1
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CLIMATIQUE



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES EN GENIE CLIMATIQUE

OPTION

THERMIQUE DU BATIMENT ET REFRIGERATION

Par : **NAFILA SMAKDJI**

THEME

**OPTIMISATION ET MODELISATION D'UN
DISTILLATEUR SOLAIRE A AILETTES AVEC
STOCKAGE DE CHALEUR**

Soutenu publiquement : le 30/09/2014 devant le jury composé de

Président :	Prof. Azzedine BELHAMRI	Université Constantine 1
Rapporteur :	Prof. Abdenacer KAABI	Université Constantine 1
Examineurs :	Prof. Djamila SAFFIDDINE-ROUAG	Université Constantine 3
	Prof. Abdelhamid AYADI	Université Oum El Bouaghi
	Prof. Zinelabidine MAHRI	Université Constantine 1

REMERCIEMENTS

*Je tiens tout d'abord à remercier le directeur de cette thèse, M^R. **A.KAABI**, Professeur à l'université de Constantine 1, pour m'avoir fait confiance, encouragé, ainsi que pour le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, je lui en suis très reconnaissante.*

*Mes remerciements vont également à M^R. **A.BELHAMRI**, Professeur à l'université de Constantine 1, qui me fait l'honneur de présider le jury, je tiens à lui exprimer mon profond respect.*

*Aussi, Je suis très reconnaissante et sincèrement honorée par la présence de Madame **D.SAFFIDINE -ROUAG**, Professeur à l'Université de Constantine 3, M^R. **A.AYDI**, Professeur à l'Université de OUM EL BOUAGHI, ainsi que M^R. **Z.MAHRI**, Professeur à l'Université de Constantine 1, qui ont accepté d'être examinateurs de cette thèse, je les en remercie .*

*J'ai une pensée pour M^R. **B.LIPS**, Professeur à l'I.N.S.A de Lyon, pour ses précieux conseils, son accueil, également ses remarques et ses suggestions pertinentes, pendant les stages à Lyon afin d'améliorer ce mémoire, je le salut sincèrement.*

*Je tiens à exprimer mon profond remerciement à, M^R. **A.KETAB**, Professeur à l'Université d'Alger, pour son encouragement, son soutien et précisément ses conseils pendant ma participation aux séminaires [CMTDE 2011 et WATMED 2012].*

*Enfin, Mes remerciements vont également à mon mari **Abdeslam**, à ma **Maman** pour toute leur gentillesse, leur patience qu'ils ont manifestées à mon égard, ainsi qu'à mon amie **A.GUELLAB**, enseignante, qui m'a toujours soutenue, encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

DEDICACE

Je dédie cette ouvrage de thèse, à la mémoire de mon défunt père, à ma maman qui m'ont toujours soutenue et valorisé mon travail durant mon cursus d'études.

Sommaire

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale

	1
Gisement solaire	1
1. Le soleil	1
1. 1. Structure du soleil	1
1.1.1. Le noyau	1
1.1.2. La zone radiative.....	1
1.1.3. La zone de convection.....	1
1.1.4. La photosphère.....	2
1.1.5. L'atmosphère solaire.....	2
1.1.6. La chromosphère.....	2
1.1.7. La couronne.....	2
1.1.8. L'héliosphère.....	2
2. L'atmosphère.....	2
2.1. Définition.....	2
2.2. L'atmosphère terrestre.....	2
2.3. Structure de l'atmosphère.....	3
2.3.1. La troposphère.....	3
2.3.2. La stratosphère.....	3
2.3.3. La mésosphère.....	3
2.3.4. La thermosphère.....	3
3. Voûte céleste.....	3
3.1. Définition.....	4
3.2. Mouvements de la terre.....	4
3.3. Données astronomiques.....	4
3.4. Repérage d'un astre sur la sphère céleste.....	5
3.5. Système de coordonnées équatoriales	5
3.6. Système de coordonnées horaires.....	6
3.6.1. L'angle horaire.....	6
3.6.2. La déclinaison.....	6
3.7. Système de coordonnées horizontales.....	6
3.8. Système de coordonnées écliptiques.....	7
4. Potentiel de l'énergie solaire	8
5. Le rayonnement solaire	8
5.1. Rayonnement direct	8
5.2. Le rayonnement diffus.....	8
5.3. Constante solaire	8
5.4. L'albédo.....	9

5.5. Temps Universel.....	9
5.6. Temps Solaire Local.....	9
5.7. Equation du temps	9
5.8. Temps Solaire Vrai.....	10
5.9. Angle horaire.....	11
5.10. L'azimut du soleil.....	11
5.11. La hauteur du soleil.....	11
5.12. Heures de lever et de coucher du soleil.....	12
5.13. Durée d'insolation.....	12
6. Historique de l'énergie solaire.....	12
6.1. Dès l'Antiquité.....	13
6.2. Au 18 ^{ème} siècle.....	13
6.3. 19 ^{ème} siècle.....	14
6.4. A partir du 20 ^{ème} siècle.....	14
Eau et dessalement.....	18
1. L'eau.....	18
1.1. Origine de l'eau sur terre.....	18
1.2. Les formes de l'eau sur Terre.....	18
1.3. Caractéristiques de l'eau.....	18
1.4. Utilisation de l'eau.....	19
1.5. Comparaison de consommation d'eau dans le monde.....	19
1.6. Problématique de l'eau dans le monde.....	19
1.7. Problématique de l'eau en Algérie.....	19
1.8. Les potentialités globales en eau en Algérie.....	20
1.9. Capacités de mobilisation.....	20
2. Le dessalement.....	20
3. Critère de qualité de l'eau potable.....	21
4. L'eau salée.....	22
4.1. L'eau saumâtre.....	23
4.2. L'eau de mer.....	23
5. Procédés de dessalement.....	23
5.1. Procédés thermiques.....	24
5.1.1. Distillation à simple effet.....	24
5.1.2. Distillation à multiples effets.....	24
5.1.3. Distillation par compression de vapeur.....	25
5.1.4. Distillation multi-flash.....	25
5.1.5. Congélation.....	26
5.2. Procédés à membranes.....	26
5.2.1. Osmose inverse.....	26
5.2.2. L'électrodialyse.....	27
6. Principe du distillateur solaire.....	28
7. Origine et historique de la distillation solaire.....	28
8. Types de distillateurs solaire.....	29

8.1. Distillateurs à ruissellement.....	29
8.2. Distillateurs statiques.....	29
8.2.1. Distillateur solaire simple à effet de serre.....	30
8.2.2. Distillateur solaire incliné à cascade.....	30
8.2.3. Distillateur incliné à matière poreuse noire.....	30
8.2.4. Distillateur sphérique à balayage.....	31
9. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur solaire.....	32
9.1. Paramètres de constructions.....	32
9.1.1. La couverture.....	32
9.1.2. L'absorbeur.....	32
9.1.3. L'isolant.....	32
9.1.4. L'épaisseur de l'eau à distiller.....	32
9.1.5. Effet de la concentration en sel.....	33
9.2. Paramètres météorologiques.....	33
9.3. Paramètres géographiques.....	33
10. Caractéristiques principales d'un distillateur.....	33
10.1. Le rendement.....	33
10.2. L'efficacité.....	34
10.3. La performance.....	34
9. Résultats « types » obtenus avec des distillateurs à bassin simple.....	35
Capteur et stockage de chaleur.....	41
1. Capteur solaire thermique.....	41
1.1. Capteur plan sous pression atmosphérique.....	41
1.2. Absorbeur.....	41
1.3. Différentes formes de l'absorbeur.....	42
2. Fonctionnement d'un capteur plan standard.....	42
2.1. Rendement du capteur.....	43
2.2. Déperditions thermiques.....	43
2.3. Avantages.....	43
2.4. Inconvénients.....	44
3. Intérêt du stockage de chaleur.....	44
- Stockage journalier.....	44
- Stockage saisonnier.....	44
3.1. Stockage à chaleur sensible.....	45
- Stockage d'eau chaude.....	45
- Stockage en aquifère.....	46
- Stockage gravier-eau.....	46
- Stockage en puits.....	47
- Matériaux de stockage par chaleur sensible.....	47
3.2. Stockage par chaleur latente.....	48
- Les MCP inorganiques.....	48

- Avantages.....	48
- Inconvénients.....	48
- Les MCP Organiques.....	48
- Avantages.....	48
- Inconvénients.....	49
- Matériaux de stockage par chaleur latente.....	49
- Les MCP Eutectiques.....	49
- Avantages.....	50
- Inconvénients.....	50
3.3. Stockage thermochimique.....	50
3.4. Stockage à sorption.....	51
- Stockage chimique.....	51
- Classification des systèmes à adsorption.....	51
- Système ouvert.....	51
- Systèmes fermés.....	51
4. Ballon de stockage.....	52
4.1. Principe de la stratification.....	53
4.2. Phénomènes influençant la stratification.....	53
4.2.1. Le mode dynamique.....	54
4.2.2. Le mode statique.....	58
1. Par électrovanne.....	58
2. Par convection naturelle.....	59
1. Le brassage des températures dues au jet.....	61
2. L'isolation du ballon.....	62
4.3. Modèles de simulation thermique des ballons solaires.....	63
4.3.1. Modèle de ballon idéalement brassé.....	63
4.3.2. Modèle idéalement stratifié.....	63
4.3.3. Modèle de stockage multicouche.....	64
4.3.4. Modèle zonal.....	65
4.3.5. Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics).....	66
5. Ailettes.....	67
5.1. Définition.....	67
5.2. Propriétés.....	67
5.3. Exemples d'applications.....	67
5.4. Flux extrait par une ailette.....	68
5.5. Modélisation de l'ailette.....	69
- Ailette de longueur infinie.....	71
- Ailette de longueur finie à extrémité adiabatique (isolée).....	72
- Ailette de longueur finie avec transfert de chaleur à l'extrémité.....	72
Etude théorique.....	73
1. Calcul du rayonnement global incident.....	73
1.1. Calcul du flux diffus.....	73
1.2. Calcul du flux direct.....	73

2. Différents modes de transfert de chaleur au niveau du distillateur.....	74
2.1. Transfert interne.....	74
2.1.1. Transfert thermique par convection.....	74
2.1.2. Transfert thermique par évaporation.....	76
2.1.3. Transfert thermique par rayonnement (eau-paroi).....	76
2.2. Transfert externe.....	77
2.2.1. Transfert par convection.....	77
2.2.2. Transfert par rayonnement.....	77
3. Principaux composants de l'installation.....	77
4. Fonctionnement.....	78
5. Problème physique.....	79
5.1. Prototype avec distillateur à paroi sans ailettes.....	79
5.1.1. Schéma d'installation.....	79
5.1.2. Formulation du modèle.....	79
5.1.3. Hypothèses simplificatrices.....	80
5.1.4. Bilan thermique.....	80
5.1.4.1. Distillateur solaire.....	80
5.1.4.2. Le capteur solaire.....	81
5.1.4.3. Ballon de stockage.....	81
5.2. Prototype d'un distillateur à paroi avec ailettes.....	82
5.2.1. Schéma d'installation.....	82
5.2.2. Formulation du modèle.....	83
6. Résolution mathématique.....	83
6. 1. Distillateur solaire.....	83
6. 2. Ballon de stockage.....	84
7. Organigramme général du programme de calcul.....	85
Résultats et interprétation.....	86
Conclusion et perspectives.....	107
Bibliographie.....	109

Annexe -A-

Annexe -B-

Annexe -C-

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Gisement solaire

Figure 3.1. La sphère céleste.....	4
Figure 3.2. Mouvements de la Terre.....	5
Figure 3.5. Coordonnées équatoriales.....	5
Figure 3.6. Coordonnées horaires.....	6
Figure 3.7. Coordonnées horizontales.....	7
Figure 3.8. Coordonnées écliptiques.....	7
Figure 5.3. Le rayonnement solaire.....	9
Figure 5.7 Graphe des variations annuelles de l'équation du temps.....	10
Figure 5.11 Hauteur du soleil.....	12
Figure 6.2.1 Un miroir ardent.....	13
Figure 6.2.2 Puissant four solaire.....	13
Figure 6.2.3 Boîte chaude.....	13
Figure 6.4.1 Four solaire de Mouchot à l'exposition.....	14
Figure 6.4.2 Centrale thermique	14
Figure 6.4.3 Grand four de 1 MW d'Odeillo à Font-Romeu.....	15
Figure 6.4.4 Four solaire d'une puissance de 50 kW.....	15
Figure 6.4.5 Schéma de principe du mur capteur.....	16
Figure 6.4.6. Satellite artificiel Vanguard 1.....	16
Figure 6.4.7 Reconstruction d'une maison dans la ville de Priene.....	17
Figure 6.4.8. Première voiture solaire.....	17

Eau et dessalement

Figure 4.1 Diagramme des ressources mondiales en eau.....	22
Figure.5.1.1. Principe de fonctionnement de la Distillation a simple effet.....	24
Figure 5.1.2. Principe de fonctionnement de la distillation à multiples effets....	25
Figure.5.1.3. Principe de fonctionnement de la distillation par compression de vapeur.....	25
Figure 5.1.4. Principe de fonctionnement de la distillation multi-flash.....	26
Figure5.2.1.a. Principe de fonctionnement de l'osmose.....	26
Figure.5.2.1.b. Principe de fonctionnement de l'osmose inverse.....	26
Figure.5.2.2. Principe de fonctionnement de l'électrodialyse.....	27
Figure. 6. Distillateur solaire simple à effet de serre.....	28
Figure.8.2.1. Distillateur solaire simple à effet de serre type hot box.....	30
Figure.8.2.2. Distillateur solaire incliné à cascades.....	30
Figure.8.2.3. Distillateur incliné à matière poreuse noire.....	31
Figure.8.2.4. Distillateur sphérique à balayage.....	31
Figure.11.1. Distillateur avec la feuille en aluminium pliée, perforée flottant sur la surface de l'eau.....	36

Figure.11.2. Image de la feuille en aluminium perforée.....	36
Figure 11.3. Distillateur solaire à double bassin ayant un absorbant inversé.....	37
Figure 11.4. Distillateur solaire à double vitrage.....	37
Figure 11.5. Principe d'un distillateur solaire avec condenseur.....	38
Figure 11.6. Schéma du prototype capteur-distillateur.....	38
Figure 11.7. Schéma du prototype distillateur-capteur solaire.....	39
Figure 11.8. Distillateur actif.....	39

Capteur et stockage de chaleur

Figure 1.1. Coupe d'un capteur plan standard.....	41
Figure 1.1.2.a Principaux types de réseaux de tuyauteries dans l'absorbeur.....	42
Figure 1.1.2.b Différentes formes d'absorbeurs.....	42
Figure 2. 2. Flux d'énergie dans un capteur solaire.....	43
Figure 3.1.a- Stockage d'eau chaude.....	45
Figure 3.1.b- Construction du réservoir d'eau à Friedrichshafen.....	45
Figure 3.1c- Stockage en aquifère.....	46
Figure 3.1.d- Construction du stockage gravier-eau.....	46
Figure 3.1e- Les principes de base pour le stockage d'énergie thermique.....	47
Figure 3.4 - Systèmes à adsorption ouverts et fermés.....	51
Figure 4.1- Répartition du champ de température au sein du ballon.....	53
Figure 4.2- Entrée testées par Carlsson.....	55
Figure 4.3- Diffuseurs utilisés par Zurigat.....	55
Figure 4.4- Entrées testées par Hgazy.....	56
Figure 4.5- Manifold à deux couches.....	56
Figure 4.6- Installation fonctionnant soit avec un échangeur solaire seul.....	58
Figure 4.7- Installation permettant une injection directe du fluide.....	59
Figure 4.8- sortie de l'eau en haut du ballon.....	59
Figure 4.9- Canne de stratification avec clapets anti retour.....	60
Figure 4.10- Ballon « tank in tank et ballon à ECS instantanée.....	60
Figure 4.11- Technologies permettant de limiter l'influence du jet sur la Stratification.....	61
Figure 4.12- Orientation de l'entrée d'eau froide vers le bas du ballon.....	61
Figure.4.13. Fonctionnement du modèle idéalement stratifié.....	63
Figure 4.14. Schéma du bilan énergétique d'une couche i, TRNSYS.....	64
Figure.4.15- Scénario d'écoulement dans le cas d'une couche limite.....	65
Figure 5.1- Résistance électrique à ailettes.....	66
Figure 5.2- Tube à ailettes.....	66
Figure 5.3- Radiateur à ailettes.....	67
Figure 5.4- Surface du château.....	67
Figure 5.5- Schéma de l'ailette.....	67
Figure 5.6- Exemple de surface à ailettes.....	67
Figure 5.7- Schéma simplifié d'une section de l'ailette.....	68

Figure 5.8- Représentation des flux élémentaires sur l'ailette.....	68
Etude théorique	72
Figure.3.1- Principaux composants du prototype (Distillateur avec ailettes)...	78
Figure.3.2- Distillateur solaire à ailettes.....	78
Figure.3.3- Vue de dessous de la paroi avec ailettes.....	78
Figure 5. 1- Capteur – Ballon de stockage- Distillateur.....	79
Figure 5. 2. Capteur – Ballon de stockage –distillateur à ailettes.....	82
Résultats	86
Figure.1. Evolution temporelle de la température ambiante et du ciel.....	86
Figure.2. Evolution temporelle de puissance globale, du flux diffus et du flux Direct.....	87
Figure.3. Variation de la puissance globale en fonction de la hauteur du soleil...	87
Figure.4. Variation horaire de la température de stockage en fonction de la masse d'eau.....	88
Figure.5. Variation de la température de l'eau du stockage en fonction de sa masse.....	89
Figure.6. Evolution temporelle de T_{scr} en fonction de m_c	89
Figure.7. Evolution des températures "sortie capteur et stockage".....	90
Figure.8. Evolution temporelle de la puissance globale, captée et utilisée.....	90
Figure.9. Evolution temporelle de la température de la saumure et de la paroi métallique.....	91
Figure .10. Evolution de la température de la saumure en fonction du débit \dot{m}_d	92
Figure 11 Variation temporelle de l'écart de température en fonction de la vitesse du vent.....	92
Figure.12. Variation de l'écart de température entre la saumure et la paroi métallique en fonction de la vitesse du vent.....	93
Figure.13. Evolution temporelle du rendement en fonction de la masse d'eau...	93
Figure.14. Variation temporelle de l'efficacité interne.....	94
Figure .15. Variation temporelle de l'efficacité globale.....	94
Figure.16. Variation temporelle de la chaleur de vaporisation.....	95
Figure.17. Variation temporelle des puissances, globale, échangée et évaporée.....	95
Figure.18. Variation de l'efficacité interne en fonction de la chaleur interne.....	96
Figure. 19. Evolution temporelle de l'écart de température entre la saumure et la paroi métallique.....	96
Figure. 20. Variation temporelle de la température de la paroi et celle de la saumure paroi avec ailettes.....	97
Figure.21. Variation temporelle de la quantité de l'énergie évaporée.....	97
Figure.22. Variation temporelle du rendement.....	98

Figure.23. Variation du rendement horaire en fonction de la longueur de l'ailette.....	98
Figure.24. Evolution temporelle de la température de la paroi métallique.....	99
Figure.25. Evolution temporelle de la température de la saumure.....	99
Figure.26. Quantité d'énergie totale transférée de la saumure vers la paroi Métallique.....	99
Figure.27. Evolution temporelle de la chaleur latente de vaporisation.....	100
Figure.28. Quantité d'énergie transférée de la paroi vers le milieu extérieur.....	100
Figure.29. Variation de l'écart de température " ΔT " en fonction du nombre d'ailettes.....	101
Figure.30. Evolution temporelle de l'efficacité interne $N=70$	101
Figure.31. Evolution temporelle de l'efficacité globale $N=70$	102
Figure.32. Variation nocturne du rendement, paroi sans ailettes.....	102
Figure.33. Evolution nocturne de la température de la saumure et de la paroi métallique, paroi sans ailettes.....	103
Figure.34. Evolution nocturne de l'efficacité interne, paroi sans ailettes.....	103
Figure.35. Evolution journalière des températures, paroi sans ailettes.....	103
Figure.36. Evolution journalière de l'écart de température (ΔT), paroi sans ailettes.....	104
Figure.37. Evolution nocturne de la température de la saumure et de la paroi à ailettes.....	104
Figure.38. Evolution journalière des températures, de la saumure et de la paroi à ailettes.....	105
Figure.39. Variation nocturne de l'écart de température (ΔT), paroi à ailettes...	105
Figure.40. Evolution nocturne du rendement du distillateur.....	106
Figure.41. Evolution nocturne de l'efficacité interne, paroi à ailettes.....	106

Liste des tableaux

Eau et dessalement

Tableau 3.1. Recommandation de l’OMS sur la qualité de l’eau potable.....	22
Tableau 4.2. Salinité des différentes Mers.....	23

Capteur et stockage de chaleur

Tableau 3.1- Caractéristiques de quelques matériaux de stockage par chaleur sensible.....	47
Tableau 3. 2- Température de fusion et chaleur latente de quelques MCP inorganiques et organiques.....	49
Tableau 3.3- Matériaux Adsorbants.....	50
Tableau 3. 4 Matériaux adaptés au stockage chimique.....	52

Etude théorique

Tableau.1- Valeurs de A et B.....	72
--	----

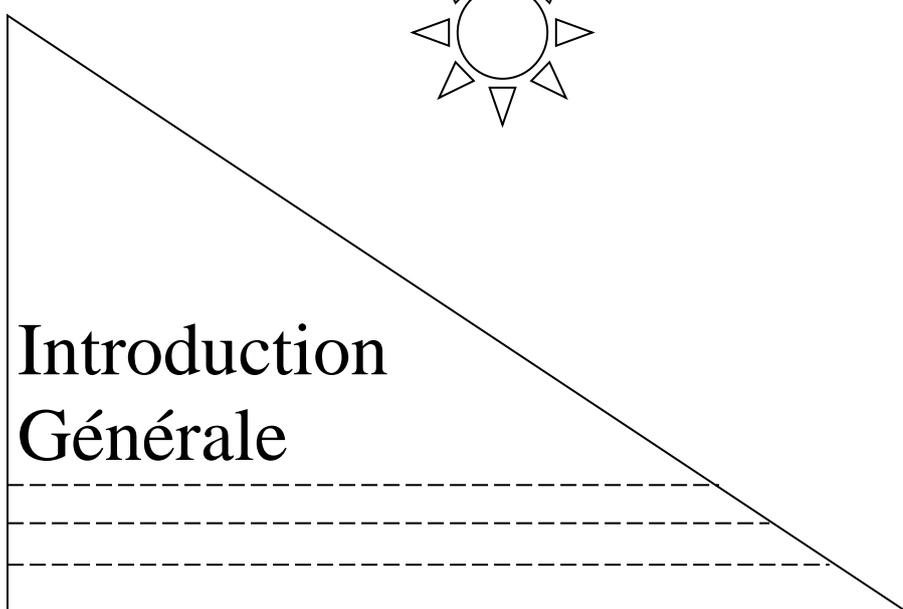
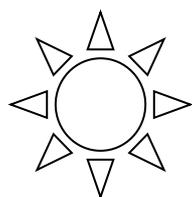
	Nomenclature	Unités
C_p	Chaleur spécifique à pression constante	[J/Kg K]
G_r	Nombre de Grashof	-
h_{cpa}	Coefficient de convection entre la paroi et l'ambiance	[W/m ² K]
h_{rpc}	Coefficient de rayonnement entre la paroi et le ciel	[W/m ² K]
h_{csp}	Coefficient de convection entre la saumure et la paroi	[W/m ² K]
h_{rsp}	Coefficient de rayonnement entre la saumure et la paroi	[W/m ² K]
h_{evap}	Coefficient d'évaporation entre la saumure et la paroi	[W/m ² K]
M_{st}	Masse d'eau dans le ballon de stockage	[Kg]
M_{sed}	Masse d'eau dans le distillateur	[Kg]
M_{eed}	Masse d'eau qui entre dans le distillateur	[Kg]
\dot{m}_c	Débit d'eau entrant dans le capteur solaire	[Kg/s]
\dot{m}_d	Débit d'eau entrant dans l'échangeur de chaleur	[Kg/s]
N	Nombre d'ailettes	-
N_u	Nombre sans dimension de Nusselt	-
τ	Transmissivité	-
α	Absorptivité	-
ΔT	Ecart de température	[°C]
p	Pressions partielles et de la vapeur d'eau	[N/m ²]
Pr	Nombre de Prandtl	-
P_g	Puissance globale incidente	[W/m ²]
Q_c	Puissance captée.	[W/m ²]
Q_s	Puissance stockée	[W/m ²]
Q_u	Puissance utilisée	[W/m ²]
Q_p	Puissance perdue	[W/m ²]
Q_{ail}	Puissance transmise par l'ailette	[W/m ²]
S	Surface	[m ²]
T_c	Température équivalente du ciel	[°C]
T_{amb}	Température ambiante	[°C]
T_{eed}	Température entrée distillateur	[°C]
T_{sed}	Température de la saumure	[°C]
T_{ed}	Température entrée échangeur	[°C]
T_{sd}	Température sortie échangeur	[°C]
T_{ec}	Température entrée capteur	[°C]
T_{sc}	Température sortie capteur	[°C]
T_{st}	Température de l'eau stockée	[°C]
T_p	Température de la paroi métallique	[°C]
T_e	Température de l'espace entourant le ballon de stockage	[°C]

Indices

<i>sp</i>	Saumure – paroi
	Ailette
<i>ail</i>	Paroi - ambiance
	Stockage
<i>pa</i>	Capteur
<i>st</i>	Effective

Lettres grecques

ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
	Coefficient de transmission	
τ	masse volumique du fluide	-
	viscosité dynamique	[Kg/m ³]
ρ	conductivité thermique	
μ	Efficacité globale du distillateur	[Pa.s ⁻¹]
	Efficacité interne du distillateur	
λ	Inclinaison du capteur	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
η_g	Emissivité	-
η_i		



**Introduction
Générale**

Introduction générale

Depuis la création de l'univers, l'atmosphère est l'enveloppe gazeuse essentielle pour que la vie sur Terre soit possible. Elle participe au déroulement du processus naturel appelé « l'effet de serre naturel », en effet, elle permet un équilibre entre l'énergie entrante et l'énergie réémise, elle contient des gaz qui captent et retiennent le rayonnement solaire, grâce à eux la température de notre Terre est douillette en moyenne 15°C, sans eux il ferait un froid invivable. Les principaux gaz sont : la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), et le protoxyde d'azote (N₂O).

Depuis le dernier siècle le monde entier a remarqué une perturbation atmosphérique persistante, qui peut être due à des processus intrinsèque à la Terre, à des influences extérieures, alors que des recherches scientifiques ont confirmé incontestablement que cela est dû directement à des activités humaine pour les trois raisons suivantes:

- La population mondiale a connu les deux derniers siècles une énorme croissance, nécessitant une production alimentaire accrue, qui génère une agriculture plus intensive exigeant l'utilisation d'engrais artificiels et de pesticides libérant du N₂O.
- Depuis la révolution industrielle au début du 19 siècle, l'homme perturbe l'équilibre naturel terrestre, des combustibles fossiles sont utilisés pour l'industrie, provoquant une augmentation de CO₂ dans l'atmosphère.
- L'augmentation de ces gaz à effet de serre crée un blocage de la chaleur autour de la Terre, où il a été constaté que la principale conséquence de ce changement est une hausse de la température moyenne terrestre, qui s'élèvera, selon le groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC), de 1,5 à 6°C d'ici à la fin du siècle, provoquant ainsi des émissions de gaz à effet de serre due à l'évaporation de l'eau.

Toutes ces évolutions conduisent vers un réchauffement planétaire toujours croissant avec des conséquences dévastatrices, notamment la sécheresse et les inondations.

Le cycle de l'eau est donc attisé, on trouve des précipitations plus intenses, et des périodes plus longues de sécheresse dans certaines régions semi arides tels que l'Algérie.

Le recul des glaciers conduira à une baisse de la quantité des eaux de fonte dans les prochaines décennies, mettant en danger l'approvisionnement en eau potable dans les régions montagneuses.

Le réchauffement climatique est à l'origine de l'élévation du niveau des eaux dilatées sous l'effet de la chaleur, cette élévation est également due à la fonte des calottes glacières terrestres.

Le changement climatique conduit à une vulnérabilité accrue dans le Sud et à une sensibilité dans les régions tropicales, en effet, il faut distinguer sensibilité de vulnérabilité, et cela par une capacité d'adaptation et de résistance aux conséquences d'ores et déjà réelles du réchauffement planétaire, où les changements ne seront pas identiques partout. A certains endroit il y aura plus de pluies, à d'autres, il fera plus sec, ce dernier état est la raison de notre actuelle recherche qui n'est qu'une réflexion aux questions interdépendantes de l'accès aux ressources hydriques et l'accès aux ressources énergétiques d'une façon équitable menant à une adaptation aux changement climatique, considérée comme élément fondamental du développement durable et de la réduction de la pauvreté.

De l'eau est nécessaire pour produire de l'énergie sous presque toutes ces formes, et il faut de l'énergie à toutes les étapes d'extraction, de traitement et de distribution de l'eau.

Bien que les quantités soient limitées, la demande en eau douce et en énergie continuera d'augmenter considérablement au cours des prochaines décennies, en particulier dans les pays émergentes et les pays en développement.

Selon l'Organisation des Nations unies (ONU), d'ici 2030 la population mondiale aura besoin de 35% de nourriture en plus, de 40% d'eau en plus et de 50% d'énergie en plus. Donc il n'est plus possible de se résigner aux conséquences tragiques du manque d'accès à l'eau, et à l'énergie pour des millions de personnes.

De nombreux pays souffrent encore aujourd'hui de pénuries en eau. La croissance de la population et la dégradation de certaines ressources en eau douce en raison de l'activité humaine ou de changements climatiques ne favorisent pas la résolution de ce problème et tendent même à l'accroître. Un rapport récent de l'UNICEF et de l'Organisation Mondiale de la Santé indique que 13 % de la population mondiale n'a pas accès à une source d'eau de qualité satisfaisante. Malgré des progrès importants, le problème de l'eau potable se pose toujours et représente un enjeu technique, économique et politique majeur du XXIème siècle.

Toutefois la situation de stress hydrique qui ne semble pas s'être atténuée en raison des aléas climatiques, fait du dessalement l'ultime solution pour pallier le manque d'eau potable, permettant sa production à partir de l'eau de mer ou des eaux saumâtres grâce à des techniques particulières. Dix stations sont déjà en service en Algérie, un nombre que les autorités comptent augmenter à 43 à l'horizon 2019, pour remédier au manque d'eau potable, notamment dans les villes côtières.

Ce procédé est très consommateur d'énergie et susceptible d'être polluant. Dans un souci de préservation de l'écosystème, en diminuant les impacts environnementaux, nombreux chercheurs ont estimé une énergie propre de substitution au gaz.

Comme la plupart des pays en situation de stress et de déficit hydrique, étant situés dans des zones géographiques très fortement ensoleillées, arides et isolées, aussi la

consommation excessive d'énergie par les procédés de dessalement, étant une raison pour laquelle les scientifiques ont orienté leur recherche vers l'utilisation des énergies renouvelables, solaire en premier lieu.

Différents modèles de distillateurs solaires ont été conçus et étudiés en fonction de différents paramètres affectant son rendement. Dans le but d'améliorer ce dernier, nous avons réfléchi à modifier la structure du distillateur solaire en le couplant avec un ballon de stockage, afin d'aboutir aux meilleures performances de ce type de distillation. Notre étude comporte trois principaux chapitres :

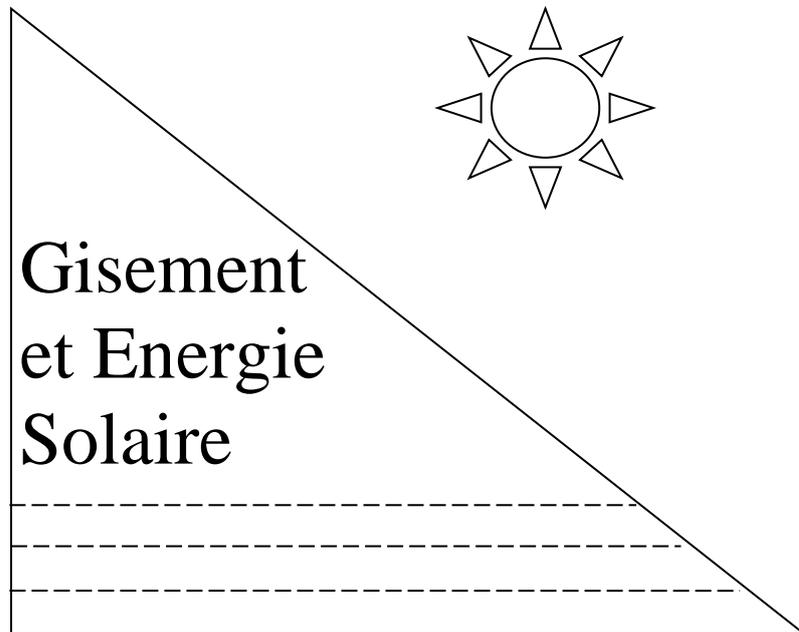
Le premier chapitre, est une étude bibliographique, présentant des connaissances générales sur :

- Le gisement solaire ;
- L'historique de l'énergie et de la distillation solaires ;
- L'eau (caractéristiques, problématique, et potentialité) ;
- Les différents procédés de dessalement;
- Les différents types de distillateurs solaires;
- Les résultats types obtenus avec des distillateurs à bassin simple ;
- Le capteur solaire (définition, éléments constitutants) ;
- Ailettes de refroidissement (définition, exemples d'applications) ;
- Le stockage thermique (intérêt, catégories, et méthodes de stockage) ;
- Ballon de stockage et ses différentes modélisations.

Le deuxième chapitre est consacrée à une étude théorique afin d'établir les équations et leurs solutions qui régissent le fonctionnement de notre prototype avec une paroi plane (sans ailettes) et une paroi à ailettes.

L'interprétation et la discussion des résultats sont présentées dans le troisième chapitre.

Enfin nous avons clôturé notre travail par une conclusion générale suivie des annexes.



Gisement solaire

1. Le soleil

Le soleil est une étoile gazeuse de forme sphérique résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce nuage est composé essentiellement d'hydrogène et d'hélium dont la température du cœur est de l'ordre de 10^7 K, les réactions de fusion nucléaire y transforment l'hydrogène en hélium en libérant 4.10^9 kg/s d'énergie de masse. Le soleil de 1 391 000 km de diamètre situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre, cette distance varie peu au cours de l'année, car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée. Néanmoins, elle conduit à des variations d'éclairement. A partir de la température de surface du soleil, la constante solaire a pu être estimée à 5760 K [1].

1. 1. Structure du soleil

Le soleil est une sphère non homogène structurée comme suit :

1.1.1. Le noyau

Il s'étend du centre à environ 0.2 rayon solaire, sa masse volumique est supérieure à $150\,000\text{ kg/m}^3$, ce que l'énergie solaire produit.

1.1.2. La zone radiative

C'est une zone de forte densité qui s'étend de 0,2 à 0,7 rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil.

1.1.3. La zone de convection

C'est une zone de faible densité, qui s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du Soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère par convection, où les gaz chauds remontent à la surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent puis remontent, et ainsi de suite.

1.1.4. La photosphère

C'est une zone qui est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil, elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile, où une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite.

1.1.5. L'atmosphère solaire

L'atmosphère solaire est la structure du Soleil au-delà de la photosphère.

1.1.6. La chromosphère

Elle est située entre la photosphère et la couronne solaire. La chromosphère est une fine couche transparente pour la lumière visible, absorbe certaines longueurs d'onde émises par le soleil ; elle est plus chaude que la surface de ce dernier.

1.1.7. La couronne

Elle se caractérise par une température élevée et une densité extrêmement faible. C'est la couche qui émet notamment du rayonnement dans l'extrême-ultraviolet.

1.1.8. L'héliosphère

C'est une zone en forme de bulle allongée dans l'espace et engendrée par les vents solaires. Elle se compose, en plus grande partie, de l'hélium et de l'hydrogène, où celle-ci apparaît lorsque la poussée des vents solaires ne réussit plus à repousser la bulle de gaz. Cette délimitation se nomme l'héliopause.

2. L'atmosphère

2.1. Définition

En astronomie, l'atmosphère est une enveloppe gazeuse entourant un corps céleste et pouvant contenir des particules en suspension (poussières, gaz, aérosols, etc.). Les étoiles ont toutes une atmosphère gazeuse dont la température est très élevée engendrant une émission de lumière [2].

2.2. L'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la terre solide, composée de 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0.9 % d'argon, 0.03 % de CO₂ et des traces d'autres gaz. L'atmosphère protège la vie sur terre en absorbant le rayonnement solaire ultraviolet, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit.

2.3. Structure de l'atmosphère

L'atmosphère est composée de différentes couches qui sont chacune dotées de propriétés particulières. Elles sont limitées entre elles, par les changements de température et de pression. L'atmosphère est partagée en trois zones :

- L'atmosphère inférieure – la troposphère.
- L'atmosphère moyenne – la stratosphère.

- L'atmosphère supérieure – la mésosphère et la thermosphère.

2.3.1. La troposphère

La troposphère est la couche inférieure de l'atmosphère terrestre située entre 0 et 10 kilomètres d'altitude dans les zones tempérées. Sa limite supérieure s'appelle la tropopause. Elle représente les 5/6 de l'atmosphère terrestre. L'air y contient de la vapeur d'eau et du gaz carbonique, des poussières (surtout de 0 à 3 km). La température s'y abaisse progressivement 6,5 °C par 1.000 mètres jusqu'à -55 °C. Elle est le siège des événements météorologiques (nuages, orages, etc.) Elle est plus épaisse à l'équateur qu'aux pôles.

2.3.2. La stratosphère

La stratosphère est la couche représentant 12 à 55 km de l'atmosphère terrestre qui se situe au dessus de la troposphère et qui s'étend jusqu'à la mésosphère, séparée par la stratopause. Elle contient une mince couche d'ozone, où la température croît de -56 °C à 0 °C.

2.3.3. La mésosphère

Elle est située entre 50 et 85 kilomètres d'altitude, la mésosphère se situe au dessus de la stratosphère. C'est la couche la plus froide de l'atmosphère, où la température décroît à nouveau de 0°C à -90 °C. La vapeur d'eau peut y geler, formant des nuages particuliers, nacrés à l'aspect irisé.

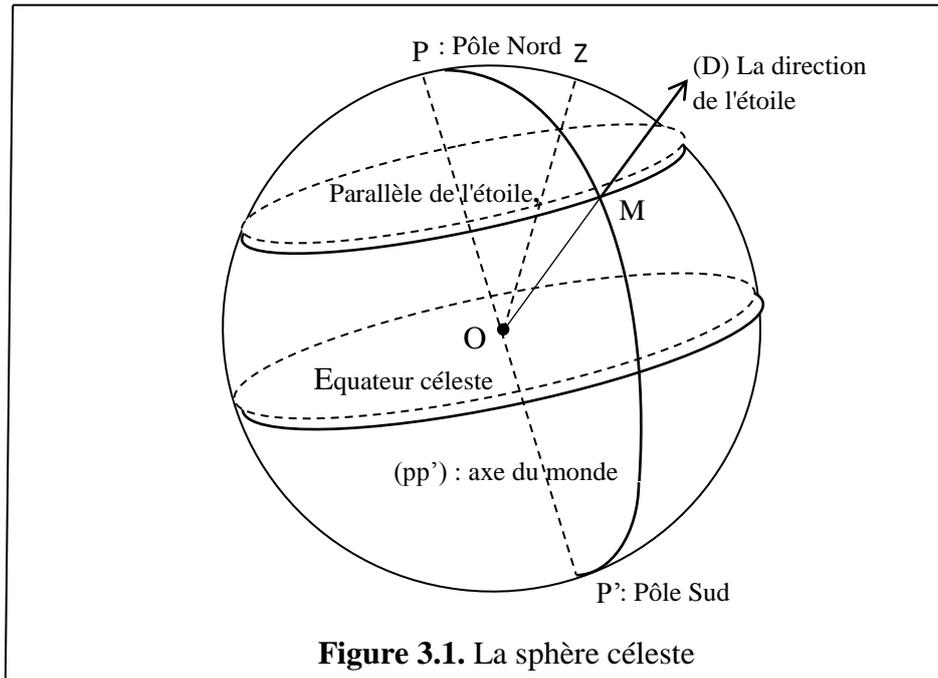
2.3.4. La thermosphère

La thermosphère est la couche supérieure de l'atmosphère, commençant vers 80 à 100 kilomètres d'altitude, séparée de la couche inférieure par la mésopause. Elle comprend, dans sa partie inférieure, l'ionosphère, couche ionisée, entre 80 et 600 kilomètres. Sa partie supérieure est l'exosphère, qui s'étend jusque vers 10.000 kilomètres et s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidéral.

3. Voûte céleste

3.1. Définition

La voûte céleste est une sphère imaginaire de rayon quelconque et dont le centre est occupé par la terre. Elle permet de représenter tous les astres tels qu'on les voit depuis la terre. Ainsi, il est possible de situer ceux-ci dans le ciel en leur attribuant des coordonnées uniques. Cette sphère est unique pour tous les habitants de la terre et son centre qui représente tous les lieux d'observation situés à la surface terrestre peut être confondu, en toute logique, avec le centre de la terre (Figure 3.1).

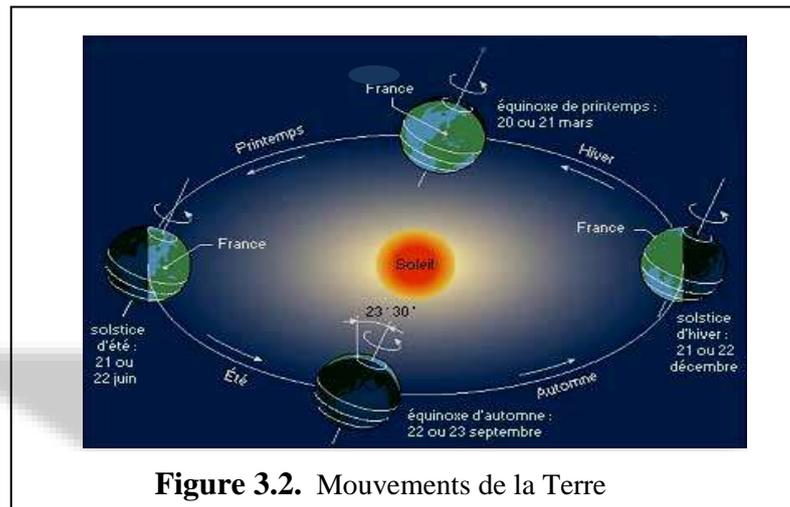


3.2. Mouvements de la terre

La terre tourne autour du soleil en une année (365 jours 6 heures et 9 minutes et 4 secondes) avec une vitesse moyenne de 106.000 km/h, qui n'est pas constante car la terre va plus vite quand elle est près du Soleil, ceci étant démontré par la première loi de Kepler [3]. L'orbite de cette révolution est une ellipse, le soleil est placé à l'un de ses deux foyers. Le plan créé par ce mouvement de révolution s'appelle le plan de l'écliptique, ce dernier provient du fait que la lune doit être dans ce plan pour qu'une éclipse se produise. Le cercle écliptique coupe le cercle équatorial en deux points γ et γ' ; le **point** γ , appelé point vernal, indique la direction dans laquelle un observateur terrestre verra le Soleil le jour de **l'équinoxe de printemps**. L'axe des pôles terrestres fait avec l'axe des pôles écliptiques un angle « δ » dont la valeur est égale à $23^\circ 27'$, et reste parallèle à lui-même quelle que soit la position de la Terre par rapport au Soleil. C'est ce qu'on appelle l'obliquité de la terre. L'ensemble des constellations traversées par le soleil au cours de l'année s'appelle le **Zodiaque** (Figure 3.2).

3.3. Données astronomiques

- Equinoxe de printemps : 21 Mars, $\delta = 0$
- Solstice d'été : 22 Juin, $\delta = + 23^\circ 27'$
- Equinoxe d'automne : 23 Septembre, $\delta = 0$
- Solstice d'hiver : 22 Décembre, $\delta = - 23^\circ 27'$
- Approche maximale : Périhélie : 2 Janvier
- Approche minimale : Aphélie : 2 Juillet

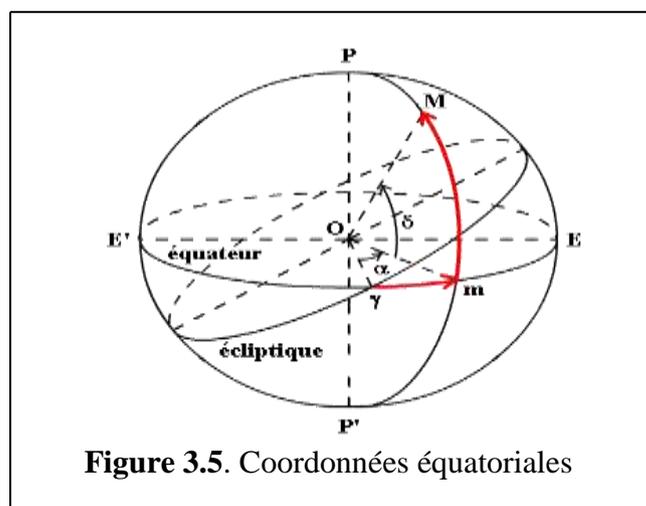


3.4. Repérage d'un astre sur la sphère céleste

C'est un procédé simple qui consiste à quadriller la sphère céleste par de grands cercles imaginaires, passant par les deux pôles célestes et des cercles parallèles à l'équateur. Ce quadrillage sert de support à deux systèmes de coordonnées l'un est appelé coordonnées équatoriales et l'autre coordonnées horaires.

3.5. Système de coordonnées équatoriales

Il sert pour définir un système dans lequel les coordonnées d'un astre sont indépendantes du mouvement diurne et du lieu d'observation dont les éléments de référence sont l'équateur céleste comme plan fondamental; et le demi grand cercle passant par les pôles et le point vernal γ . La direction d'un astre est alors caractérisée par deux angles : sa déclinaison δ et son ascension droite α , mesurée sur l'équateur à partir du point vernal γ : $\alpha = \gamma\hat{m}$ ou l'arc « γm » de l'équateur, compté de 0 à 360° ou plus généralement de 0 à 24 heures dans le sens direct, c'est à dire dans le sens de la rotation de la terre sur elle-même. La connaissance des coordonnées équatoriales d'un astre n'indique donc pas à un observateur dans quelle direction il le verra, par rapport à un repère local (Figure 3.5).



3.6. Système de coordonnées horaires

Il sert pour viser un astre en un lieu donné. C'est un système de coordonnées locales. La direction d'une étoile est alors caractérisée par son angle horaire H , et sa déclinaison δ . Le système précédent est un système local rapporté au zénith. Un deuxième système local se rapporte, cette fois ci, aux pôles célestes. Le plan fondamental est le plan de l'équateur céleste, la perpendiculaire en O à ce plan est la ligne des pôles PP' (Figure 3.6).

3.6.1. L'angle horaire

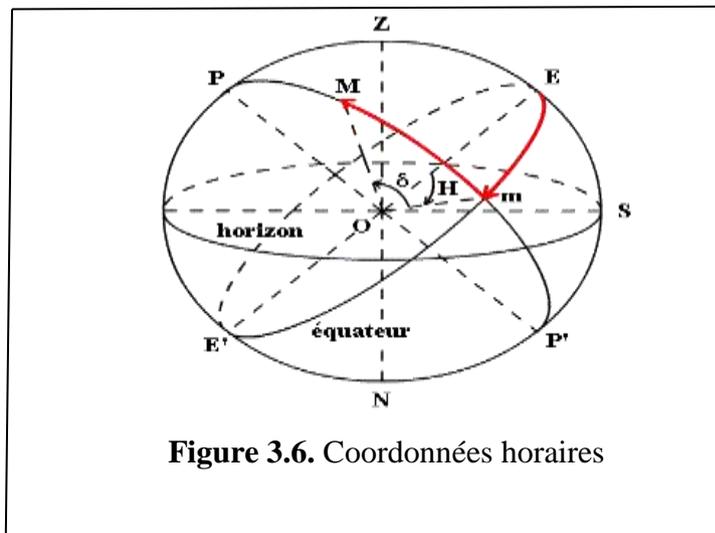
L'angle horaire ω de l'astre M est l'angle de son cercle horaire et du demi méridien contenant le zénith désigné par $H = E\hat{O}m$ ou l'arc Em de l'équateur, il est compté positivement de 0 à 360° à partir de E et dans le sens rétrograde, (1 heure correspond à 15°)

3.6.2. La déclinaison

La déclinaison δ de l'astre M est l'angle formé par la direction de M et l'équateur : $\delta = m\hat{O}M$ ou l'arc mM du cercle horaire. On la compte à partir de l'équateur de 0 à $+90^\circ$ vers le pôle nord et de 0 à -90° vers le pôle sud.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1)$$

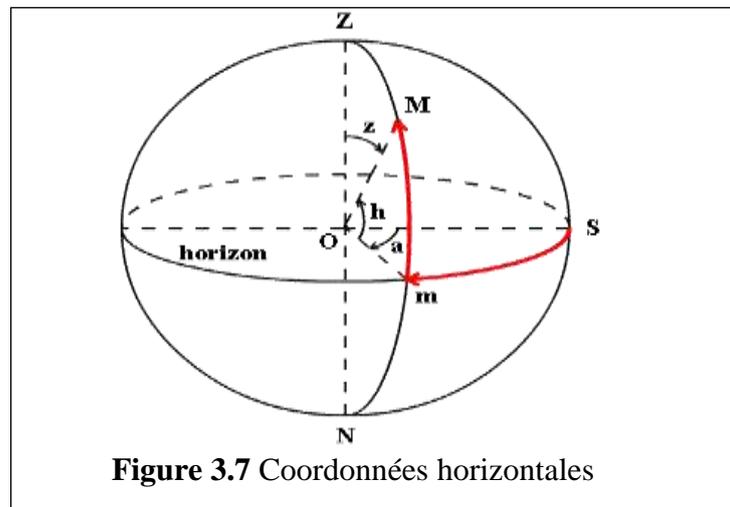
n : nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier



3.7. Système de coordonnées horizontales

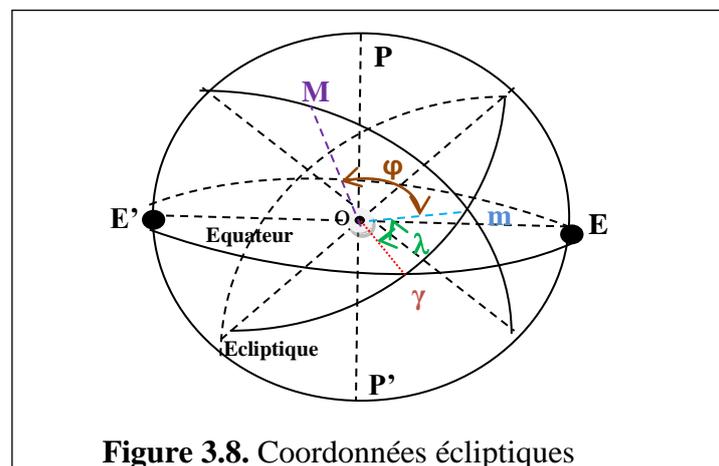
Le centre O de la sphère céleste est le lieu où se trouve l'observateur (figure 3.7). Il sert pour repérer un astre par rapport à l'horizon du lieu d'observation. Les éléments de référence sont respectivement le plan horizontal du lieu et le demi-méridien sud du

lieu d'observation. Dans ce système de coordonnées, la direction d'un astre est caractérisée par respectivement son azimut « a » et sa hauteur « h ». On emploie aussi la distance zénithale « z ». L'azimut de l'astre « M » est l'angle $a = \widehat{SOM}$ ou l'arc Sm ; il se compte de 0 à 360° dans le sens rétrograde, c'est à dire dans le sens du mouvement diurne. La hauteur de l'astre « M » l'angle $h = \widehat{mOM}$ ou l'arc mM du vertical. Compté à partir de l'horizon de 0 à + 90° vers le zénith si M se trouve au dessus de l'horizon de 0 à - 90° vers le nadir si M est au dessous. La distance zénithale « z » de M, qui se compte de 0 à 180° à partir de Z. Dans tous les cas on a : $h + z = 90^\circ$ (Figure 3.7). Les mesures de ces coordonnées se font à l'aide d'un théodolite ou d'un sextant.



3.8. Système de coordonnées écliptiques

Il sert pour repérer la position du soleil, qui varie au cours de l'année sur l'écliptique, et celles des planètes, qui se déplacent toujours au voisinage de l'écliptique. Les éléments de références sont : le plan de l'écliptique et le point vernal γ . Dans ce système de coordonnées, la direction d'un astre est définie par : sa longitude céleste $\lambda = \widehat{\gamma Om}$, comptée à partir du point vernal γ de 0 à 360° dans le sens direct, et sa latitude céleste centre $\varphi = \widehat{mOM}$ ou l'arc « mM » comptée à partir de l'écliptique de 0 à + 90° dans le sens du pôle nord P de l'écliptique de 0 à - 90° dans le sens du pôle sud. Ces deux coordonnées sont mesurées en degrés (Figure 3.8).



4. Potentiel de l'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie dégagée par le soleil grâce à son rayonnement, et directement à travers l'atmosphère. La terre reçoit chaque année $1070000 \cdot 10^{15}$ Wh d'énergie solaire, c'est une quantité considérable, soit 8.000 fois la consommation énergétique mondiale. Pour couvrir les besoins énergétiques de la planète, exploiter seulement 0,01% de cette énergie suffirait. Sa production intermittente, en fonction de l'ensoleillement (nuage, nuit, saison), et la difficulté de son stockage, représente l'un des freins au développement de l'exploitation de cette source renouvelable, non polluante et abondante. L'énergie solaire, est en fait la somme de rayonnements électromagnétiques qu'envoie le soleil, particulièrement la partie de ce rayonnement qui impacte la terre. Ce rayonnement est une source de lumière, de chaleur, de vie, etc.

5. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme de rayonnements, de l'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. En effet, une partie du rayonnement solaire est réfléchi par l'atmosphère, une autre partie y est diffusée et le reste atteindra la surface de la terre, formant le rayonnement global qui est le rayonnement solaire restant à disposition à la surface de la terre. Il comprend deux composantes: une composante directe et une composante diffuse [4].

5.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil par ciel clair. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol.

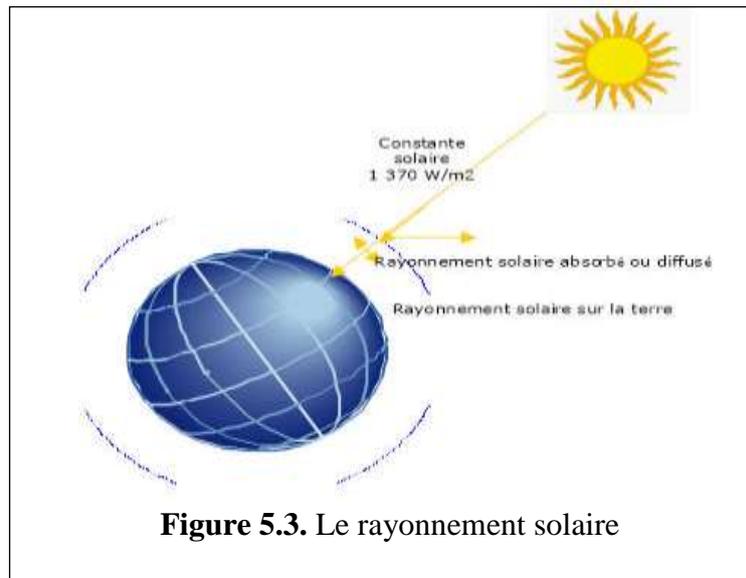
5.2. Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la terre, il provient de toute la voûte céleste.

5.3. Constante solaire

La constante solaire est la puissance maximale que le rayonnement solaire pourrait atteindre à la surface de la terre. Du fait de la distance entre la terre et le soleil, cette puissance est réduite à environ 1370 W par m^2 à la limite de notre atmosphère.

Comme cette valeur ne varie pratiquement pas, elle est appelée la constante solaire (Figure 5.3).



5.4. L'albédo

L'albédo est une valeur physique qui exprime la part de rayonnement solaire qui va être renvoyée par l'atmosphère et la surface terrestre vers l'espace, et qui ne servira donc pas à chauffer la planète. Pour toutes surfaces confondues, l'albédo moyen terrestre est de 30%. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la terre sont : les nuages, les surfaces de neige et de glace et les aérosols [5].

5.5. Temps Universel

Le Temps Universel (TU) : est une échelle de temps basée sur la rotation de la terre, il est défini par l'heure de passage du soleil au méridien origine.

5.6. Temps Solaire Local

La différence entre le Temps Solaire Local et le Temps Universel est appelée correction de longitude, donnée par la formule :

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (2)$$

5.7. Equation du temps

L'équation du temps est une correction ajoutée algébriquement à la valeur moyenne du temps solaire local pour obtenir une valeur vraie. La mesure du temps était basée sur la rotation de la terre : le jour était défini comme l'intervalle de temps entre deux passages du soleil par le même méridien. D'après la loi de Kepler (loi des aires), la terre a donc une variation saisonnière de sa vitesse orbitale qui affecte l'heure de passage du soleil au méridien. D'autre part, l'inclinaison de l'axe de rotation de la

terre par rapport au plan de l'écliptique introduit une oscillation supplémentaire de la durée du jour solaire. Basant sur ces deux facteurs, l'expérience montre que les passages du soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas avec exactement 24h d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16mn ou un retard de 14mn par rapport à 12h. L'équation du temps est une correction ajoutée algébriquement à la valeur moyenne du Temps Solaire Local pour obtenir une valeur vraie. Elle est exprimée en minutes par la relation suivante [6 et 7]:

$$Et = 9.87 \sin(2\acute{N}) - 7.53 \cos(\acute{N}) - 1.5 \sin(\acute{N}) \quad (3)$$

L'angle (\acute{N}) en degrés ($^{\circ}$) est défini en fonction du jour de l'année N .

$$\acute{N} = \frac{360(N - 1)}{365} \quad (4)$$

Le graphique ci dessous (Figure 5.7) montre les courbes suivantes:

- La courbe verte est l'obliquité de la terre due à l'inclinaison de son axe.
- La courbe bleue est l'ellipticité de la terre due à l'excentricité de son orbite.
- La courbe rouge est l'équation du temps qui résulte de la somme de l'obliquité et l'ellipticité.
- La courbe jaune est l'équation du temps avec une formule simplifiée.

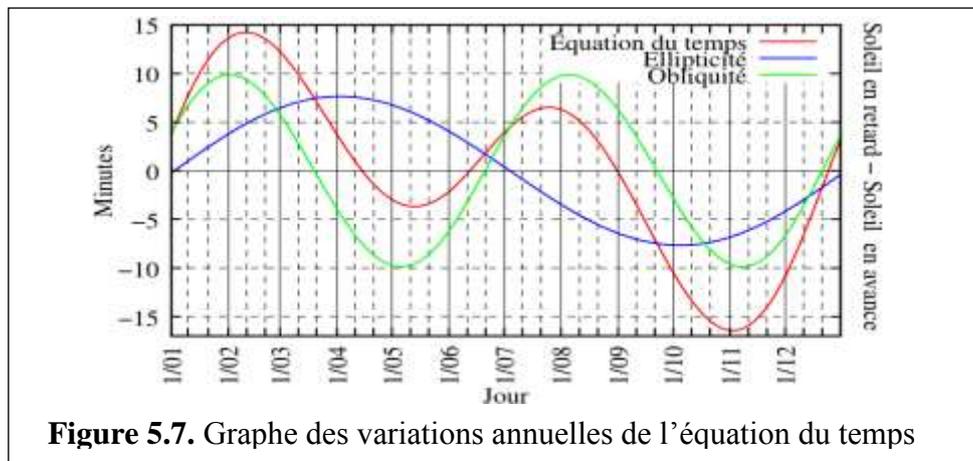


Figure 5.7. Graphe des variations annuelles de l'équation du temps

5.8. Temps Solaire Vrai

C'est le Temps Solaire Local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil :

$$TSV = TSL + \Delta t \quad (5)$$

Pour un lieu de longitude λ , il existe une correspondance directe entre l'angle horaire ω , le Temps Solaire Vrai (TSV), le Temps Solaire Local (TSL) et le Temps Universel (TU):

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (6)$$

$$\omega = 15. (TSV - 12) \quad (7)$$

$$\omega = 15. \left(TU + \frac{\lambda}{15} + Dt - 12 \right) \quad (8)$$

5.9. Angle horaire

A chaque moment, il est plus pratique de calculer le temps en degrés qu'en heures. L'unité de mesure est l'angle horaire (24 h représente 360° horaires). L'angle horaire se mesure à partir de midi solaire, il est positif s'il est avant midi et il est négatif s'il est après midi. L'angle horaire est obtenu de la façon suivante :

$$\omega = 360 \times \frac{(TSV - 12)}{24} \quad (9)$$

5.10. L'azimut du soleil

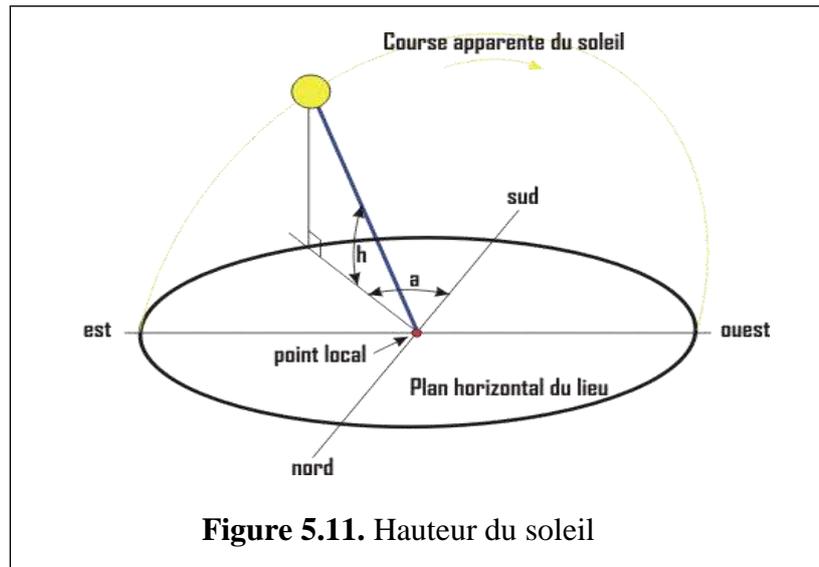
L'azimut solaire (a) est l'angle horizontal formé par le plan méridien (axe nord-sud) et le plan vertical du vecteur "point local-soleil". Le signe de l'azimut est le même que celui de l'angle horaire.

$$a = \arcsin(\cos(\delta) \times \frac{\sin(\omega)}{\cos(h)}) \quad (10)$$

5.11. La hauteur du soleil.

La hauteur du soleil (h), ou encore l'altitude, est l'angle formé par le plan horizontal du lieu considéré et le vecteur "point local-soleil" (Figure 5.11). Cette hauteur du soleil intervient fortement sur la valeur de l'éclairement solaire et pour apprécier cette valeur en un point et une heure donnés il est nécessaire de calculer cette hauteur par la formule suivante

$$h = \arcsin(\sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (11)$$



5.12. Heures de lever et de coucher du soleil

A partir de la latitude et de la déclinaison, il est possible de connaître l'heure solaire vraie du lever et du coucher de soleil :

$$TSV_{Lever} = 12 - \frac{\left(\text{ArcCos}(-\text{Tan}(\phi) \times \text{Tan}(\delta)) \right)}{15} \quad (12)$$

$$TSV_{Coucher} = 12 + \frac{\left(\text{ArcCos}(-\text{Tan}(\phi) \times \text{Tan}(\delta)) \right)}{15} \quad (13)$$

5.13. Durée d'insolation

La durée d'insolation représente la durée maximale de la journée :

$$Di = \frac{2}{15} \times \text{ArcCos}(-\text{Tan}(\phi) \times \text{Tan}(\delta)) \quad (14)$$

6. Historique de l'énergie solaire

L'énergie solaire est à l'origine de la vie sur terre: les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leur matière organique. Donc le principe de l'énergie solaire ne date pas d'aujourd'hui, au contraire les principes de base ont été posés il y a bien longtemps mais les majeures améliorations datent belle et bien depuis nos jours.

6.1. Dès l'Antiquité

Dans l'antiquité (époque de la découverte), les Grecs et les Romains savaient utiliser l'énergie solaire pour allumer la flamme des jeux olympiques, ils utilisaient une sorte de miroir parabolique primitif.

Socrate (-470 à -399) le philosophe grec, a enseigné l'architecture bioclimatique en expliquant que les maisons orientées au sud bénéficiaient de la chaleur du Soleil en hiver.

Archimède (-287 à -212) a réussi à enflammer des bateaux de la flotte romaine qui assiégeait Syracuse en -212, grâce à de nombreux miroirs géants en bronze polis, tous orientés sur le même point du navire.

6.2. Au 18^{ème} siècle

C'est le siècle des lumières (époque de la redécouverte et de l'expérimentation), donne l'intérêt pour le soleil par les premières études et expériences sur son énergie.

Buffon, le botaniste, qui a, en 1747, mis au point une machine capable d'enflammer des planches en bois à 48 mètres. Cet engin est composé de 168 petits miroirs plans de 16 centimètres de largeur sur 22 cm de hauteur qui réfléchissent les rayons du soleil en un point unique permettant une élévation de la température (Figure 6.2.1).

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), le célèbre chimiste français invente en 1774 un très puissant four solaire composé de deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du soleil, et qui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C (Figure 6.2.2).

Horace Bénédicte de Saussure (1740 à 1799), invente en 1767 le premier four solaire appelé "boîte chaude" qui lui permet de démontrer l'effet de serre. Il obtient une température de 160°C (Figure 6.2.3).

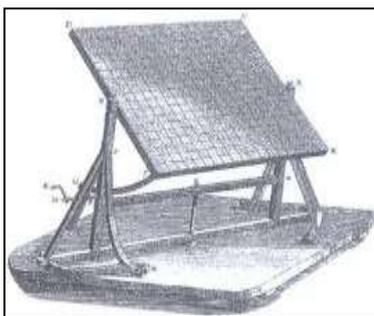


Figure 6.2.1 Un miroir ardent



Figure 6.2.2. Puissant four solaire

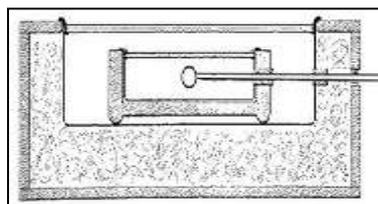


Figure 6.2.3 Boîte chaude

6.3. 19^{ème} siècle

Le 19^{ème} siècle (époque de redécouverte et de l'expérimentation), est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique.

Antoine Becquerel (1788-1878), le physicien français, découvre En 1839, par hasard, l'effet photovoltaïque. Une nouvelle voie de l'exploitation de l'énergie solaire s'ouvre alors.

Augustin Mouchot (1835- 1912), un enseignant français, avait déjà deviné que les énergies fossiles que les occidentaux commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il commence à s'intéresser à l'énergie solaire en 1860 en construisant un cuiseur solaire. En 1866, il invente le premier moteur solaire avec un réflecteur parabolique et une chaudière cylindrique en verre alimentant une petite machine à vapeur. En 1871, une subvention du conseil général de Tours lui permet de travailler à plein temps pour construire un four solaire d'une surface de 4 m² qu'il présente à l'Académie des Sciences en octobre 1875. En 1877, une subvention du Conseil général d'Alger lui permet de construire sur le même principe un grand appareil de 20 m², dont il reçoit une médaille d'or à l'exposition universelle de 1878 (Figure 6.4.1) [8].

Charles Wilson, l'ingénieur suédois, a construit, en 1872, un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m², ce distillateur produisit pendant 40 ans 23.000 litres d'eau par jour à un prix minime.

Albert Einstein, le physicien théoricien allemand explique cet effet en 1900.

Robert Andrew Millikan, un physicien américain a confirmé, en 1910, les prédictions d'Einstein.

6.4. A partir du 20^{ème} siècle

Dès 1970, le solaire connaît un vif regain d'intérêt. Les premières centrales solaires sont construites, et les premières applications individuelles apparaissent.

Charles Vernon Boys (1855; 1944). Le physicien anglais est l'inventeur du capteur cylindro-parabolique. Son invention servit pour la première fois en Egypte, où on construisit en 1912 une centrale thermique composée de 5 réflecteurs de 60 mètres de long permettant d'irriguer une grande surface de cultures (Figure 6.4.2).



Figure 6.4.1. Four solaire de Mouchot

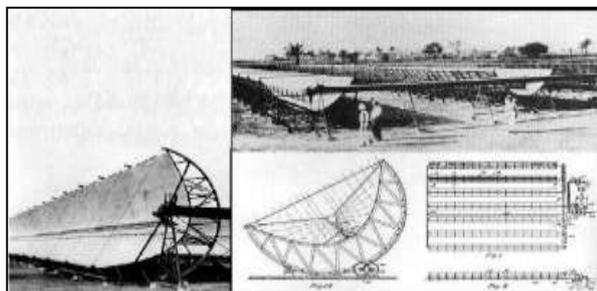


Figure 6.4.2. Centrale thermique

A partir de 1920, des particuliers, aux Etats-Unis, installent chez eux des chauffe-eau solaires, et également des « Crystal House », chauffées uniquement grâce à l'apport énergétique du soleil, sont construites.

Félix Trombe (1906 à 1985), le physicien français est l'un des pionniers de l'énergie solaire en France. Il a dirigé, en 1949, à la création à Mont-Louis (Pyrénées Orientales) d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50kW, puis un grand four de 1.000 kW d'Odeillo à Font-Romeu (Figures 6.4.3 et 6.4.4).



Figure 6.4.3. Grand four de 1 MW d'Odeillo à Font-Romeu

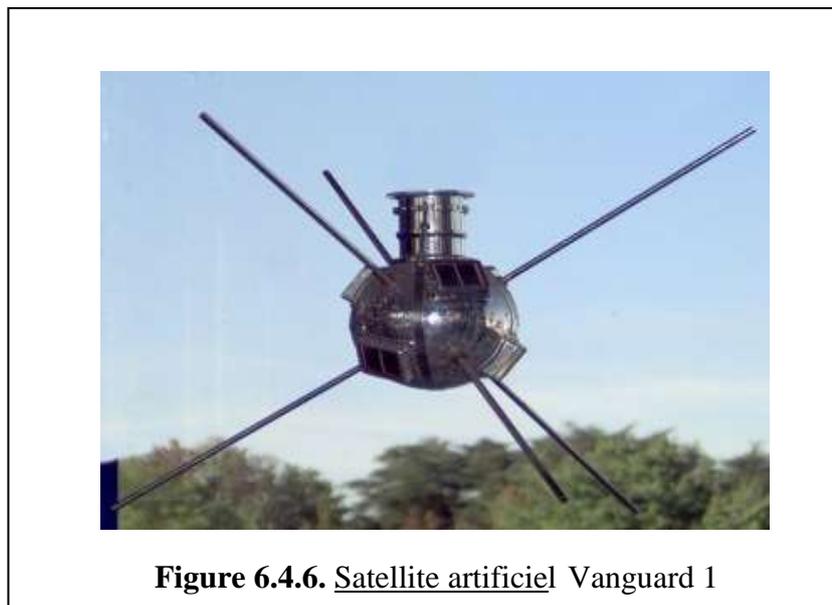
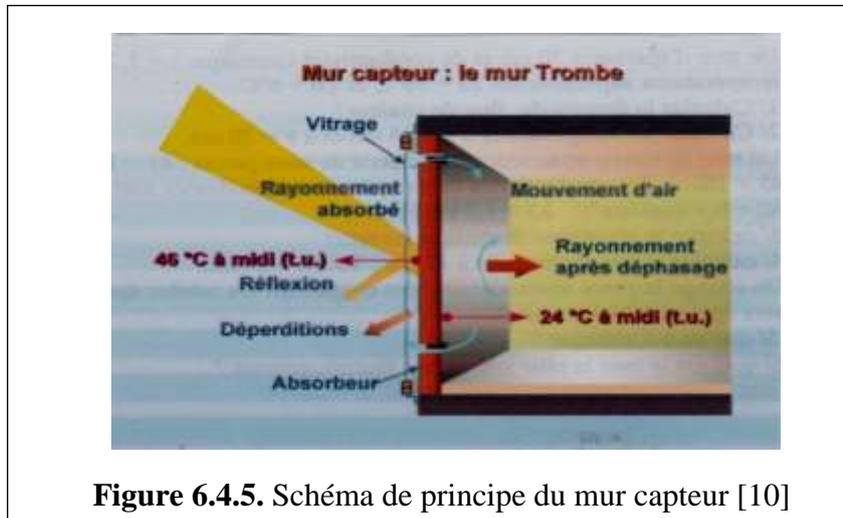


Figure 6.4.4. Four solaire d'une puissance de 50 kW

Dans le cadre des économies d'énergie ou de l'aide aux pays en voie de développement, Félix Trombe étudie d'autres formes d'exploitation de l'énergie solaire passive. Il crée avec l'architecte Jacques Michel le Mur Trombe. Ce mur est composé d'un bloc de béton qui accumule le rayonnement solaire du jour et le restitue pendant la nuit (Figure 6.4.5) [9].

Chapin, Pearson et Prince (1954), trois chercheurs américains, mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone avec une amélioration de son rendement. Vanguard 1 est le plus ancien

satellite artificiel lancé en 1958. Il est équipé de deux émetteurs radioélectriques : un émetteur de 10 mW sur la fréquence de 108 MHz alimenté par une batterie au mercure plus un émetteur de 5 mW sur la fréquence de 108,03 MHz alimenté par six cellules solaires montées sur le corps du satellite (Figure 6.4.6).



En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware. Au cours des années 80, de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tels que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires (Figure 6.4.7).

En 1983, la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque est née en Australie, elle parcourt une distance de 4.000 km (Figure 6.4.8).

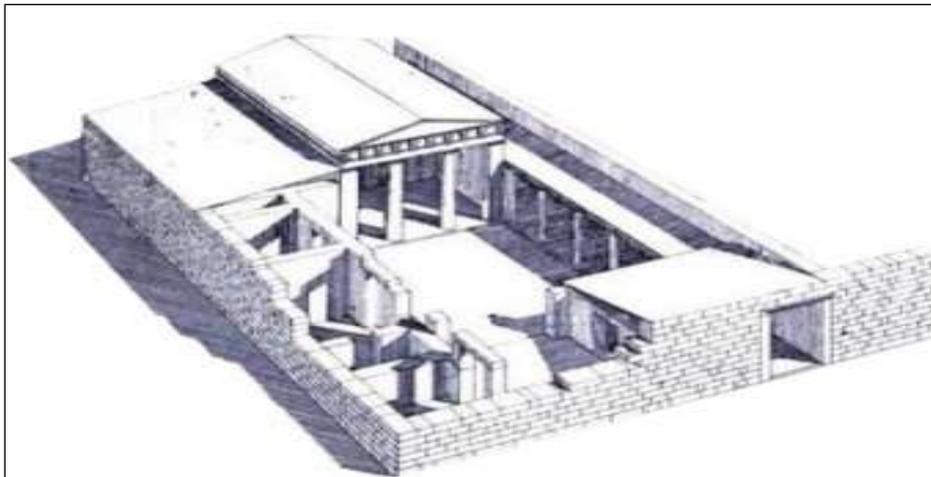
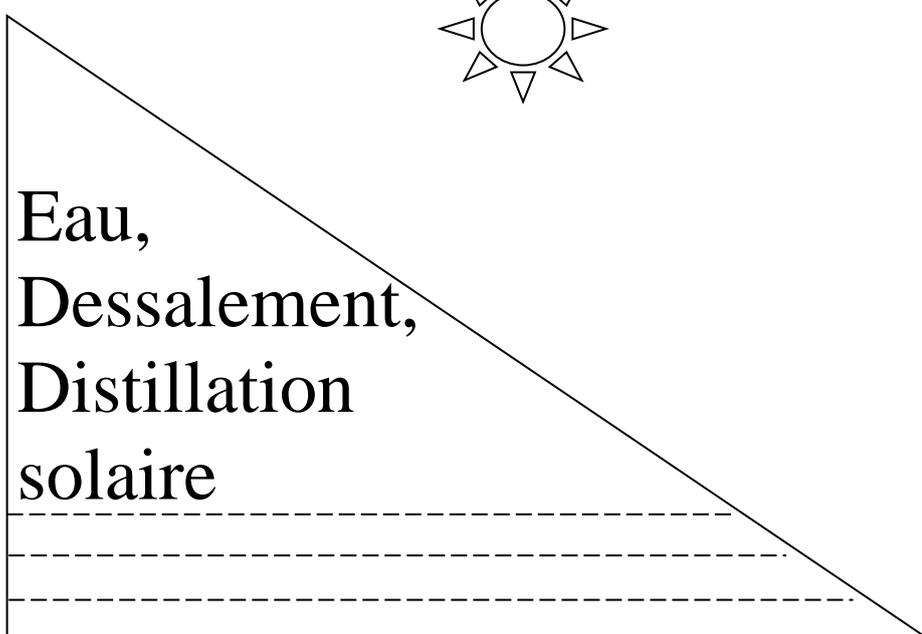
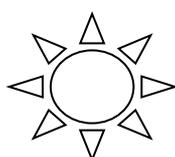


Figure 6.4.7. Reconstruction d'une maison dans la ville de Priène



Figure 6.4.8. Première voiture solaire

L'énergie solaire est propre, renouvelable et inépuisable à la différence du gaz, du pétrole et du charbon, qui sont pourtant encore plus utilisés que le solaire. Elle est soutenable, aidant à protéger notre environnement, elle ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques. Elle reste une source d'énergie encore peu développée et relativement chère, Elle ne pourra pas remplacer, à elle seule, les énergies fossiles, mais elle permet, néanmoins, de réaliser d'importantes économies d'énergie [11]. Aujourd'hui, l'énergie solaire est encouragée car les pouvoirs publics soutiennent les initiatives vers les énergies renouvelables.



Eau et dessalement

1. L'eau

Selon l'hypothèse de certains philosophes grecs et notamment d'Empédocle au V^e siècle av. J.C., tous les matériaux constituant le monde seraient composés de quatre éléments, qui sont : la Terre, l'Eau, l'Air et le Feu [12]

1.1. Origine de l'eau sur terre

L'hydrogène est produit très tôt dans l'histoire de l'univers (premier atome formé dans le Big Bang); l'oxygène est le produit de réaction de fusion thermonucléaire au sein de certaines étoiles; ces deux atomes se combinent au cours d'une réaction exothermique pour former l'eau. Lorsque la terre s'est formée, l'eau était une des molécules présentes en quantité importante comme dans les météorites et les comètes [13].

1.2. Les formes de l'eau sur Terre :

Près de 70 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau dont 97 % d'eau salée et 3% d'eau douce dans les différents réservoirs, essentiellement sous forme d'océans, mais l'eau est aussi présente sous forme gazeuse, liquide et solide. Le volume approximatif de l'eau de la terre est de 1 360 000 000 km³, dont 97,2 % de ce volume se trouve dans les océans, 1,8 % se trouve dans les glaciers et les calottes glaciaires, 0,9 % sont des eaux souterraines, 0,02 % existe sous forme d'eau douce dans les lacs, les mers intérieures, et les fleuves, et 0,001 % sous forme de vapeur d'eau atmosphérique à un moment donné.

1.3. Caractéristiques de l'eau

La physique moderne confirmera l'hypothèse atomiste : H₂O de l'eau comme formule chimique de son état pure. Certaines des caractéristiques de l'eau font d'elle une molécule remarquable, aux particularités qui ont permis à la vie sur terre de se développer :

- L'eau a une force de cohésion élevée, difficile à évaporer sa température d'ébullition est particulièrement élevée, cela permet à une importante phase liquide d'exister aux températures connues sur terre, qui est indispensable à la vie.
- Ses propriétés de solvant « doux » qui rend possible un très grand nombre de réactions biochimiques.

- Le fait que la densité de l'eau soit plus grande à l'état liquide que solide, que la glace flotte naturellement sur l'eau liquide, sa valeur maximal est à 4°C, cela permet à la vie aquatique de survivre aux périodes glacées.
- Tension superficielle particulièrement élevée permet un phénomène de capillarité qui permet, entre autres, à la sève des végétaux de monter et à de nombreux êtres vivants de se déplacer sur la surface de l'eau.

1.4. Utilisation de l'eau

En quantité, l'activité humaine qui consomme le plus d'eau traitée est l'agriculture (68%) pour l'irrigation, la consommation humaine (24%), l'industrie (5%) et la production d'énergie (3%).

1.5. Comparaison de consommation d'eau dans le monde

La consommation d'eau est très inégale selon les niveaux de développement des pays, elle est estimée à 3.000 m³/habitant/an dans les pays européens, de 9.985 m³/habitant/an aux Etats Unis et de 200 m³/habitant/an dans des pays en développement comme l'Angola ou l'Ethiopie.

1.6. Problématique de l'eau dans le monde

Jamais, depuis les premiers pas de l'homme sur terre, les questions liées à l'eau ne se sont posées en des termes aussi dramatiques qu'en ce début de millénaire. Quand un milliard d'être humains peinent, chaque jour, pour trouver de l'eau potable, et, quand plus du tiers de la population mondiale n'a pas accès à des systèmes d'assainissement adéquats, parler donc de "crise mondiale de l'eau" n'est en aucun cas une exagération, mais une appréciation réaliste et objective de l'un des plus grands défis auxquels est confrontée l'humanité toute entière. L'eau est une nécessité de base pour toutes les espèces vivantes, son importance s'est considérablement accrue avec l'augmentation de la consommation due à l'évolution de la démographie [14]. Dans les pays pauvres ou développés, l'eau va devenir un formidable enjeu durant le siècle à venir. Le problème de l'eau dans le monde est un problème non plus de quantité mais aussi de qualité. Sur les 8 milliards de l'humanité, 4 milliards de gens souffrent de l'insuffisance hydrique dont 2,3 milliards vivent dans le stress hydrique et 1,7 milliards vivent dans la pénurie hydrique [15]. Le moindre droit de l'être humain est l'accès garanti à une eau douce indispensable à sa survie par la couverture des besoins de l'irrigation, de l'élevage et ceux du secteur industriel [16].

1.7. Problématique de l'eau en Algérie

Le développement économique et social, la croissance des villes, des industries ainsi que la modernisation de l'agriculture et le développement des loisirs entraînent un

accroissement considérable de la demande en eau. L'information pluviométrique peut nous permettre d'évaluer le phénomène (degré) de sécheresse. L'Algérie est un pays semi-aride, voire même aride d'où l'eau est une ressource précieuse, de plus en plus limitée, difficile à exploiter, irrégulière, et localisée dans la bande côtière, dont la pluviométrie moyenne annuelle est évaluée entre 95 et $100 \times 10^9 \text{ m}^3$. Plus de $80 \times 10^9 \text{ m}^3$ s'évaporent, $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ s'infiltrent et $12,5 \times 10^9$ s'écoulent dans les cours d'eau [17].

1.8. Les potentialités globales en eau en Algérie

Les potentialités globales en eau sont évaluées à 19.4 milliards de m^3/an . Les ressources en eau souterraine contenues dans les nappes du nord du pays (ressources renouvelables) sont estimées à près de 2 milliards de m^3/an . Les ressources superficielles sont estimées à 12 milliards de m^3/an . Le Sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraine considérables provenant des nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT). Les réserves d'eau sont très importantes et sont de l'ordre de 60.000 milliards de m^3 dont 40.000 milliards sont situées en Algérie [18].

1.9. Capacités de mobilisation

Les capacités totales de mobilisation sont de 12 milliards de m^3/an dont 6,8 milliards au nord (5 milliards de m^3/an pour les eaux de surface et 1,8 milliards de m^3/an pour les eaux souterraines), et 5,2 milliards de m^3/an dans les régions sahariennes qui équivaut aux réserves exploitables sans risque de déséquilibre hydrodynamique. Ces ressources sont principalement mobilisées par les barrages dont la capacité totale des 59 barrages des 5 bassins hydrographiques est de 6 milliards de m^3 et un volume régularisable de 3 Milliards de m^3 . Aussi par les eaux souterraines, où leur exploitation atteint actuellement 1,6 milliards de m^3 par le forage et 85 millions de m^3 par les foggaras. Ainsi une telle mobilisation peut être effectuée par le dessalement.

2. Le dessalement

Le dessalement de l'eau de mer est pratiqué dans 23 stations pour une capacité de $347.000 \text{ m}^3/\text{jour}$ dont trois grandes stations sont la station du Hamma à Alger avec une capacité de $200.000 \text{ m}^3/\text{jour}$, elle est couplée avec la centrale électrique ; la station d'Arzew près d'Oran produit $90.000 \text{ m}^3/\text{jour}$, en plus de la production d'électricité (318Megawatts). Et enfin la station de Skikda qui fait le recyclage des eaux usées (épuration). Le volume annuel des eaux usées rejetées est estimé à 730 millions de m^3 . La capacité installée d'épuration des eaux usées est de 365 millions de m^3/an correspondant à 65 stations d'épuration en exploitation. Actuellement la situation en Algérie est encore exacerbée par plusieurs contraintes, entre autres :

- Un déséquilibre entre les besoins et les ressources disponibles, où le développement économique et social du pays ainsi que la croissance démographique ont induit durant

les deux décennies écoulées, un accroissement considérable des besoins en eau potable, industrielle et agricole ;

- Un déséquilibre géographique entre les besoins et les ressources, où la forte concentration des besoins en eau sur la bande littorale (60%) oblige à une réaffectation, par des transferts de ressources en eau, qui est assez coûteux financièrement, pour équilibrer les déficits des régions intérieures du pays, notamment toute la zone des hauts plateaux;
- Les rejets domestiques, industriels et agricoles sont à l'origine de la pollution des nappes et des ressources superficielles ce qui réduit considérablement les volumes d'eau susceptibles d'être utilisés ;
- Risque de rupture d'un développement durable aux prélèvements effectués dans les nappes souterraines qui dépassent les limites des ressources naturelles et nécessitent de puiser dans les réserves non renouvelables.

La faiblesse des ressources est encore aggravée par :

- La mauvaise répartition spatiale et temporelle de ces ressources ;
- L'érosion des sols et l'envasement des barrages ;
- Les pertes dues à la vétusté des réseaux de distribution et à l'insuffisance de la gestion;
- Les coûts importants des investissements nécessaires à la mobilisation et au transfert des ressources en eau.

3. Critère de qualité de l'eau potable

L'eau potable existe dans différentes sources, elle peut être pompée du sol par des puits, elle peut également être obtenue directement à partir des eaux de surface, telles que les fleuves, les lacs et les ruisseaux. L'eau de surface doit habituellement subir beaucoup plus d'étapes de purification que les eaux souterraines pour devenir consommable. L'eau destinée à être consommée par l'être humain doit être exempte d'organismes pathogènes et ne doit pas contenir de substances nocives ou radioactives à une concentration jugée dangereuse pour la santé. Elle doit aussi avoir de bonnes qualités organoleptiques comme : le goût, la couleur, l'odeur et la turbidité. Les autres caractéristiques, telles que la corrosivité, causée par une forte teneur en calcaire [19].

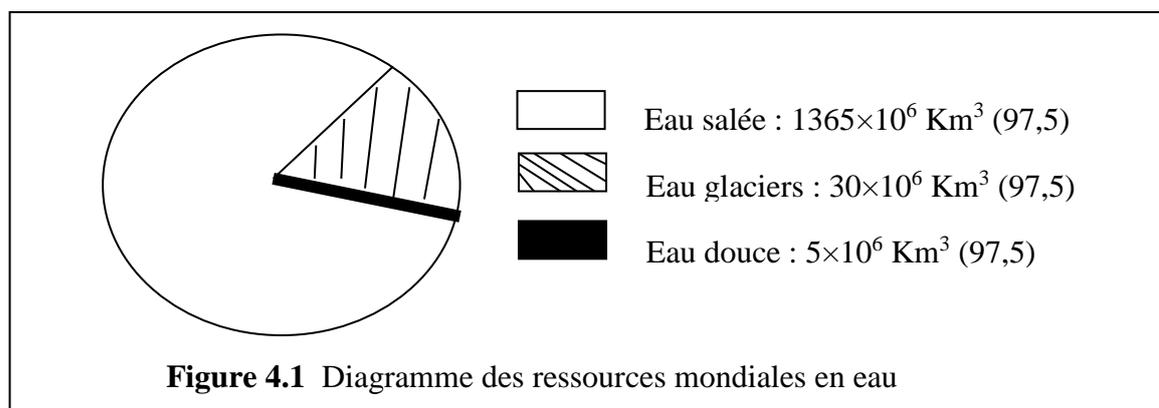
L'eau est vitale pour l'homme qui a besoin d'en boire au moins 1,5 litre par jour. Dès 1958, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'ISO (International Organization for Standardization), depuis 1978, publient des normes pour contribuer à garantir la salubrité de l'eau de boisson. L'ISO, qui s'est attachée dès le début à la surveillance des radionucléides dans l'eau en coopération permanente avec l'OMS, est plus active que jamais dans ce domaine. L'eau potable est une eau ayant des caractéristiques microbiennes, chimiques et physiques qui répondent aux directives de l'OMS ou aux normes nationales relatives à la qualité de l'eau de boisson. (Tableau 3.1)

Désignation	Valeur recommandée	Désignation	Valeur recommandée
Conductivité	250 micro S/cm	Molybdène (Mo)	0.07 mg/l
Aluminium (Al)	0.2 mg/l	Nickel (Ni)	0.02 mg/l
Antimoine (Sb)	0.005 mg/l	Azote (total N)	50 mg/l
Arsenic (As)	0.01 mg/l	Sélénium (Se)	0.01 mg/l
Bore (B)	0.3 mg/l	Sodium (Na)	200 mg/l
Cadmium (Cd)	0.003 mg/l	Uranium (U)	1.4 mg/l
Chrome (Cr)	0.05 mg/l	Zinc (Zn)	3 mg/l
Cuivre (Cu)	2 mg/l	Chlore (Cl)	250 mg/l
Plomb (Pb)	0.01 mg/l	Fluor (F)	1.5 mg/l
Manganèse (Mn)	0.5 mg/l	Sulfate (SO ₄)	500 mg/l
Mercure (Hg)	0.001 mg/l	dioxyde de chlore (ClO ₂)	0.4 mg/l

Tableau 3.1. Recommandation de l’OMS sur la qualité de l’eau potable

4. L’eau salée

L’Eau salée est une eau contenant une quantité sensible de sels dissous, plus particulièrement de chlorure de sodium par opposition à une eau douce. La plus grande partie des ressources mondiales d’eau sont des eaux salines (Figure 4) dont la teneur excessive en sel rend leur utilisation impropre aux exigences des activités humaines, ce qui nécessite l’élimination des sels. Les eaux salées comprennent l’eau de mer et les eaux saumâtres.



4.1. L'eau saumâtre

L'eau saumâtre désigne l'eau dont la teneur en sel est sensiblement inférieure à celle de l'eau de mer. La concentration totale de sels dissouts est généralement comprise entre 1.000 et 10.000 mg/l. La composition chimique de ces eaux varie non seulement d'une région à une, mais aussi pour une même région d'une saison à une autre, et ces variations sont dépendantes de plusieurs paramètres entre autres :

- La structure physique des roches traversées par les eaux ;
- La vitesse de circulation de l'eau dans les roches, donc c'est le temps de contact ;
- La matière déjà dissoute ;
- Les phénomènes d'évaporation.

4.2. L'eau de mer

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la terre. Ceux-ci occupent un volume estimé à 1340 millions de km³, ce qui représente 96,4 % de la capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre. La salinité moyenne de l'eau de mer est de 35 g/l, et reste généralement comprise entre 30 g/l et 40 g/l (Tableau 4.2). La grande particularité de l'eau de mer, est que les proportions relatives de ses constituants sont sensiblement constantes et indépendantes de la salinité; cette propriété a été établie par le chimiste écossais William Dittmar [20].

Mers	Salinité en g/litre
Mer Baltique	7,5
Mer Caspienne	13,5
Mer Noir	20
Mer Adriatique	25
Océan Pacifique	33,5
Océan Indien	33,8
Océan Atlantique	36
Mer Méditerranée	39
Golf Arabique	43
Mer Rouge	43
Mer Morte	270

Tableau 4.2. Salinité des différentes Mers

5. Procédés de dessalement

A cause de la sécheresse, l'eau douce pour la consommation courante n'est plus obtenue de la pluie. C'est pourquoi l'homme a toujours été fasciné par l'augmentation de sa réserve en eau douce par le dessalement des eaux salines qui représente la plus grande partie des ressources mondiales d'eau. En fonction du degré de leur salinité, les eaux salines existent en eaux de mer, où la salinité est proche de 35 g/l et en eau saumâtre, où la salinité moyenne est comprise entre 1 et 10 g/l [21]. Pour obtenir de l'eau douce, les principales technologies de dessalement des eaux actuellement installés, sont classées en deux catégories, et selon le principe appliqué on trouve :

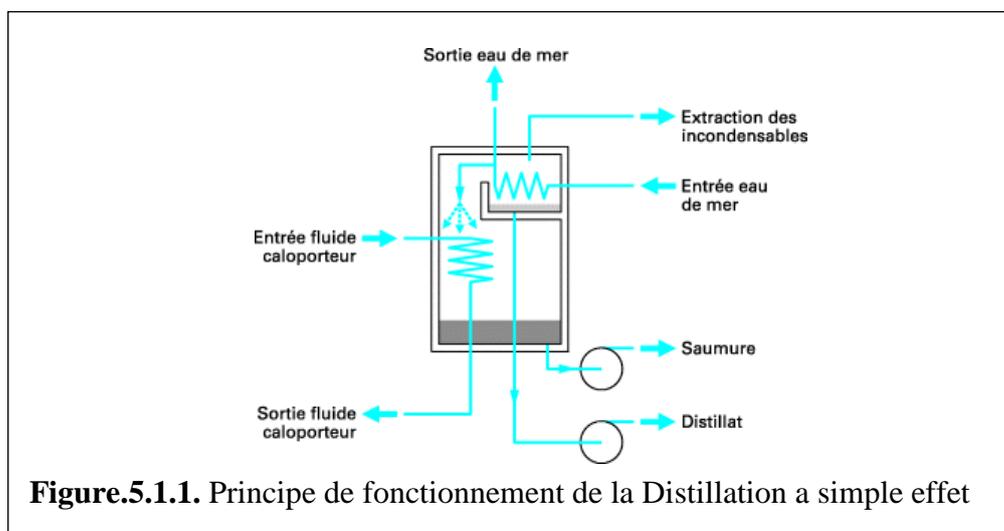
- Procédés thermiques, où la distillation et la congélation faisant intervenir un changement de phases.
- Procédés à membranes, l'osmose inverse et l'électrodialyse [22, 23].

5.1. Procédés thermiques

La distillation est le plus vieux procédé de dessalement : les marins grecs l'utilisaient déjà au III^{ème} siècle av. J-C. sur leurs bateaux. Le plus ancien évaporateur à multiples effets a été breveté il y a plus de 80 ans par le français Kestner. Ce procédé consiste à évaporer l'eau de mer, en utilisant une énergie thermique ou mécanique. Ensuite, il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable, où quatre types existent :

5.1.1. Distillation à simple effet

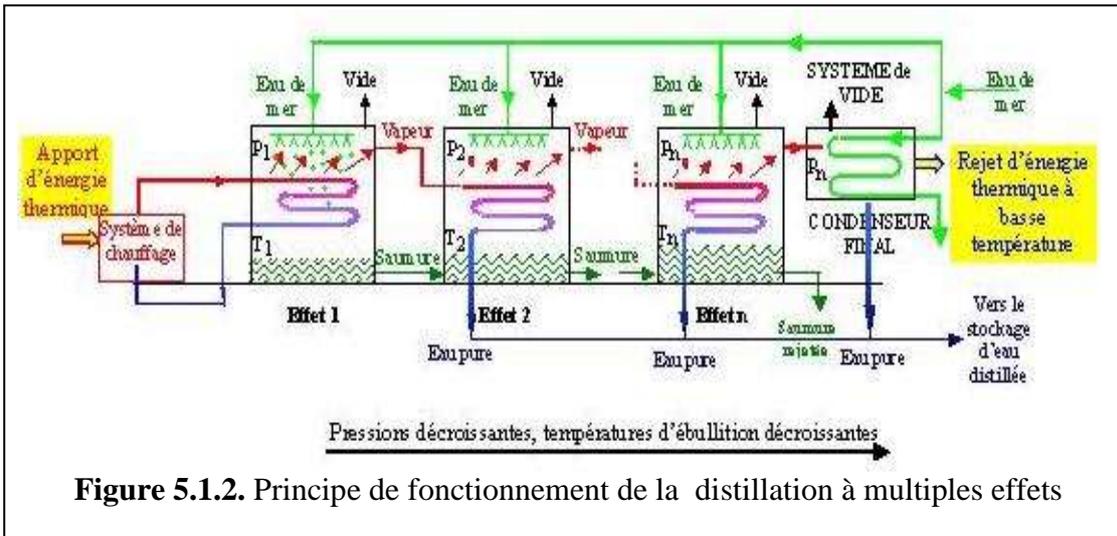
Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer, la vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un groupe électropompe soutire le distillat. Ce principe se caractérise par la simplicité de fonctionnement et la significative quantité de chaleur récupérable (figure 5.1.1.).



5.1.2. Distillation à multiples effets

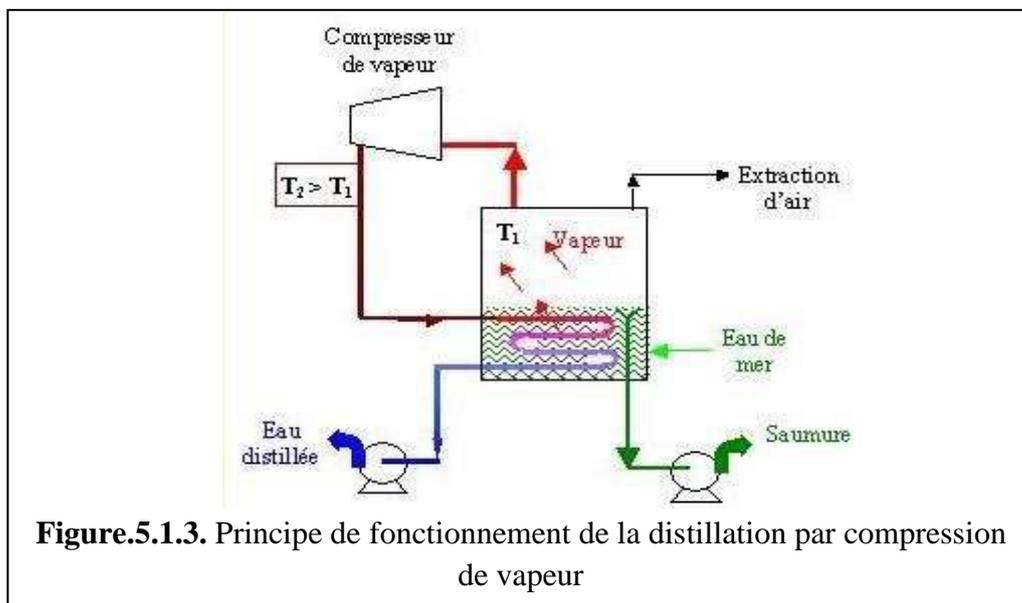
Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80 °C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. La vapeur ainsi produite dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet, où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet et ainsi de suite. La

multiplication du nombre d'effets est un paramètre de réduction de la consommation (figure 5.1.2).



5.1.3. Distillation par compression de vapeur

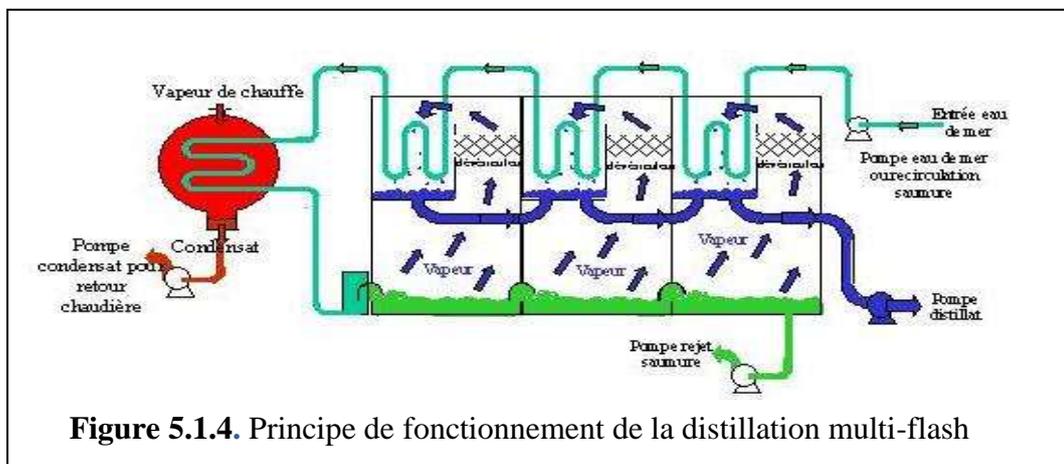
Le compresseur aspire la vapeur produite dans la chaudière et augmente la température par compression au-dessus de la température régnant dans celle-ci ; la chambre peut donc servir de condenseur à la vapeur comprimée, qui cède ainsi à l'eau la chaleur de condensation qui est réutilisée dans un nouveau cycle (figure 5.1.3).



5.1.4. Distillation multi-flash

Ce procédé consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Ce phénomène de flash est reproduit ensuite

dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle (Figure 5.1.4).



5.1.5. Congélation

Il s'agit d'un procédé de congélation sous vide. Après congélation d'une eau salée, se forment des cristaux, le sel étant chassé de l'eau lors de la cristallisation, se déposant sur la surface du cristal. L'obtention de l'eau douce, est réalisée en lavant les cristaux et enfin on la refonte.

5.2. Procédés à membranes

5.2.1. Osmose inverse

Elle est découverte par le physicien français Jean Antoine Nollet en 1748. La technique de dessalement par osmose inverse consiste en premier lieu à filtrer de l'eau de mer pour la débarrasser de ses impuretés, on l'a fait ensuite s'écouler à travers une membrane semi perméable qui ne laisse passer que les molécules d'eau débarrassées du sel (Figures 5.2.1.a et 5.2.1.b).

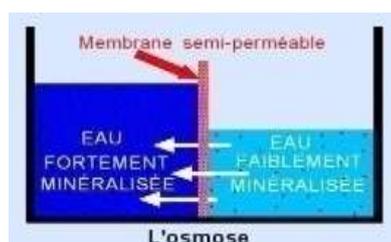


Figure 5.2.1.a. Principe de fonctionnement de l'osmose

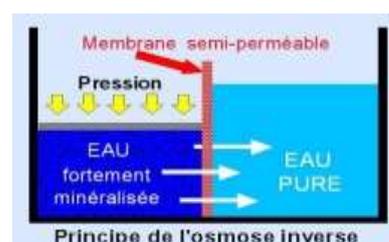
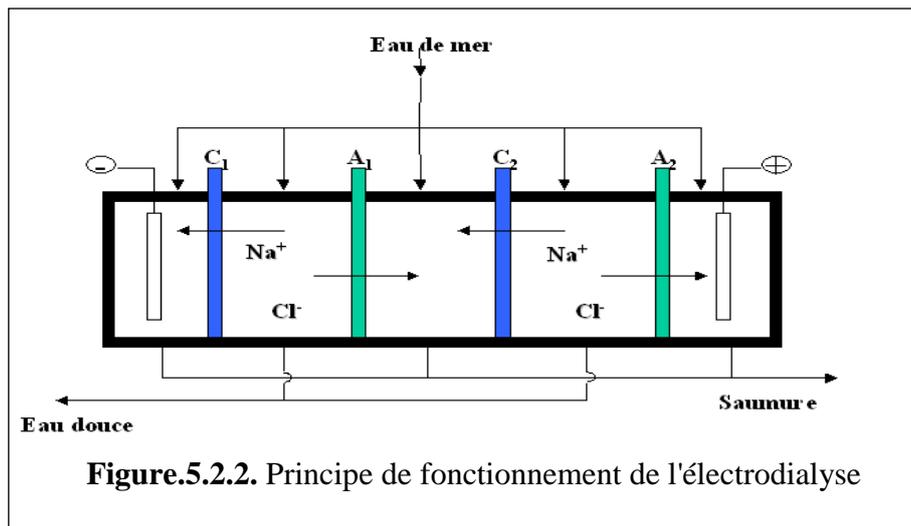


Figure 5.2.1.b. Principe de fonctionnement de l'osmose inverse

5.2.2. L'électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de nature électrochimique. 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, c'est à dire les ions Na^+ peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et les ions Cl^- les membranes anioniques, d'où on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments (Figure 28).



Beaucoup d'installations de dessalement sont utilisées surtout dans les pays du moyen orient. Des usines de dessalement sont utilisées surtout dans les pays du moyen orient. Des usines de traitement sont ainsi implantées dans les Émirats Arabes Unis (usine de Fujairah), en Israël (usine d'Ashkelon), en Syrie (usine d'Amman), ainsi qu'en Tunisie (usine de Djerba). On en trouve aussi en Algérie ($\approx 1.100.000 \text{ m}^3/\text{j}$). Il existe d'autres installées, en Amérique latine et en Espagne [24]. Ces installations se caractérisent par une consommation énorme de l'énergie, d'une quantité située entre 4 à 5 kWh/m³ et 15 kWh/m³. C'est une énergie coûteuse et polluante, qui constitue l'inconvénient majeur de ces procédés. La pollution de ces installations consiste en l'émission du gaz de dioxyde de carbone « CO_2 » atmosphérique, cette substance qui a augmenté de 1860 (280 ppm) à nos jours (360 ppm) de 28 % générant une augmentation de l'effet de serre et de la température moyenne de l'air. Si cette augmentation se poursuit, on peut s'attendre à une concentration de 700 ppm en 2050. De plus, le CO_2 atmosphérique, même si on arrêta de le produire, resterait 50 à 100 ans dans l'atmosphère [25]. Il existe aussi une autre technique très ancienne et fort intéressante utilisant l'énergie solaire, une énergie disponible, abondante et gratuite. Cette technique est d'un emploi commode dans les régions arides et ensoleillées, nécessite des surfaces d'emplacement au sol et des investissements importants. Par analogie, au cycle hydrologique naturel, il consiste en :

- L'absorption de la radiation solaire, en tant que chaleur par les océans, les lacs, etc., engendrant l'évaporation de l'eau.
- La vapeur ainsi produite est transportée en tant qu'humidité de l'air vers les régions les plus froides par l'intermédiaire des vents. Quand la vapeur est refroidie, la condensation commence à provoquer des précipitations de pluies et éventuellement de la neige. Cependant l'homme a reproduit, en un modèle miniaturisé, le cycle naturel. Ce modèle est appelé Distillateur solaire (figure 6).

6. Principe du distillateur solaire

Le distillateur solaire est le procédé de dessalement le plus ancien et le plus simple puisqu'il utilise l'énergie du soleil pour distiller l'eau. Ce procédé élimine également les impuretés telles que le sel, les métaux lourds et les micro-organismes. Le distillateur solaire est composé d'une serre de verre fermée et exposée au soleil. L'eau à dessaler est conduite dans la serre, l'épaisseur de l'eau étant de quelques centimètres. Le rayonnement « UV » solaire traverse le toit de verre et est absorbé en grande partie par l'eau et le fond du bac, pour être converti en énergie thermique. L'intérieur de la serre s'échauffe et émet un rayonnement « IR ». Le verre étant opaque aux rayons « IR », ce rayonnement ne peut pas sortir et son énergie fait élever la température de l'air intérieur de la serre, surchauffé et saturé en vapeur d'eau qui finit par se condenser au contact de la paroi en verre. Le condensat (eau douce) descend par gravité le long de la paroi pour être recueilli en bas du vitrage [26].

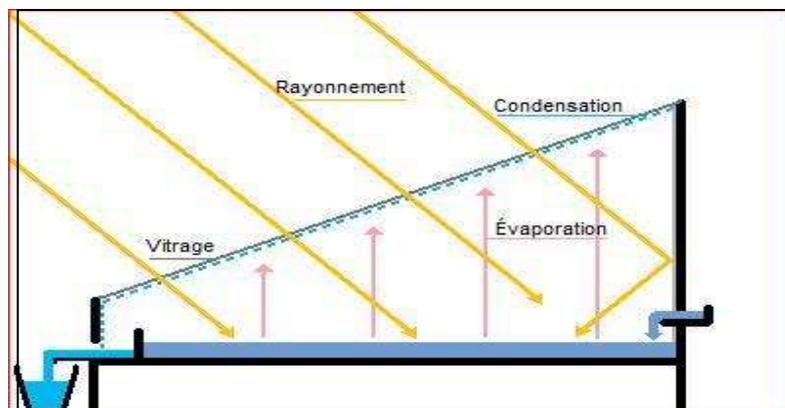


Figure.6. Distillateur solaire simple à effet de serre

7. Origine et historique de la distillation solaire

La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles où :

En **1551**, les premiers appareils pour distiller l'eau salée ont été conçus par les alchimistes arabes ; c'est une certitude rapportée par Mouchot [27].

En **1862**, le chimiste français Lavoisier a utilisé de larges lentilles en verre pour concentrer les rayons solaires afin de distiller l'eau contenue dans des flacons [27].

En **1872**, fabrication du premier distillateur solaire conventionnel de 5.000 m² de surface à Las-Salinas dans le nord du Chili par l'ingénieur suédois Carlos Wilson. A cause du problème d'accumulation rapide des sels dans le bassin, la nécessité d'un nettoyage régulier du distillateur a donné une fin de fonctionnement de ce dernier en 1910 [28]. En **1920**, Kaush a utilisé des réflecteurs métalliques pour concentrer les rayons solaires [28]. Au début des années 30, Trivinof avait proposé un distillateur incliné [29], et en **1938** Abbot a utilisé des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer les rayons solaires acheminés dans des tubes contenant de l'eau [29].

En **1945**, invention d'un nouveau distillateur solaire type sphérique, où un grand nombre de ce modèle a été utilisé pendant la 2^{ème} guerre mondiale.

En **1952** l'université de Californie a commencé des investigations dont le but est d'étudier les effets de certains paramètres affectant le rendement tels que la géométrie et les différents matériaux d'isolation [30].

En **1953** Cyril Goméla a développé en Algérie une dizaine de types de distillateurs solaires qui ont été ensuite testés et commercialisés à travers l'Afrique du nord, le Sénégal et l'Australie. Afin d'augmenter le rendement, Savornin et Le Jeune ont aussi étudiés d'autres types de distillateurs solaires inclinés [31].

En **1960** trois grandes stations de distillateurs solaires ont été construites en Tunisie.

En **1962** le groupe d'énergie solaire de l'Agence Tunisienne de l'Energie Atomique, a étudié activement la distillation solaire.

Entre **1963** et **1967** le CSIRO d'Australie (Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization) a construit et testé plus de 8 distillateurs dans le but d'améliorer l'efficacité par l'étude de l'effet de certains paramètres [32].

En **1969** Cooper a proposé une simulation pour étudier les performances d'un distillateur solaire à effet de serre [33].

8. Types de distillateurs solaires

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires utilisant le même principe de fonctionnement, mais ils peuvent être différents en termes de conception et en termes de matériaux utilisés. Par rapport à l'état physique de la saumure dans le bassin, on distingue deux grandes familles, à savoir les distillateurs statiques et les distillateurs à ruissellement.

8.1. Distillateurs à ruissellement

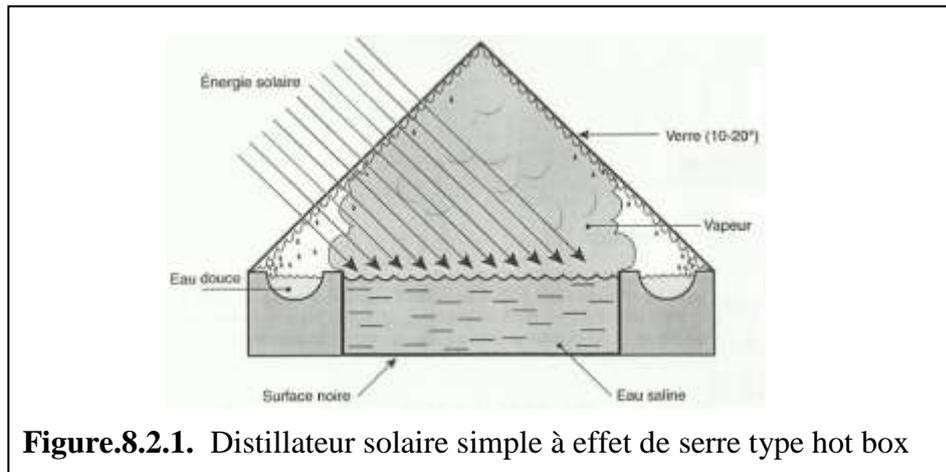
Ce sont des distillateurs dont l'eau à distiller est en mouvement dont ils existent sous différentes géométries.

8.2. Distillateurs statiques

C'est le type le plus répandu dont l'eau à distiller est statique, où on peut citer entre autres :

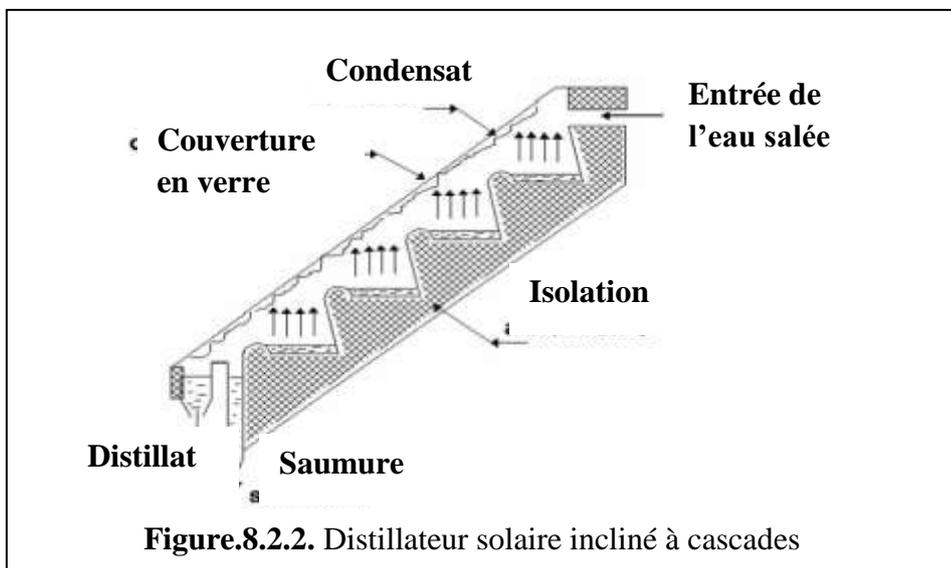
8.2.1. Distillateur solaire simple à effet de serre

C'est le type du distillateur le plus utilisé dans le monde, il est constitué d'un bassin peint en noir, rempli d'eau et couvert d'une vitre transparente et inclinée par rapport à l'horizontal (figure. 8.2.1).



8.2.2. Distillateur solaire incliné à cascade

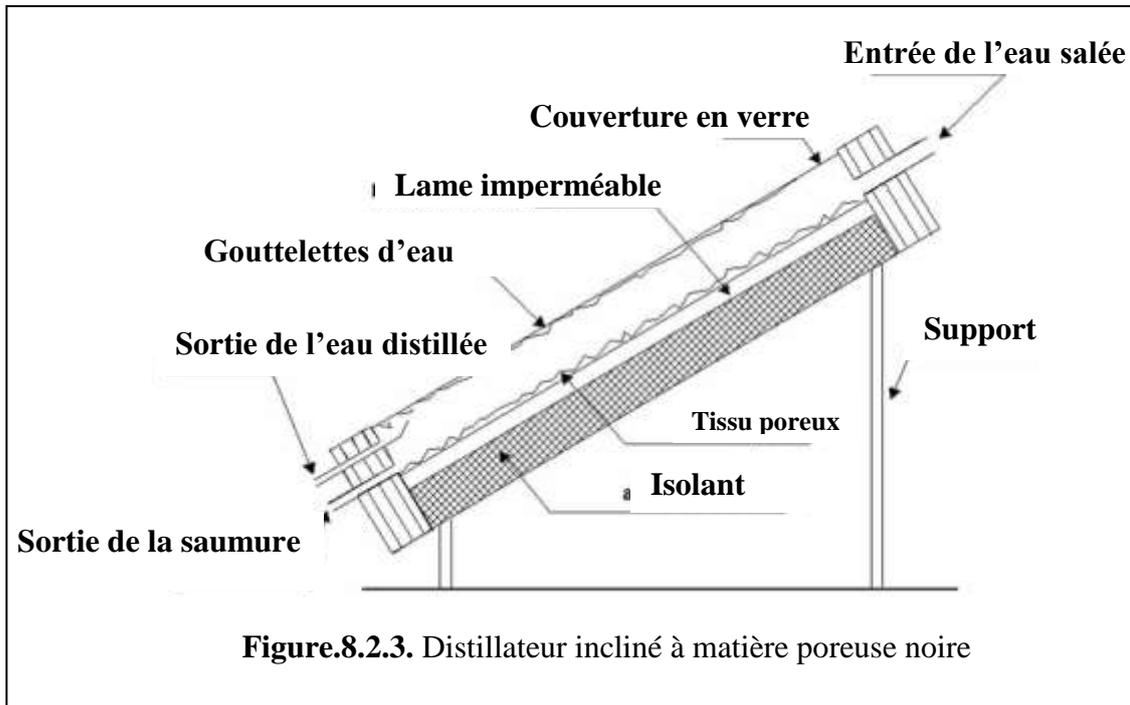
Il a été constaté que le rendement de ce type de distillateur est plus grand que celui à effet de serre durant les journées ensoleillées. Par contre, il est faible durant la nuit, ce qui nécessite un système de stockage (figure.8.2.2).



8.2.3. Distillateur incliné à matière poreuse noire

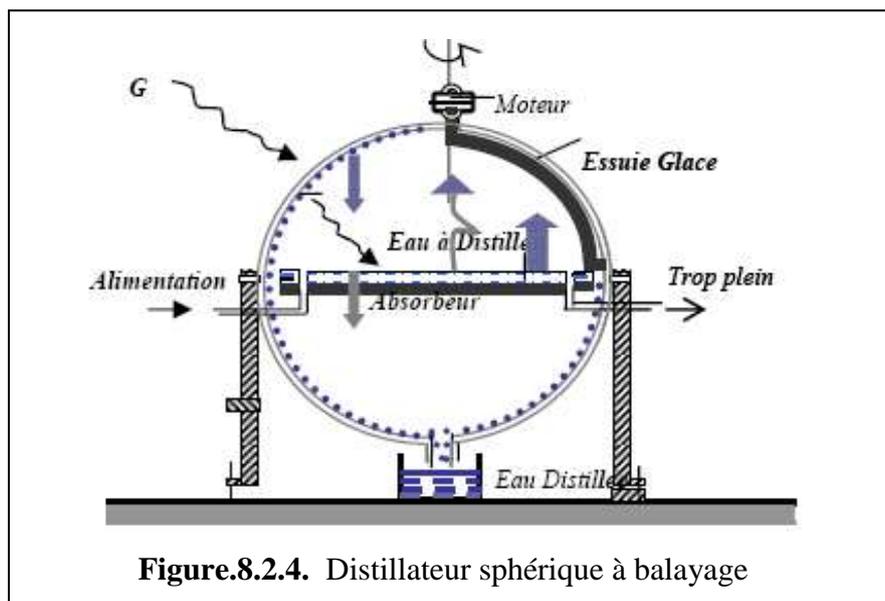
Il est appelé aussi distillateur à mèche, où l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, qui absorbe le rayonnement. La mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation, en faible quantité, présente un meilleur angle avec le soleil. Elle est également chauffée plus rapidement et à une température

élevée. Ces distillateurs sont considérés plus efficaces que ceux à bassin (figure.8.2.3).



8.2.4. Distillateur sphérique à balayage

Le distillateur à balayage est constitué d'une sphère en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposant sur des supports. La condensation s'effectue sur la demi-sphère supérieure, et le condensat est recueilli à la base de la demi-sphère inférieure. Ce type se distingue des autres par son système mécanique de récupération de l'eau distillée par un essuie glace, entraîné par un petit moteur électrique (figure.8.2.4).



9. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur solaire

Les paramètres qui influent sur le fonctionnement d'un distillateur solaire sont les paramètres de construction, les paramètres métrologiques et géographiques.

9.1. Paramètres de constructions

Ils concernent tous les éléments composant le distillateur solaire, tels que la couverture, l'absorbeur, l'isolant et la saumure dont la construction nécessite une attention particulière.

9.1.1. La couverture

La couverture sert de surface de condensation, Il faut qu'elle soit non hydrophobe, mouillable [34], et résiste aux attaques du vent et des particules solides. S. D. Gomkale [35] et Baum et Bairamov [36] ont montré que la distance entre la couverture et la saumure ne doit pas être grande pour ne pas augmenter la couche tampon qui ne participe pas au transfert thermique à l'intérieur du distillateur solaire. S. Satcunanathan et H. Phansen [37] ont constaté que cette couche influe sur la performance.

La couverture est essentiellement caractérisée par :

- Une bonne transparence au rayonnement solaire, et une opacité au rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde.
- Une inclinaison optimale qui dépend de la latitude du lieu d'implantation du distillateur solaire, selon N. Banda [38].

9.1.2. L'absorbeur

Il est appelé aussi plan noir ; il est construit généralement en métal peint en noir, et se caractérise principalement par une absorptivité aussi voisine que possible de l'unité, une bonne inertie thermique ainsi qu'une bonne résistance chimique à l'oxydation par les dépôts minéraux de la saumure. Il est recouvert d'une mince couche de peinture noire mate, et il est généralement choisit en aluminium ou en cuivre.

9.1.3. L'isolant

Afin de maintenir une conservation continue de la chaleur, un bon isolant doit être placé sur la partie arrière du distillateur. Trois types d'isolants existent : isolant minéral (laine de verre et laine de roche), isolant naturel (le liège et la laine de mouton), isolant synthétique (polystyrène expansé, polystyrène extrudé et polyuréthane) [39].

9.1.4. L'épaisseur de l'eau à distiller

L'épaisseur de la saumure est un paramètre important qui influe sur la production journalière du distillateur solaire. Pour une grande épaisseur de la saumure, la quantité

de chaleur accumulée est importante, et moins les fluctuations d'origine météorologique ont un effet sur la production du distillateur. L'inertie thermique augmente avec l'épaisseur, avec une continuité de la distillation nocturne. Par contre la production pendant 24 heures diminue. Pour évaluer la production en fonction de l'épaisseur et de la température de la saumure, deux formules empiriques ont été obtenues suite aux mesures expérimentales effectuées dans le Sahara d'Algérie qui [40].

$$Y = \frac{a}{X + b} + c = \frac{51.607}{117 - T} - 0.613 \quad (15)$$

Avec:

Y : La production

X : L'épaisseur de la saumure

a, b, c : Paramètres dépendant de la forme de l'appareil et des conditions locales.

T : La température, en degré centigrade, de la saumure.

9.1.5. Effet de la concentration en sel

Bebutov, B. M, Achilov [41] ont prouvé expérimentalement que la production du distillateur diminue lorsque la concentration en sel augmente, et le dépôt salin agit négativement sur le pouvoir absorbant de la surface noire.

9.2. Paramètres météorologiques

Les études réalisées par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus sont l'intermittence des nuages, la variation du rayonnement global incident, le vent et la température ambiante.

9.3. Paramètres géographiques

Elles concernent la latitude, la longitude et la hauteur de soleil.

10. Caractéristiques principales d'un distillateur

En fonction de plusieurs grandeurs, un distillateur solaire peut se caractériser par :

10.1. Le rendement

C'est la production du distillateur, qui représente la quantité d'eau distillée produite par m^2 de surface d'évaporation [42]. Il est donné par la relation suivante [43]:

$$\dot{m}_d = \frac{q_{evap}}{L_v} \quad (16)$$

L_v : Chaleur latente de vaporisation se calcule comme suit :

$$L_v = 4185 \times (597 - 0.56 \times T) \quad (16)'$$

10.2. L'efficacité

D'après Cooper [44], l'efficacité se traduit par :

- L'efficacité globale

Elle représente le rapport entre la quantité d'énergie évaporée par m² et la quantité d'énergie globale incidente et est calculée comme suit :

$$\eta_g = \frac{q_{evap}}{p_g} \quad (17)$$

- L'efficacité interne

Elle représente le rapport entre la quantité d'énergie évaporée par m² et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure par m² de surface incidente et est calculée comme suit :

$$\eta_i = \frac{q_{evap}}{\alpha_t \cdot p_g} \quad (18)$$

avec :

q_{evap} : Quantité de chaleur évaporée par m² et par unité de temps.

p_g : Le flux solaire global reçu par mètre carré de surface horizontale, par unité de temps.

α_t : Le coefficient d'absorption global du distillateur.

10.3. La performance

Satcunanathan et Hansen [37] ont défini deux types de facteurs de performance : Facteur de Performance Brute (F.P.B) et Facteur de Performance Horaire (F.P.H).

$$FPB = \frac{\text{quantité d'eau produite au bout de 24 heures}}{\text{quantité d'énergie entrée au bout de 24 heures}} \quad (19)$$

$$FPH = \frac{\text{quantité d'eau produite au bout d'une heures}}{\text{quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (20)$$

11. Résultats « types » obtenus avec des distillateurs à bassin simple

Afin d'obtenir de l'eau distillée, plusieurs types de distillateurs solaires sont construits et testés, où il a été prouvé que le distillateur solaire simple et à effet de serre est le plus intéressant, car il est simple et économique. Par contre, il se caractérise par un faible rendement, à cause de l'absence de production nocturne, cela est dû au faible écart de température entre la saumure et la vitre. Cet écart représente un facteur de base pour la production de l'eau douce. Tiwari, affirme que la production obtenue par le distillateur solaire simple et à effet de serre, appelé communément distillateur conventionnel dépend de la différence entre la température de l'eau et la température de la vitre, pour une plus grande efficacité d'évaporation et de condensation [45]. Suite à une étude théorique, il a également été confirmé que l'efficacité globale est proportionnelle à cet écart qui est le résultat d'une bonne évaporation et condensation.

Le phénomène de l'évaporation dans le distillateur solaire est un phénomène de surface différent de l'ébullition qui se produit dans le liquide. Le phénomène d'évaporation de l'eau s'explique par la migration des molécules situées en surface qui possèdent assez d'énergie cinétique. La chaleur latente d'évaporation est l'énergie nécessaire pour convaincre les forces d'attraction du liquide. Comme le phénomène se produit dans un environnement fermé, où la pression est différente de la pression atmosphérique l'évaporation aurait lieu jusqu'au point de saturation de la vapeur, dont la pression de saturation dépend de la température de l'eau [46]. Suite à des résultats expérimentaux trouvés par Tiwari, une relation empirique a été déduite, montrant une proportion entre la pression de saturation de la vapeur et de la température de l'eau. La pression correspondante à la température mesurée est identique à la pression atmosphérique. Cette température est le point d'ébullition, qui valide la relation empirique [45].

Le phénomène de l'évaporation est affecté par beaucoup de paramètres comme la vitesse du vent et l'humidité de l'air ambiant. Une étude qui a été faite par Ali [47] en passant un mouvement d'air à l'intérieur du distillateur par un ventilateur sur un distillateur solaire, favorise l'évaporation et augmente la production de l'eau distillée. La profondeur de l'eau influencerait aussi l'évaporation dans les distillateurs. Suneja et Tiwari [48], ont trouvé que l'évaporation diminuait avec une augmentation de la profondeur de l'eau. Ils expliquent ce phénomène par une plus grande quantité d'énergie nécessaire pour chauffer une plus grande quantité d'eau à une température nécessaire à l'évaporation des molécules de surface, car c'est le fond du bassin qui absorbe et transmet la chaleur par convection aux molécules de surface, où s'effectue l'évaporation. L'aire de la surface d'évaporation est un facteur qui affecte aussi l'évaporation de surface. Kwatra [49], a augmenté la surface disponible à l'évaporation, tout en maintenant le même volume d'eau et la même quantité de radiation solaire, ses résultats ont démontré une légère hausse de l'évaporation. Il a expliqué ces résultats par le grand nombre de molécules situées à la surface de l'eau.

La condensation est la liaison entre deux molécules de la vapeur d'eau qui circule dans le distillateur, en rencontrant la vitre qui est en principe plus froide pour former une molécule plus grosse et en se transformant en gouttelettes. L'écart de température entre la saumure et la vitre reste le principal facteur qui affecte la condensation, donc la production. Un grand écart serait le meilleur, résultant d'une vitre froide et une saumure chaude. L'écart de température est lui-même affecté par un nombre de facteurs tels que : l'inclinaison de la vitre, l'épaisseur de la saumure, etc. Améliorer la capacité d'évaporation et de la condensation était la préoccupation de plusieurs chercheurs qui ont réalisé de nombreux travaux et tests en apportant des modifications à la conception de leurs distillateurs afin d'atteindre l'objectif, où Suneja et Tiwari [48], ont essayé de

refroidir la vitre en faisant passer une faible quantité d'eau fraîche sur la face extérieure. Il a été démontré que cette idée a augmenté le taux de condensation et la quantité d'eau distillée. La vitesse du vent a aussi un effet sur la condensation. Ceci a été constaté par Cooper [50], où la production augmente de 11.5% pour une vitesse du vent égale à 12.5 m/s. P. Valsaraj [51] a présenté une étude expérimentale sur un distillateur solaire simple incliné. Pour chauffer la nappe d'eau, il a utilisé une feuille d'aluminium pliée et perforée flottant sur la surface de l'eau. L'énergie thermique gagnée par la feuille est transférée à la couche supérieure d'où les molécules d'eau s'échappent dans l'air vide, par les trous de la feuille métallique. L'étude a indiqué des taux plus élevés de l'évaporation avec une moyenne de 50% d'augmentation (figures.11.1 et 11.2).



Figure.11.1. Distillateur avec la feuille en aluminium pliée, perforée flottant sur la surface de l'eau

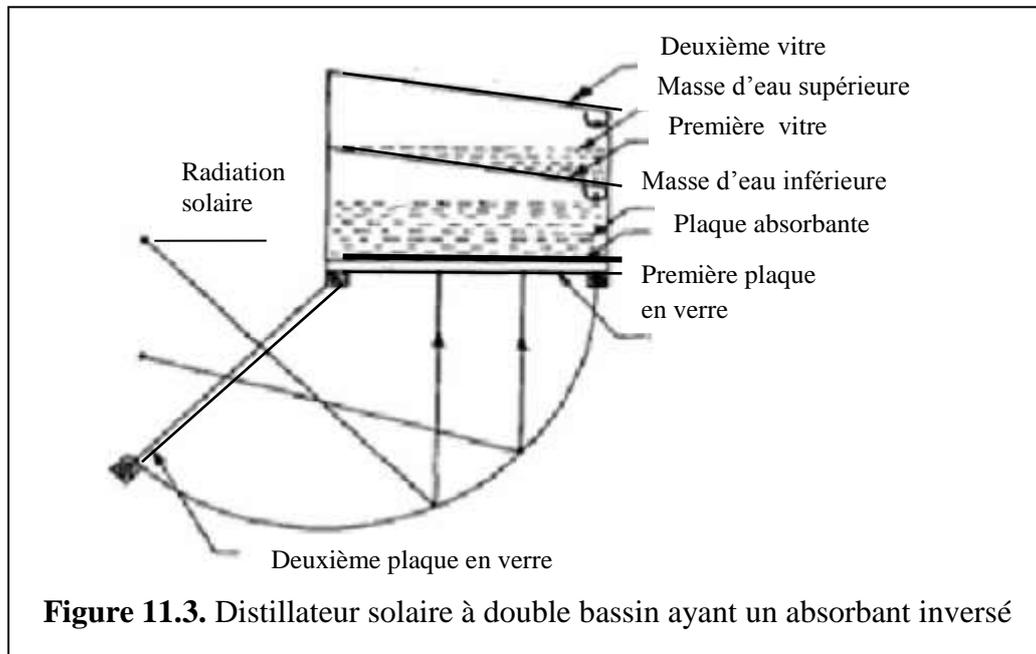


Figure.11.2. Image de la feuille en aluminium perforée

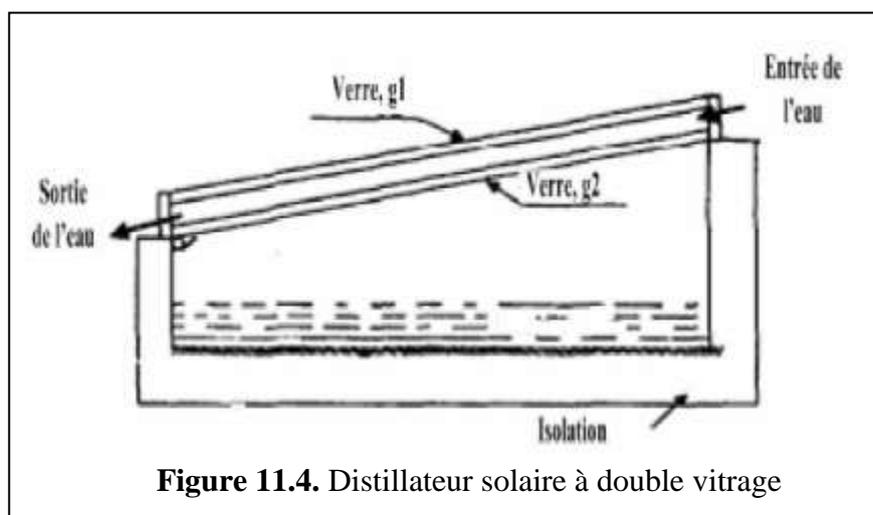
Dans le but d'augmenter la pression de vapeur saturée de l'air ambiant, plusieurs chercheurs ont essayé à concentrer une plus grande quantité d'énergie sur le bac d'eau dont, entre autres, De Paul [52], qui a ajouté un élément chauffant électrique sous le bassin. Suneja et Tiwari [53], ont construit et évalué un distillateur à absorbeur inversé, qui se compose d'un concentrateur parabolique sous l'appareil pour concentrer l'énergie solaire sur la base du bassin d'eau. Les expériences de Kumar et al [54], ont démontré qu'un angle de 15° optimiserait la condensation et la production d'eau distillée tandis qu' Akash et al [55] ont obtenu de meilleurs résultats avec un angle de 35° . Une meilleure production est obtenue en inclinant la vitre du distillateur

d'un angle égale à la latitude de lieu [56]. Une réalisation d'un distillateur solaire simple et à effet de serre avec absorbeur flottant qui peut prendre différentes positions augmente le rendement de 15 à 20% [57].

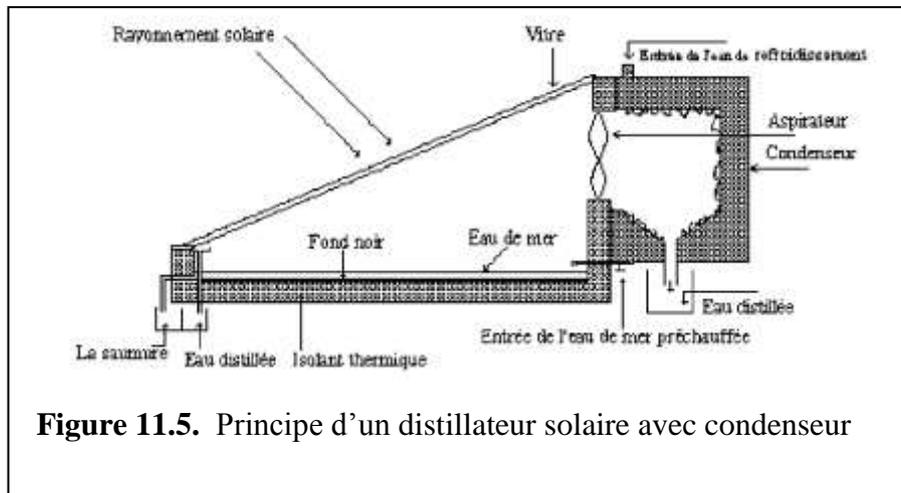
Sangeeta Suneja et al [58] ont présenté, une étude paramétrique d'un système de distillation solaire avec un absorbeur inversé à double effet qui a donné de bons résultats (figure 11.3).



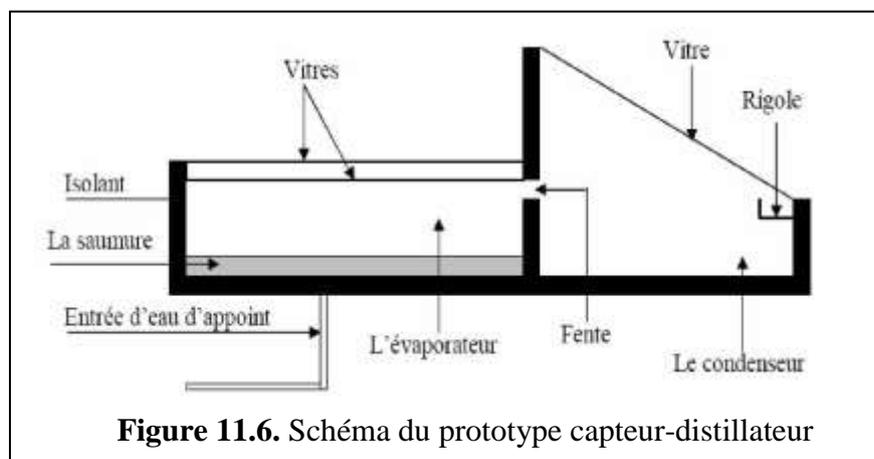
Moussa Abu-Arabie et al [59], ont présenté une étude d'un distillateur solaire conventionnel à double vitrage refroidi par une saumure froide dont le but est d'abaisser la température de la vitre, pour ainsi augmenter l'écart de température. Il en résulte une rapide évaporation (figure 11.4).



E. Zayouti et al [60] ont amélioré la condensation de la vapeur d'eau accumulée dans le distillateur par un écoulement naturel ou forcé vers un condenseur indépendant. Cette technique a intensifié la condensation et a permis d'améliorer l'efficacité (figure 11.5).



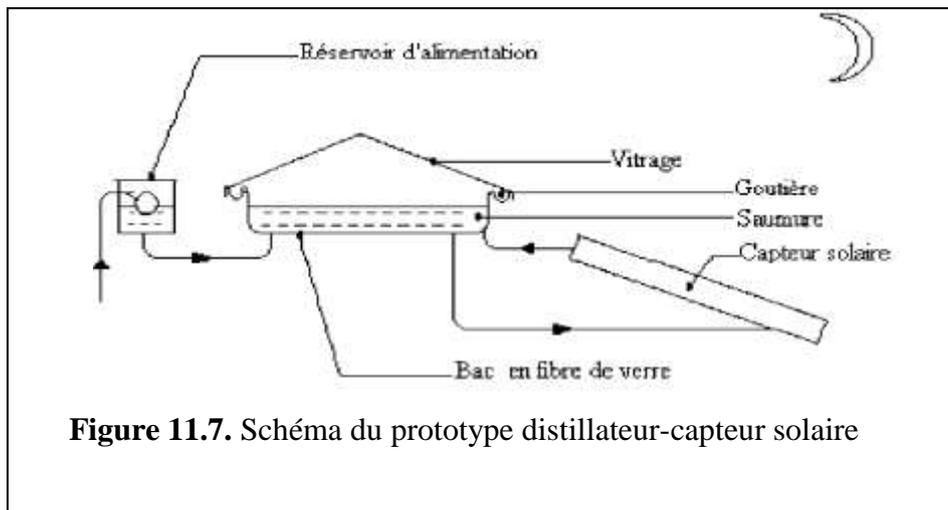
M. Benhammou et al [61] ont étudié un distillateur horizontal à double vitrage lié à un condenseur. Ce prototype est constitué de deux principaux éléments : un capteur, où se fait l'évaporation de l'eau saumâtre, et un condenseur dans lequel se condense la vapeur d'eau. Bien qu'il y ait un faible écart de température au coucher de soleil, les chercheurs ont remarqué le distillateur continue de produire de l'eau distillée (figure 11.6).



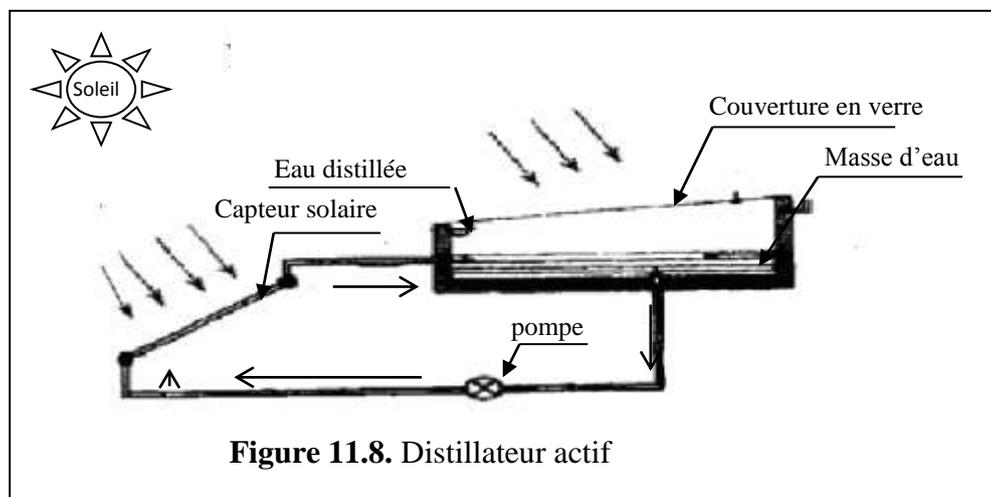
Comme le rayonnement solaire est nul durant la nuit, la température de la vitre et de la saumure baissent, ce qui est préférable pour la vitre et non pas pour la saumure, qui induit la dégradation de la production. Améliorer la production nocturne était la préoccupation de plusieurs chercheurs, où il y avait beaucoup de travaux réalisés et testés sur le distillateur couplé à un capteur solaire, avec stockage d'énergie solaire.

A. Harmim et M. Boukar [62] ont confirmé l'utilité de couplage d'un distillateur solaire type hot-box avec un capteur solaire, dont la surface de captation est séparée de la surface de condensation de la vapeur. Les résultats ont montré que la distillation

à des basses températures se produit lentement, sur une grande partie de la nuit et qui résulte d'un faible niveau de la température de l'eau saumâtre pour sa grande capacité thermique (figure 11.7).



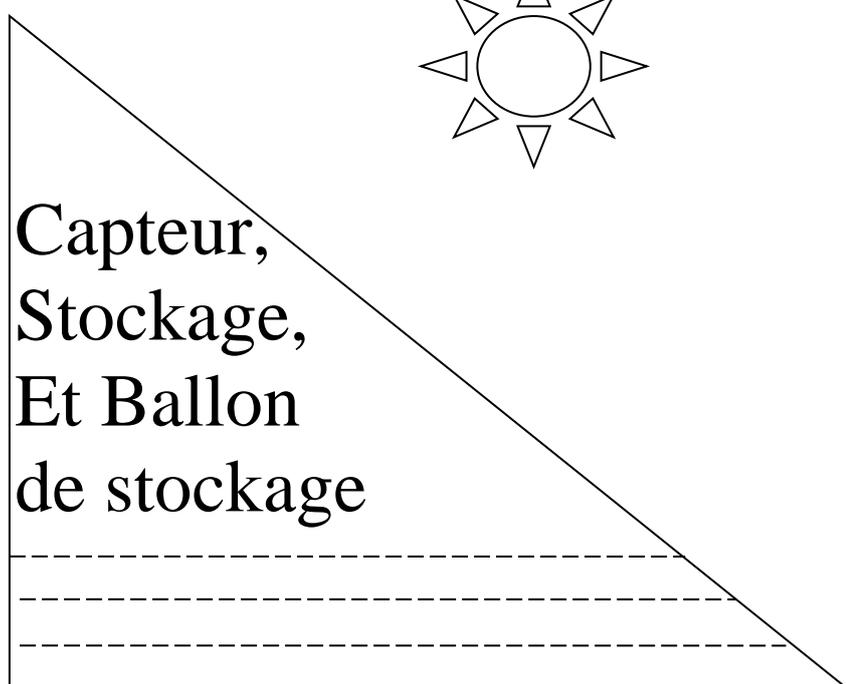
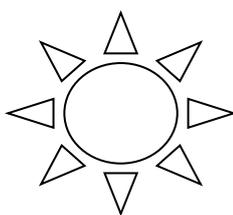
G.N. Tiwari et al [63], ont présenté une étude comparative de deux systèmes de distillation solaire passive et active, réalisée sous les mêmes conditions climatiques (intensité solaire et température ambiante), avec une inclinaison égale à la latitude. La conclusion principale est qu'il y a un effet significatif de la température sur les coefficients de transfert de chaleur internes et l'efficacité instantanée (figure 11.8).



Y. P. Yadav [64], a couplé un distillateur simple à un capteur solaire, où il a conclu que le coefficient d'évaporation varie avec la température de la saumure, et s'améliore lorsque cette dernière connaît des valeurs plus élevées.

Belessiotis et al, en 1995, ont réalisé une série d'expériences dans le but d'étudier le comportement d'un distillateur solaire. Suite aux résultats trouvés, ils ont pu élaborer une méthode mathématique, empirique basée sur les paramètres d'entrée (la température ambiante moyenne journalière, la température initiale de la saumure et le rayonnement solaire global incidents sur le distillateur solaire) et ceux de sortie (le

rendement journalier), d'où cette méthode est appelée "input-output". En 1999 cette dernière a été validée par Mathioulakis et al. La même méthode est étendue par Voropoulos et al en 1996 où ils ont accouplé un distillateur avec un réservoir de stockage et un capteur solaire. En 2001, la méthode a été validée sur une installation constituée d'un réservoir de stockage de 3.75 m³ de volume d'eau chauffée par 48 m² de surface de captation (capteur) avec 5 cm comme épaisseur de la saumure, où l'expérience a prouvé une amélioration significative du rendement, presque égal au double de celui produit par un distillateur passif, ainsi qu'une réelle production nocturne. Dans le but de valider la méthode "input-output", K. Voropoulos, E. Mathioulakis et V. Belessiotis [65], ont étudié le rendement de l'installation en fonction de l'épaisseur de la saumure, où une bonne approche des résultats avec ceux obtenus par les méthodes théoriques et expérimentales a été justifiée. Enfin, ils ont conclu que cette méthode peut être un outil précieux utilisé pour l'optimisation des installations déjà existantes afin d'améliorer leurs rendements.



Capteur,
Stockage,
Et Ballon
de stockage

Capteur et stockage de chaleur

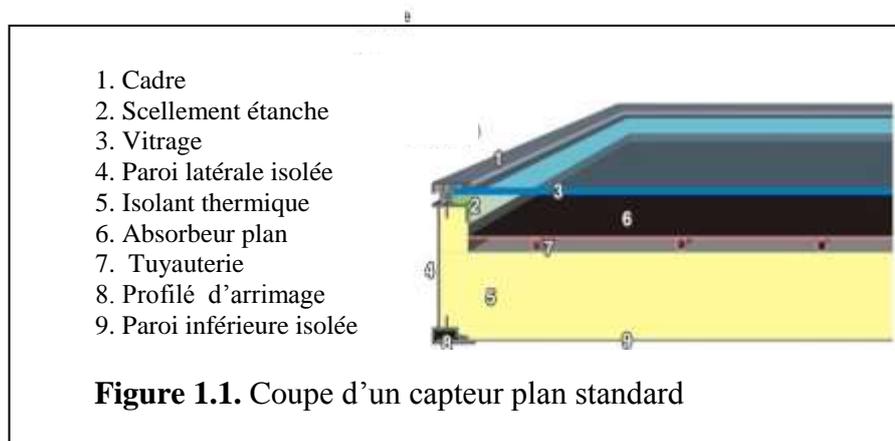
1. Capteur solaire thermique

Le capteur solaire thermique a pour fonction de transformer la plus grande quantité possible du rayonnement solaire incident en énergie thermique et de la transférer au fluide caloporteur du circuit primaire. Il existe différents types de capteurs présentant des coûts et des caractéristiques spécifiques, les plus couramment utilisés pour la production d'eau chaude sont :

- les capteurs plans standards.
- les capteurs plans non vitrés.
- les capteurs plans sous vide.
- les capteurs tubulaires sous vide.

1.1. Capteur plan sous pression atmosphérique

Simple et solide, Le capteur plan vitré sous pression atmosphérique est le capteur actuellement, le plus utilisé et le plus distribué sur le marché pour la production d'eau chaude. Ils sont proposés sous différentes tailles, allant de 1,5 à plus de 10 m², et ils pèsent en moyenne 15 à 20 kg/m². Le capteur plan comporte un absorbeur métallique plan ayant un seul tenant logé dans un bâti fourni d'origine. Le capteur est convenablement isolé thermiquement sur ses faces latérale et inférieure. La face supérieure est munie d'une couverture transparente. Deux tuyaux de raccordement sont prévus pour l'entrée et la sortie du fluide caloporteur [66] (figure 1.1).



1.2. Absorbeur

Il représente l'élément central du capteur plan, composé d'une plaque métallique, étant bonne conductrice de chaleur, elle est généralement en cuivre et pourvue d'un revêtement absorbant mince et lié intimement à la tuyauterie transportant le circuit caloporteur. Le rayonnement solaire atteignant l'absorbeur est principalement transformé en chaleur, qui est ensuite transmise par conduction au fluide caloporteur.

Le cuivre est un excellent matériau pour la plaque de l'absorbeur à cause de son excellente conductivité. Il permet également une bonne liaison avec le réseau de conduits caloporteurs par soudure cuivre-cuivre ce qui garantit un bon transfert de chaleur au fluide caloporteur.

1.3. Différentes formes de l'absorbeur

On distingue différentes formes de l'absorbeur (figure 1.3.a) :

- Absorbeurs à plaques ou à ailettes de cuivre et tuyauteries en cuivre soudées.
- Absorbeurs à plaques ou à ailettes en cuivre et tuyauteries enchâssées.
- Absorbeurs à plaques ou à ailettes en aluminium et tuyauteries de cuivre enchâssées.
- Absorbeurs à plaques d'aluminium profilées soudées.
- Absorbeurs à plaques d'acier inoxydable profilées soudées.

Les absorbeurs se distinguent également par les différentes formes de réseau de tuyauteries primaires auxquels ils sont liés (figure 1.3.b) :

- Les absorbeurs à conduites en serpentin.
- Les absorbeurs à conduites parallèles unidirectionnelles.
- Les absorbeurs à conduites parallèles aller-retour.

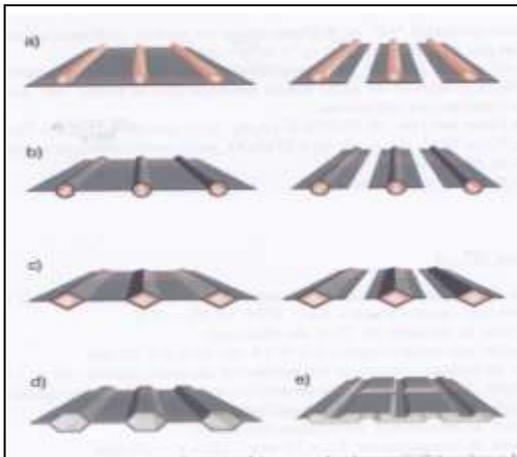


Figure 1.3.a Principaux types de réseaux de tuyauteries dans l'absorbeur

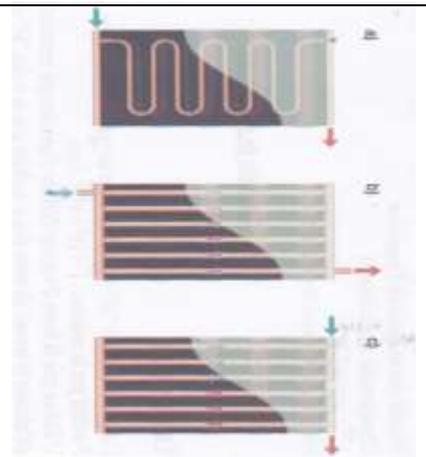
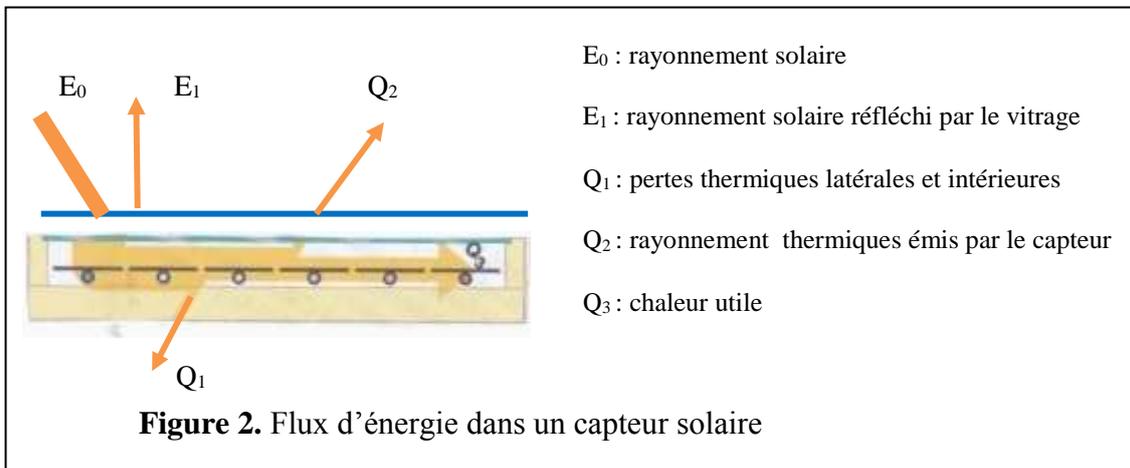


Figure 1.3.b Différentes formes d'absorbeurs

2. Fonctionnement d'un capteur plan standard

Le rayonnement solaire (E_0) atteint la couverture transparente. Une partie du rayonnement (E_1) est réfléchi par le vitrage vers l'environnement. Le rayonnement atteint ensuite la couche sélective de l'absorbeur, où une nouvelle fraction (E_2) est réfléchi vers l'extérieur du capteur. Le reste du rayonnement est transformé en chaleur au niveau de l'absorbeur. L'absorbeur transmet alors cette chaleur par conduction vers le fluide caloporteur (chaleur utile) mais aussi vers l'environnement, par rayonnement et convection (pertes). Une bonne isolation de la face postérieure et

des côtés du capteur (laine minérale ou polyuréthane sans HCFC) permet de minimiser les déperditions thermiques (Q_1). De même, la couverture transparente en face antérieure a pour but de limiter les pertes thermiques (Q_2) par rayonnement et par convection depuis l'absorbeur. Du rayonnement initial (E_0), il ne reste donc de toutes les pertes déduites (E_1 , E_2 , Q_1 , Q_2) que la chaleur utile (Q_3) (figure.2).



2.1. Rendement du capteur

Le rendement η d'un capteur solaire est le résultat du rapport de l'énergie utile au rayonnement solaire total disponible : $\eta = Q_3 / E_0$. Ce rendement est directement fonction des facteurs constructifs du capteur, en particulier des caractéristiques thermiques (Q_1 , Q_2), et optiques (E_1 , E_2), caractérisées par les coefficients de transmission optique du vitrage (τ), d'absorption (α) et d'émission de l'absorbeur (ϵ). Le rendement optique est ainsi donné par la relation suivante : $\eta_0 = \alpha \cdot \epsilon \cdot \tau$.

2.2. Déperditions thermiques

Les déperditions thermiques sont fonction de la différence de température entre l'absorbeur et l'air extérieur, du rayonnement solaire instantané et du mode de construction du capteur. Les conditions idéales, pour obtenir un bon rendement, se présentent pour une température d'entrée dans les capteurs la plus basse possible et pour un rayonnement solaire élevé. Un rendement optique « $\eta_0 > 0.8$ » est généralement la caractéristique d'un bon capteur plan.

2.3. Avantages

- Ils sont nettement moins chers que les capteurs tubulaires sous vide.
- Ils se caractérisent par une grande diversité de montages (superposé à la toiture, intégré en toiture, en façade ou isolé).
- Ils ont un bon rapport qualité / prix.
- Il existe la possibilité d'auto construction à partir de capteurs préfabriqués.

2.4. Inconvénients

- Rendement plus faible que dans les capteurs tubulaires sous vide.
- Montage seulement sur toiture plate et un dispositif d'arrimage est nécessaire (avec ancrage et / ou lestage) pour résister aux sollicitations du vent.
- Non adaptés à la production des hautes températures nécessaires à certains procédés de séchage ou d'approvisionnement en chaleur de machines de production de froid à absorption.
- Nécessité d'une plus grande surface de capteurs que pour les capteurs tubulaires sous vides.

3. Intérêt du stockage de chaleur

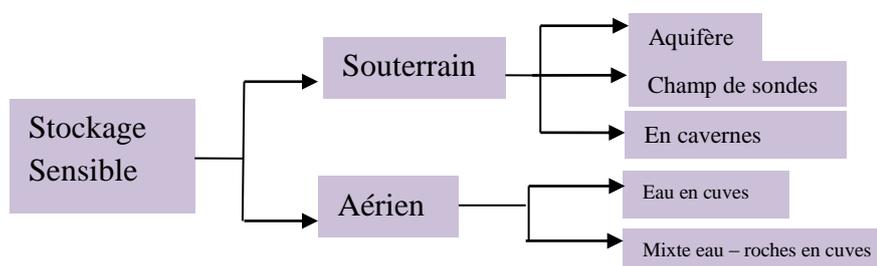
La variabilité de l'énergie solaire incidente nécessite son stockage dès qu'il faut adapter sa production à sa consommation. Par définition «stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante pour la récupérer quand c'est nécessaire. L'intérêt du stockage est donc, de différer la disponibilité de l'énergie solaire. On en distingue deux catégories :

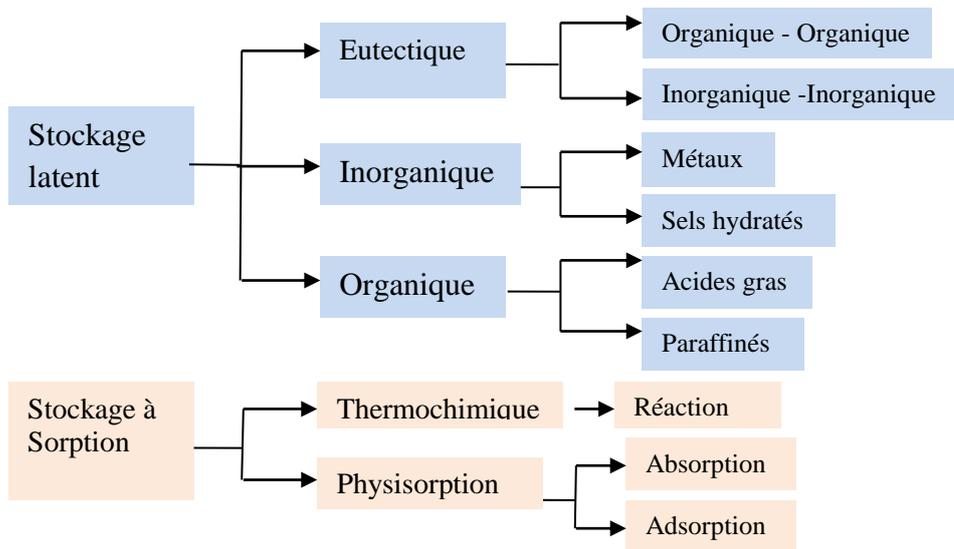
- Stockage journalier

Le stockage journalier permet de disposer de l'énergie accumulée à court terme. Cela peut être dans les minutes, dans les heures voire dans les quelques jours qui suivent le stockage.

- Stockage saisonnier

Le stockage saisonnier est le stockage à long terme qui va permettre de différer l'apport en énergie solaire de plusieurs mois. Il permet donc d'accumuler l'énergie solaire non exploitée en été pour en bénéficier durant l'hiver. La performance et la faisabilité d'un système complet de stockage, dépend de la nature du matériau de stockage, où la sélection de celui-ci dépend du coût et repose sur des principaux critères tels que la densité de stockage qui correspond à l'énergie stockée par unité de masse ou de volume, elle est considérée comme un facteur indispensable pour assurer la compacité du système de stockage. Le second critère est la tenue à un cycle qui dicte la durée de vie du système. Le dernier critère est la capacité d'autodécharge, lié directement à la stabilité chimique et mécanique du matériau. En fonction des différentes transformations du matériau de stockage et de sa densité énergétique, plusieurs méthodes de stockage de chaleur existent, récapitulées dans le schéma suivant [67]:





3.1. Stockage à chaleur sensible

Ce type de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux, il utilise une source de chaleur pour augmenter la température du matériau. L'eau stocke de l'énergie dans une gamme de température excluant le changement d'état. Son inconvénient majeur, est sa faible densité énergétique, qui implique des volumes de stockage importants dans le cas du stockage thermique saisonnier, où l'énergie peut être stockée dans des matériaux liquides ou solides comme la terre, la roche ou le sable. La chaleur sensible peut être stockée en cuve extérieure ou enterrée, dans des sondes géothermiques ou encore dans des aquifères. Des systèmes à grande échelle sont donc mis en œuvre ; il s'agit le plus souvent de stockages souterrains (UTES, *Underground Thermal Energy Storage*). Les conditions hydrogéologiques du site de construction imposent le plus souvent le choix du système, dont il existe 4 systèmes différents :

- Stockage d'eau chaude (*hot water storage*)

Le stockage d'eau chaude est constitué d'un réservoir d'eau partiellement enterré, généralement en béton armé (figures 3.1a et 3.1b) [68].

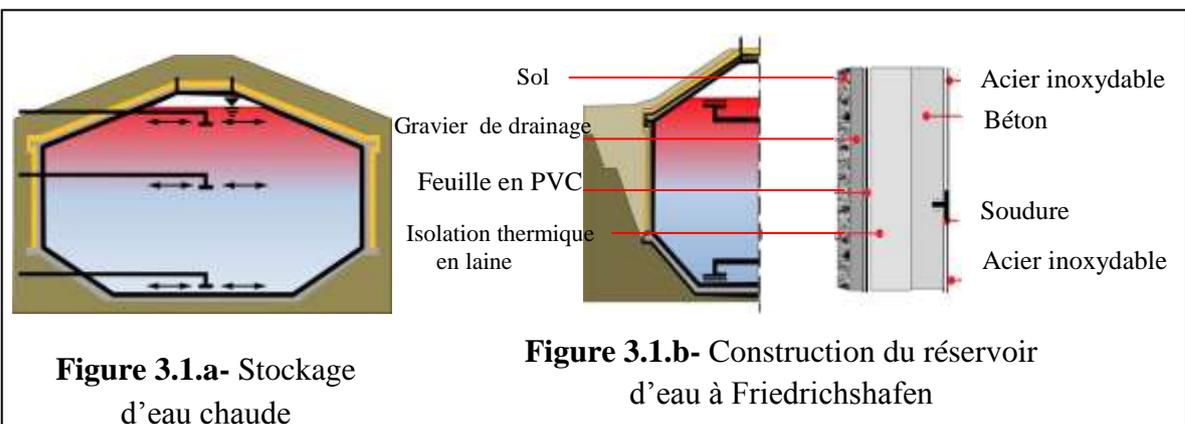
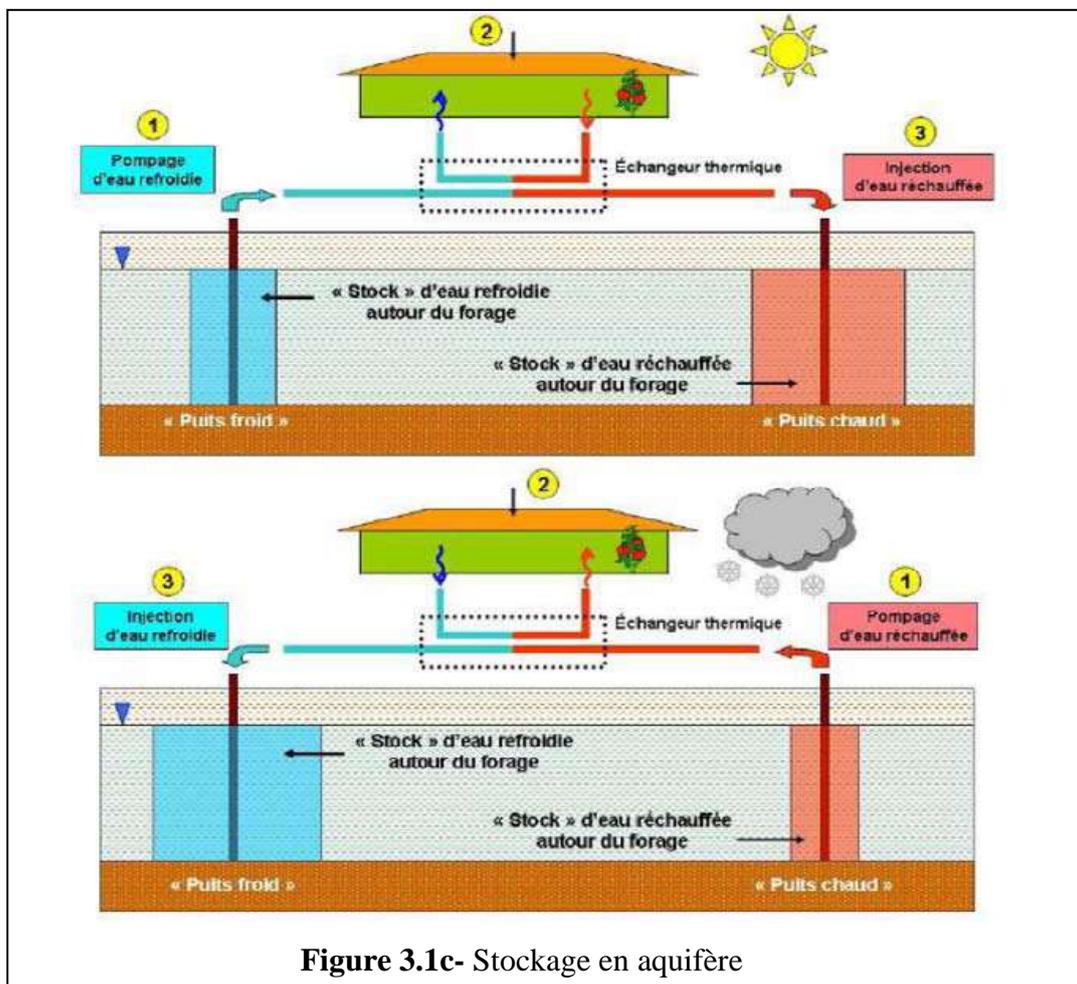


Figure 3.1.a- Stockage d'eau chaude

Figure 3.1.b- Construction du réservoir d'eau à Friedrichshafen

- Stockage en aquifère (*aquifer heat storage*)

Une meilleure exploitation hydraulique de l'aquifère repose sur le principe de la serre, capteur d'énergie qui fonctionne par la technique de doublet de forages avec réinjection, il maintient le potentiel hydraulique de l'aquifère et permet au dispositif d'être réversible, en refroidissant la serre pendant l'été par le pompage de l'eau souterraine dans un premier forage « puits froid ». Cette eau réchauffée emmagasine ainsi la chaleur piégée dans la serre, ensuite elle est réinjectée dans le même aquifère via le deuxième forage « puits chaud ». Pendant l'hiver, le système s'inverse ; l'eau est pompée au « puits chaud », réchauffe la serre en se refroidissant, et est réinjectée dans l'aquifère pour être réutilisée l'été suivant (figure 3.1.c) [69].



-Stockage gravier-eau (*gravel-water heat storage*)

Le stockage gravier-eau tente de reproduire les échanges mis en jeu dans un aquifère naturel ; le matériau de stockage est un mélange de pierres et de l'eau. La chaleur est stockée / extraite par échange direct avec l'eau ou via un réseau de tuyaux en plastique insérés dans différentes couches du milieu de stockage. En raison d'une capacité thermique plus faible que l'eau, ce type de stockage requiert en moyenne un

volume de 50% plus important qu'un système de stockage d'eau chaude pour obtenir la même capacité de stockage (figure 3.1d).

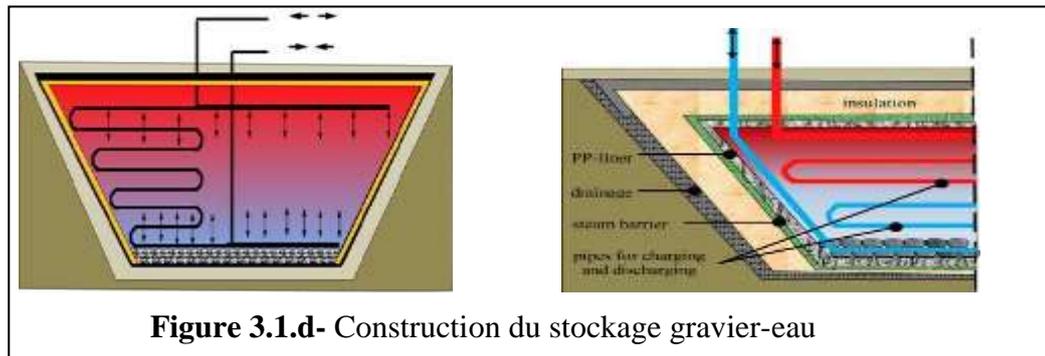


Figure 3.1.d- Construction du stockage gravier-eau

- **Stockage en puits** (*duct heat storage*) (figure 3.1.e)

Le stockage en puits nécessite un sol constitué de roche ou saturé en eau. Dans ce type d'installation, la chaleur est directement stockée dans le sol. L'échangeur de chaleur est inclus dans un puits de forage (*borehole*) à une profondeur pouvant atteindre 100 m. En phase de charge, le flux de chaleur est dirigé du centre vers les bords du système, il est de sens inverse en période de décharge. A capacités de stockage égales, ce type de stockage nécessite un volume de 3 à 5 fois plus important qu'un stockage d'eau chaude.

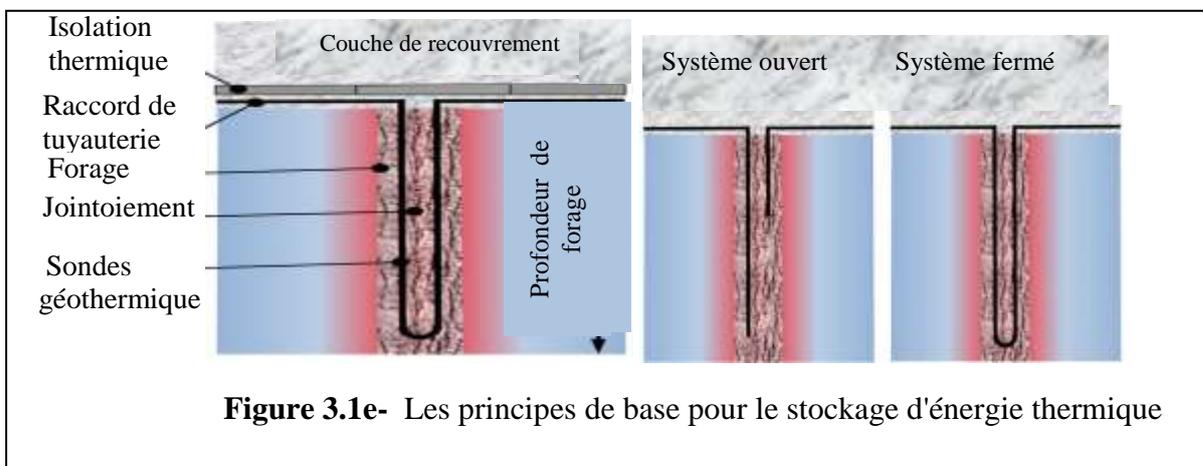


Figure 3.1.e- Les principes de base pour le stockage d'énergie thermique

- **Matériaux de stockage par chaleur sensible**

Les matériaux de stockage par chaleur sensible les plus courants sont l'eau, le béton, la roche et la terre. Les principales caractéristiques de ces matériaux sont regroupées dans le tableau 13. 1[70].

Matériaux	Eau (1bar)	Roche compacte	Gravier	Argile	Béton
Capacité thermique (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)	4171	800	1840	880	1130
Masse volumique (kg.m ⁻³)	988	2600	2000	1500	2400

Densité de stockage volumique (kWh.K ⁻¹ .m ⁻³)		0.58	1.02	0.36	0.75
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ¹)	0.64	2.5	0.52	1.28	2.3
Gamme de température (°C)	0-100	illimitée	Illimitée	illimitée	0-130

Tableau 3.1- Caractéristiques de quelques matériaux de stockage par chaleur sensible

3.2. Stockage par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime ainsi :

$$Q_{latent} = m.l \quad (21)$$

avec m (kg), qui est la masse du matériau de stockage et l (J.kg⁻¹) la chaleur massique de changement d'état du matériau. Les matériaux utilisés sont appelés Matériaux à Changement de Phase « MCP ». Ces matériaux changent de phase à une température précise, ou dans une plage de température déterminée (cas des mélanges non eutectiques). Il existe trois groupes de matériaux à changement de phase : les inorganiques, les organiques et les eutectiques [71].

- Les MCP inorganiques

En fonction de la température de fusion (tableau), les MCP inorganiques se différencient, Ils sont en général facilement disponibles à un coût d'investissement abordable, et présentant des avantages et des inconvénients. Les plus utilisés sont : l'eau, les solutions aqueuses de sel, les mélanges de sels, les mélanges de métaux et les sels hydratés [72].

- Avantages

- Une chaleur latente importante (enthalpie de changement de phase élevée).
- Une grande conductivité thermique
- Une fusion nette grâce à une plage de fusion étroite.
- Non inflammables.

- Inconvénients

- Problème de ségrégation de phases
- Problème de la corrosion et de la surfusion
- L'utilisation nécessaire d'agent de nucléation.
- Sous refroidissement
- Manque de stabilité thermique

- Les MCP Organiques

Les MCP organiques, ont une plage de température comprise entre 0 et 150 °C. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Comme les paraffines, les acides gras et les mélanges organiques, ils ont des avantages majeurs par contre, ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques [72].

- Avantages

- Disponibles dans une large gamme de température.
- Compatibles avec les matériaux conventionnels de construction (absence de corrosion).
- Stables chimiquement, ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation.
- Recyclables et non réactifs la plus part du temps.

- Inconvénients

- Une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide.
- Une chaleur latente de fusion plus faible (faible enthalpie de changement de phase).
- Inflammables.

- Matériaux de stockage par chaleur latente

Les matériaux organiques et inorganiques les plus utilisés sont illustrés ci-dessous (tableau 3.2).

Matériaux	T _{fusion} (°C)	L _f (kJ/kg)
Composés Organiques		
Acide formique	8.3	247
Acide acétique	13.7	194
Phénol	40.8	120
Acide dodécanoïque	41-43	211.6
Acétate trihydrate de sodium	55-58	242.85
Hydroxyde de Sodium	64.3	272.15
Composés Inorganiques		
H ₂ O (Eau)	0	330
H ₂ SO ₄ (Acide Sulfurique)	10.4	100
SO ₃ (Trioxyde de soufre)	16.9	108
H ₃ PO ₄ (Acide Phosphorique)	26	147
Ga (Gallium)	29.8	80

Tableau 3. 2- Température de fusion et chaleur latente de quelques MCP inorganiques et organiques [73]

- Les MCP Eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, des MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-

inorganique). Leurs principaux avantages et inconvénients sont cités comme suit [74]:

- Avantages

- Le point de fusion similaire à une substance pure.
- Les chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celles des composés organiques purs.

- Inconvénients

- peu utilisés au niveau des systèmes industriels.
- peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux.

D'après Atul et al. [75] ainsi que Kherrouf et al. [76], il existe quatre types de transformations :

- solide-solide (peu utilisé pour le stockage d'énergie), ce changement de phase se traduit par une transformation structurelle.
- liquide-gaz : grande chaleur de transformation mais associée à un changement de volume conséquent donc peu utilisé.
- liquide-solide : faible volume associé à une petite plage de températures et grande capacité de stockage donc le plus utilisé.
- solide-gaz : généralement développé dans le cas des systèmes d'air conditionné et de réfrigération, le stockage de chaleur d'origine solaire [77], et le refroidissement de l'air.

3.3. Stockage thermochimique

Le stockage par voie thermochimique est le plus innovant. Les fortes densités énergétiques (500 kWh m⁻³), les températures de stockage comprises entre 25 et 1200 °C et les durées de stockage théoriquement illimitées en font un procédé très attractif. La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions pour stocker l'énergie [78]. Les réactions chimiques envisagées sont de la forme suivante :



Lors de la charge, l'énergie thermique permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (A+B) sont ensuite séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (A + B) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur et régénérer le produit initial (A). Ce phénomène exothermique correspond à la décharge. Les matériaux associés à ce type de stockage sont primordiaux car l'efficacité des systèmes en dépend. Ils peuvent être séparés en trois catégories, explicitées dans le (tableau 3.3) :

Adsorbants organiques	Adsorbants minéraux	Autres adsorbants
Charbons actifs	Gels de silice	Polymères synthétiques
Tamis moléculaires carbonés	Alumines activées	Heatsorp
Nanomatériaux carbonés	Zéolithes	Sulfure de Sodium

Fullerènes et Hétéro-fullerènes	Ettringite	Matériaux nano-poreux hybrides
Micro-perles de mésocarbone	Oxydes de métal	

Tableau 3.3- Matériaux Adsorbants [79]

3.4. Stockage à sorption

La sorption (désorption) est un processus de fixation (libération) d'un gaz, désigné « le sorbat » par un solide ou un liquide, appelé « le sorbant ». Il existe deux grandes familles de sorption, différenciées par les types de sorptions mises en jeu. Les phénomènes d'absorption et d'adsorption mettent en jeu des forces de liaisons physiques, de type Van der Waal. L'adsorption correspondant à des transformations où les molécules du sorbat adhèrent à la surface du sorbant, alors que dans le cas de l'absorption, celles-ci s'incorporent dans la totalité du volume du sorbant. La deuxième famille de sorption est constituée par les réactions chimiques, qui mettent en jeu des forces de liaisons chimiques, de type liaisons covalentes.

- Stockage chimique

Le stockage d'énergie par réactions chimiques est un procédé lors duquel les molécules d'adsorbat sont fixées par liaison covalente à la surface de l'adsorbant provoquant l'irréversibilité du mécanisme [80,81]. Ce type de stockage consiste par exemple à utiliser l'énergie solaire pour initier une réaction chimique endothermique. La chaleur est stockée au sein du système et peut être restituée souvent à l'aide d'un catalyseur.

- Classification des systèmes à adsorption

Parmi les systèmes à adsorption, deux types de configurations sont possibles ; si l'adsorbat est prélevé et libéré dans l'environnement, le système est dit ouvert. Fermé si le fluide adsorbé circule en circuit fermé.

- Système ouvert

Dans un système ouvert en phase de décharge, le matériau de stockage adsorbe la vapeur d'eau contenue dans l'air humide et libère la chaleur d'adsorption. La vapeur d'eau est libérée pendant la phase de désorption, qui s'accompagne d'une production de chaleur s'il y a condensation. L'eau est directement libérée dans l'environnement. Duquesne [82] a effectué donc un travail vers un système d'adsorption fermé sur des zéolithes.

- Systèmes fermés

Les systèmes fermés ne mettent en jeu aucun échange de matière avec l'environnement. En mode de décharge, un système fermé se comporte comme une pompe à chaleur, c'est à dire que la chaleur utile produite provient à la fois du milieu de stockage et de l'air ambiant ou d'une source de chaleur auxiliaire. Les échanges de matières y sont plus aisés à contrôler [83]. Le principe des systèmes à adsorption ouverts et fermés est illustré dans la (figure 3. 4).

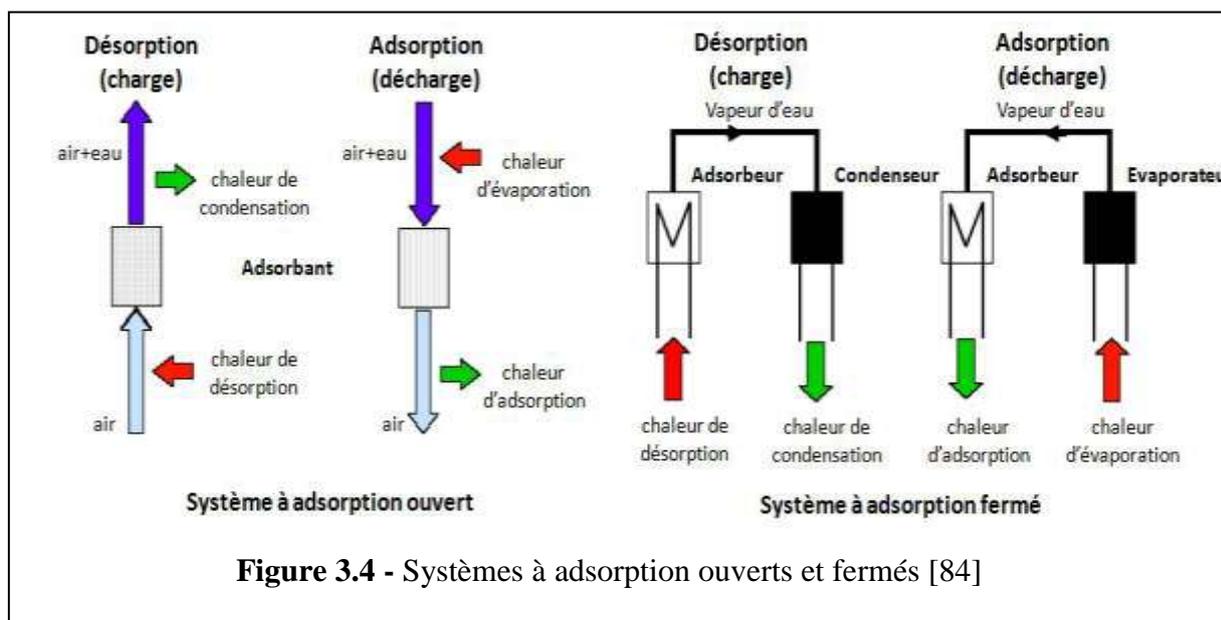


Figure 3.4 - Systèmes à adsorption ouverts et fermés [84]

Un prototype faisant appel à ce type de réactions a été réalisé par Hongois [83]. les travaux dans cette thèse ont permis d’identifier des réactions chimiques adaptées à ce type de stockage, dont certains exemples sont mentionnés dans le tableau 3. 4 :

Matériaux	Réactions de dissociation	Densité énergétique (GJ/m3)	Température de réaction (°C)
Sulfate de Magnésium	$MgSO4.7H2O = MgSO4(s) + 7H2O$	2.8	122
Oxyde de silicium	$SiO2 = Si + O2$	37.9	4065
Carbonate de fer	$FeCO3 = FeO + CO2$	2.6	180
Sulfate de Calcium	$CaSO4.2H2O = CaSO4 + 2H2O$	1.4	89

Tableau 3. 4 Matériaux adaptés au stockage chimique [85]

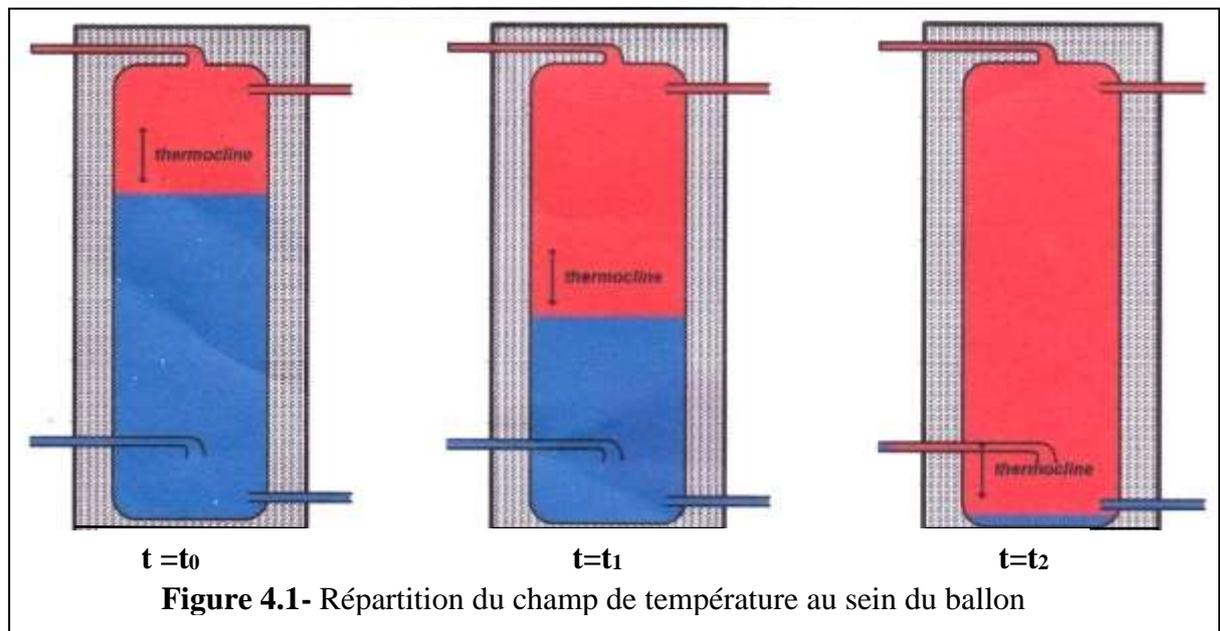
4. Ballon de stockage

Les différentes catégories de stockage thermique décrites ci-dessus, sont basées sur la chaleur sensible, la chaleur latente, et les réactions thermochimiques. Comme ces deux derniers principes ne sont pas encore largement employés, et qu’il faudrait faire face aux problèmes du réchauffement climatique, seul le stockage par chaleur sensible dans les ballons d’eau s’affiche comme la solution technologique la plus séduisante. Le ballon solaire est l’élément clef d’une installation solaire puisqu’il permet de faire le lien entre l’intermittence de la ressource et l’utilisation de l’eau chaude, mais il représente le point faible de l’installation [86], ou il a été montré que les volumes du ballon d’eau surdimensionnés nécessitent une chaleur d’appoint. La performance de l’installation solaire, est en effet influencée par la répartition du champ de température au sein du ballon, où un bon fonctionnement est assuré par un volume d’eau chaude en partie supérieure du ballon pour limiter la mise en marche de l’appoint, et un

volume d'eau froide en bas du ballon pour optimiser le rendement des capteurs [87]. Ce phénomène est connu sous le nom de stratification.

4.1. Principe de la stratification

La densité de l'eau varie avec sa température, de manière simplifiée, plus l'eau est froide, plus elle est dense. Grâce à cette propriété, des eaux chaudes et froides qui cohabitent dans un ballon d'eau chaude ont tendance à rester séparées en couches, donc en strate dont le nom de stratification, les eaux chaudes au dessus, les eaux froides dessous. Ces dernières restent au fond, puis viennent les eaux les plus tièdes au milieu. La stratification est un phénomène stable, dû aux échanges thermiques faibles entre couches de températures différentes, car l'eau étant plutôt isolante. Donc l'existence de la stratification désigne la formation au moins d'une thermocline qui sépare une zone chaude d'une autre froide de températures toutes deux uniformes (figure4.1).



4.2. Phénomènes influençant la stratification

Le ballon solaire stratifié a été le sujet de nombreuses études théoriques et expérimentales depuis le début des années 70. Brumeleve [88], en 1974, a confirmé la faisabilité d'utiliser une thermocline naturelle pour maintenir la séparation entre l'eau chaude et l'eau froide dans le ballon. Le ballon stratifié augmente les performances des installations, cette augmentation varie d'un auteur à un autre comme suit : 10% [89], (5-15%) [90], (5-20%) [91], et (11-18,5%) [92]. Deux différents modes d'écoulement existent dans le ballon de stockage, un mode dynamique et un mode statique.

4.2.1. Le mode dynamique

Le mode dynamique est le phénomène d'écoulement dû aux charges et décharges du ballon.

Le stockage de chaleur à une seule thermocline correspond à une charge de température constante, où la charge du ballon déplace la zone chaude vers le bas, ce processus est inversé pour la décharge où l'eau chaude est soutirée par le haut du ballon et remplacée par l'eau froide entrante par le bas du ballon. La thermocline se déplace alors vers le haut du ballon. Plusieurs thermoclines à niveau et températures différentes ont lieu dans le ballon stratifié dans le cas d'une charge à températures variables.

Les charges et décharges peuvent être directes ou indirectes dans cas d'un échangeur de chaleur, ce dernier mode risque de brasser l'eau, donc l'injection directe au bon niveau de température reste le bon moyen de stratifier le ballon solaire.

Le brassage dans le ballon de stockage représente la principale cause de la dégradation de l'énergie stockée, et cela dû à l'entrée d'eau chaude dans un ballon refroidi (cas d'une charge directe) ou à l'arrivée d'eau froide dans le bas d'un ballon initialement chaud (cas de la décharge du ballon).

Une stratification idéale sera modélisée par une épaisseur de thermocline nulle, avec une zone chaude et une zone froide de températures toutes deux uniformes. En mode dynamique l'expérience a bien montré la relation entre la stratification et le nombre de Richardson « Ri » voir annexe. Où un grand nombre de Richardson confirme la stratification du ballon, ce dernier est brassé pour un petit nombre.

$Ri = 0,244$ en dessous de cette valeur aucune stratification n'existant [93].

$Ri < 3,6$ la stratification thermique est fortement influencée par la géométrie d'entrée [94]. L'effet de cette dernière est négligeable pour $Ri > 10$ [95].

Suite à une étude d'un ballon stratifié en deux couches, qui a été faite par Van Berkeel et al [96] où ils ont conclu que le brassage est insignifiant pour des valeurs comprise entre 10 et 20.

Pour des valeurs de (Prandtl = 5,4 et Reynolds = 200) Yee et Lai [97] ont étudié l'effet de la poussé thermique de l'eau, dont le résultat obtenu est le suivant :

$Ri = 0,01$: la force inertielle domine, et le brassage par l'entraînement du jet n'implique aucune stratification.

$Ri = 1$: la convection forcée et naturelle sont en concurrence.

$Ri = 100$: la stratification devient plus évidente lors du processus de charge.

Il a également été montré que le nombre de Richardson est influencé par la différence entre la température d'entrée et la température du ballon au niveau de l'entrée [98].

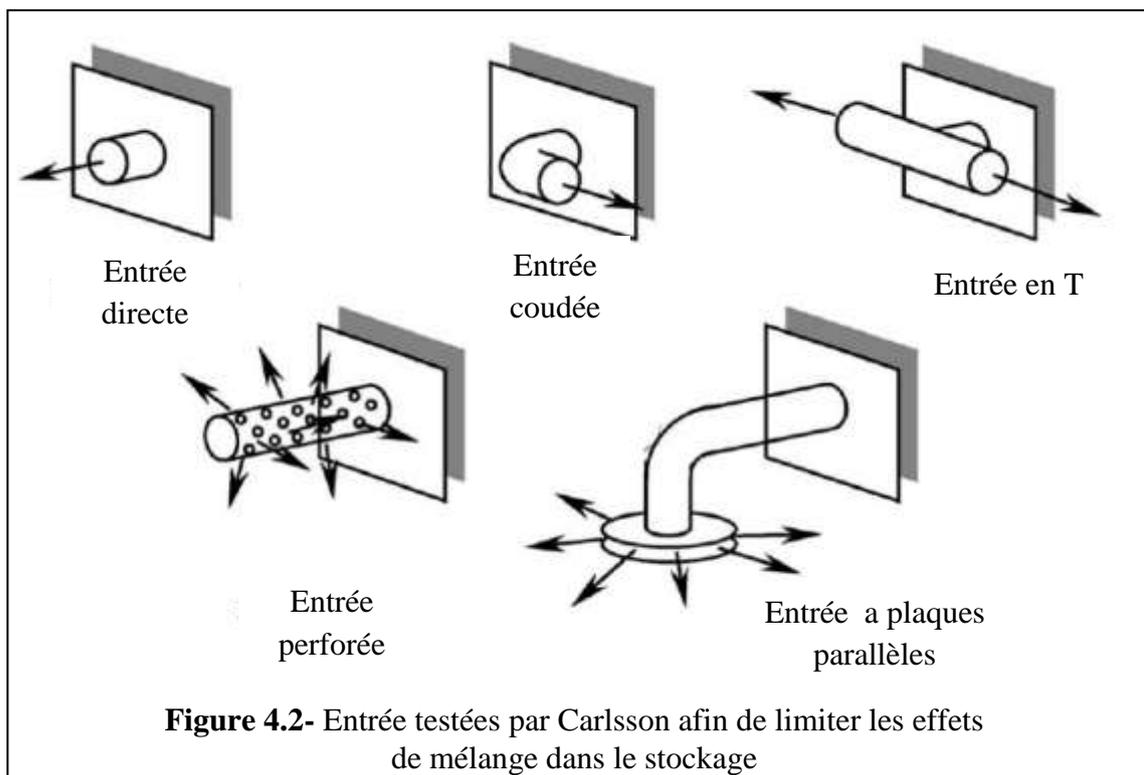
Une étude expérimentale a confirmé que l'augmentation de cette différence induit une séparation plus nette du fluide [99].

La stratification est également influencée par le débit de charge en fonction du nombre de Richardson, où l'augmentation du débit diminue la durée des transferts, et donc le ballon est performant pour des nombre de Richardson élevés, par contre pour de faible valeurs, le brassage est intensifié au sein du ballon, donc l'efficacité de charge diminue.

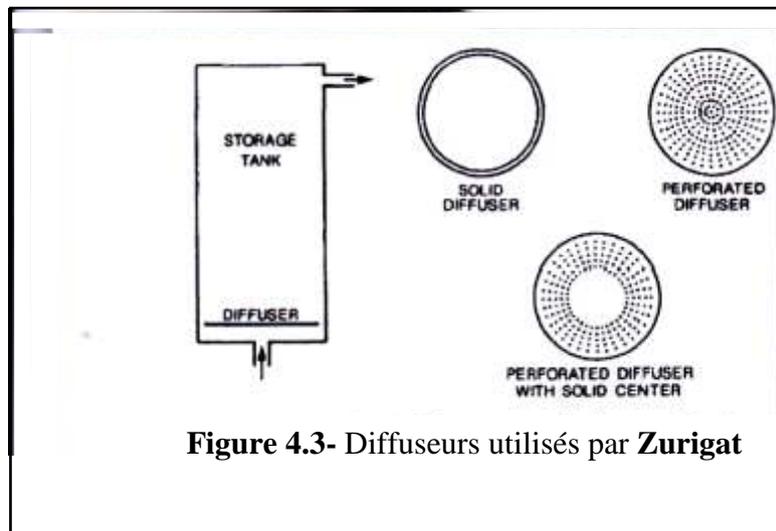
L'augmentation du nombre de Fourier et de Peclet augmentera considérablement plus l'efficacité de charge que dans le cas d'un grand nombre de Richardson [98].

Safi [100] a confirmé la prédominance du nombre de Richardson par rapport au nombre de Peclet et du nombre de Reynolds, et que l'effet du nombre de Fourier est relativement faible. A cet effet et parmi les paramètres influençant le nombre de Richardson et la stratification au sein du ballon est la géométrie de l'entrée [101] pour Ri inférieur à 3,6 alors que son effet est négligeable si Ri est supérieur à 10 [102]. Enfin si $10 < Ri < 20$, le brassage entre les couche est insignifiant [103].

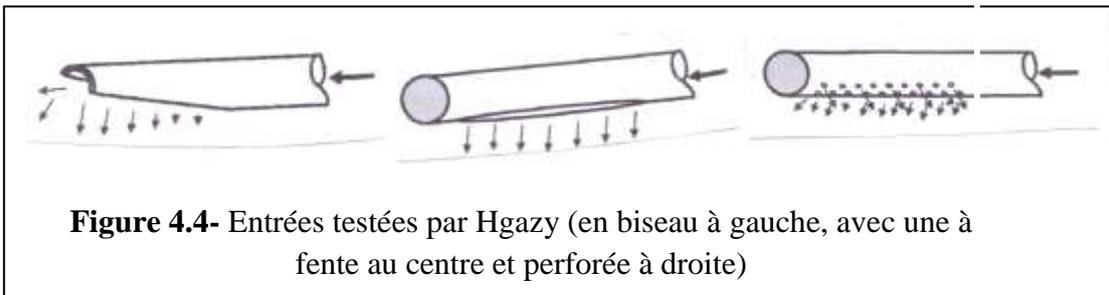
Afin d'éviter l'effet de brassage crée par le jet Col et Bellinger [91] testent cinq géométrie d'entrée différentes, ils ont conclu, que les injecteurs à plaques radiales parallèle sont les plus efficaces, ce qui a été confirmé par Carlsson [104]. Ils ont également défini une meilleure entrée pour le stockage de chaleur avec thermocline, en introduisant horizontalement le flux vers le haut ou le bas du ballon avec une vitesse minimum. Ils ont ainsi recommandé une limitation du flux au sein du ballon à un seul remplissage (figure 4.2).



Pour de faibles nombres de Richardson, le brassage à l'entrée est dominant. Trois diffuseurs radiaux de différentes géométries sont testés par Zurigat et al [94]. Il s'agit d'un diffuseur radial à disque solide, à disque perforé, et à disque perforé solide au centre, ce dernier a confirmé son importance en donnant une thermocline la plus fine (figure 4.3)



D'autres entrées sont aussi étudiées par Hegazy [105]. Trois types de tuyaux d'entrée sont testés (biseauté, perforé et avec une fente. Les meilleures performances ont été obtenues pour une entrée avec un tuyau horizontal disposant d'une fente orientée vers le bas du ballon (figure 4.4)



La plupart des travaux expérimentaux réalisés pour le stockage de chaleur à thermocline, les températures d'entrées étant constantes, par contre sont différentes pour les systèmes à énergie solaire, où les études ont montré que ces derniers ont une particulière caractéristique qui n'est qu'un dispositif spécial qui guide le courant d'entré pour qu'il sorte au niveau de température correspondante à l'intérieur du ballon. Ce dispositif appelé communément « canne de stratification » peut être : un manifold rigide ou flexible [90], des tuyaux flexibles [106], des déflecteurs rigides [89] et des distributeurs rigides perforés [107]. Des tests sur des manifolds rigides poreux, menés avec une température variable ont montré de meilleures performances que les entrées fixes traditionnelles, résultats confirmés par Davidson et al [108]. Puisque l'utilisation des manifolds rigides est limitée par les conditions de flux pour

les quelles il est conçu, Davidson et Adams [109] ont suggéré l'utilisation d'un manifold en tissu qui maintien la stratification 4% plus efficace que le manifold rigide poreux et 48% plus efficace qu'une entrée par tube classique (figure 4.5).

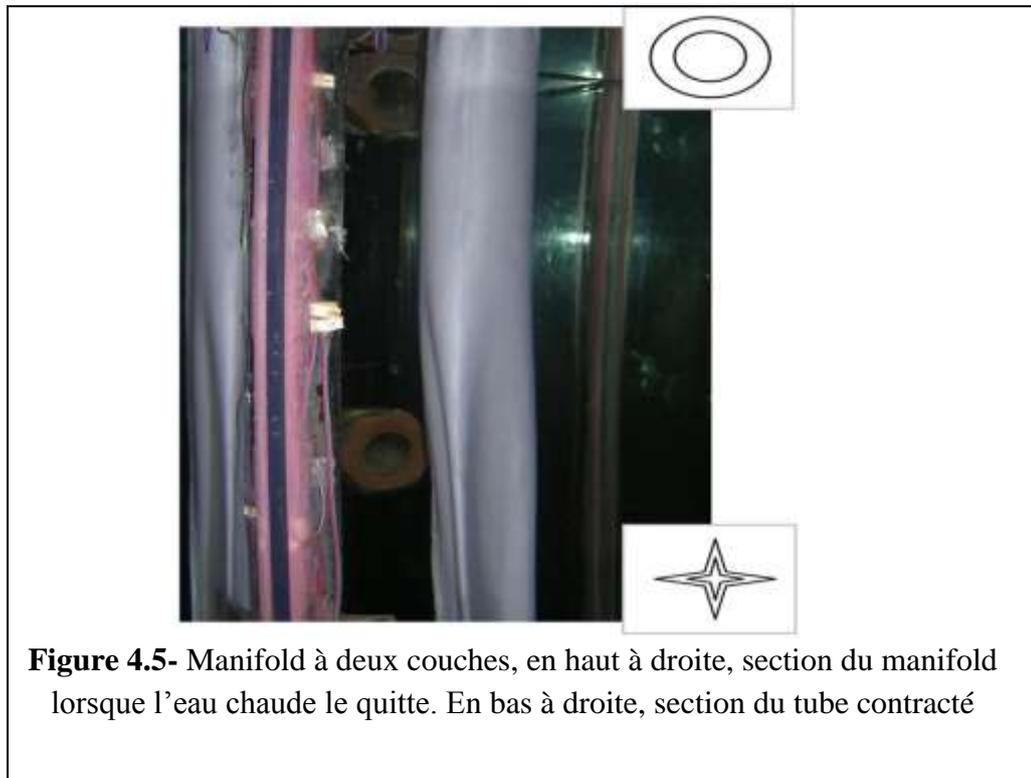


Figure 4.5- Manifold à deux couches, en haut à droite, section du manifold lorsque l'eau chaude le quitte. En bas à droite, section du tube contracté

Que ce soit pour le mode statique ou dynamique, outre le nombre de Richardson, les différentes géométries et la localisation de l'entrée, une bonne stratification est influencée par le rapport d'aspect (H/D), hauteur et diamètre du ballon de stockage, en effet, le maintien de la thermocline et pour un même volume de stockage est assuré par une section moins importante du ballon. Dans ce cas, pour une même épaisseur de thermocline, un ballon de grand rapport de forme utilise un volume de fluide moins important pour cette région de transition entre les parties chaudes et froides. Néanmoins et physiquement il doit y avoir une limite pour diminuer les pertes thermiques importantes vers l'ambiance environnante, ceci augmente automatiquement le coût de l'isolation. Dans le but d'obtenir un haut degré de stratification sans pertes thermiques excessives, Cole et Bellinger [91] ont recommandé un rapport de forme de 4.

En ne tenant pas compte du coût de l'isolation, un rapport de 10 est conseillé par Abdoly et Rapp [110]. Nelson et al [111], ont trouvé dans leurs expériences avec des ballons de rapport d'aspect de 2 à 3,5 qu'une valeur supérieure à 3 n'augmente pas les performances.

Des études analytiques ont montré l'obtention d'une petite augmentation de la stratification pour des rapports d'aspect supérieur à 3,3 [112], et à 4 [113,114].

Lavan et Thomson [99] ont trouvé qu'un rapport de forme entre 3 et 4 constitue un bon compromis entre performance et coût.

4.2.2. Le mode statique

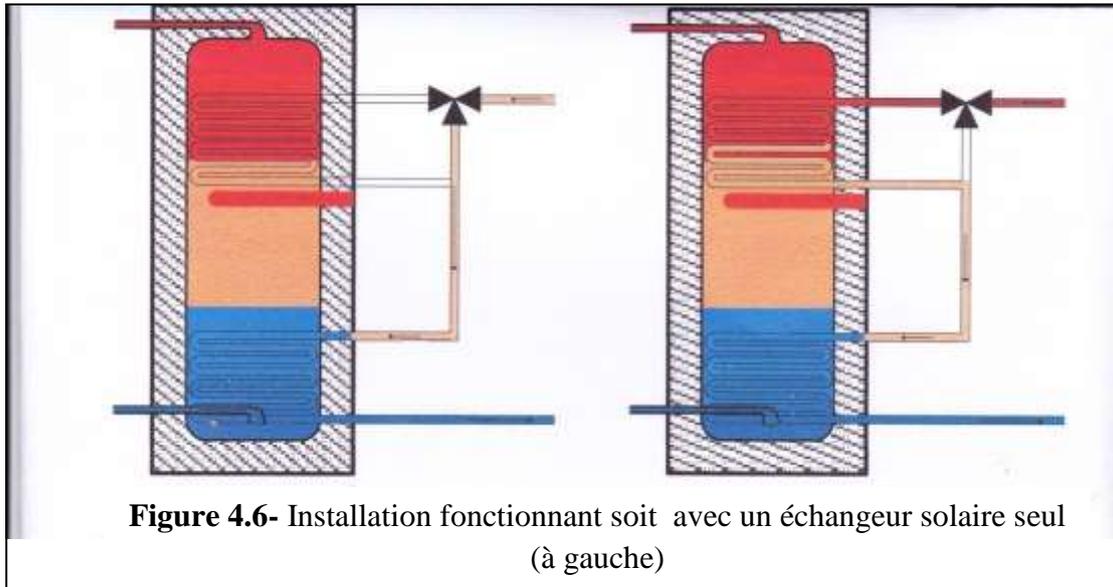
En mode statique, la conduction thermique des parois est considérée comme un des principaux facteurs de la dégradation de la stratification. Si les parois sont fortement conductrices, leurs températures sont modifiées par le transfert de chaleur entre la partie chaude et la partie froide, ce qui crée des courants convectifs qui brassent le fluide au sein du ballon de stockage.

La première étude sur les effets de la conduction de la paroi sur la stratification, est menée par Miller [115]. Son expérience a permis de comparer la dégradation de la stratification au sein de deux ballons avec deux matériaux différents, respectivement en aluminium et en verre, où il a conclu que la conductivité de la paroi doit être proche de celle de l'eau, comme c'est le cas du verre. Les résultats de Miller ont été confirmés par une étude faite par Murthey et al [116], en montrant expérimentalement que même dans le cas d'un réservoir bien isolé, les thermoclines se dégradent à cause des pertes de chaleur de la paroi entre la zone de fluide chaud et la zone de fluide froid. Donc une évidente destruction de la thermocline, pour un ballon en aluminium qu'en acier. L'effet de la localisation extérieure ou intérieure de l'isolation a été étudié, où l'isolation intérieure empêche de manière plus efficace la dégradation de la stratification en réduisant les pertes vers l'extérieur de la paroi conductrice [117].

Les ballons solaires sont généralement constitués d'une cuve en acier émaillé intérieurement, d'un échangeur largement dimensionné sous forme de serpentin émaillé et soudé dans la cuve, isolé avec de la mousse polyuréthane d'une épaisseur de 50 mm. La pression à l'intérieur du ballon est celle du réseau d'eau. Au sein du ballon règne une stratification thermique qui peut être favorisée par deux principaux procédés :

1. Par électrovanne

C'est le système le plus répandu afin de favoriser la stratification. Les vannes trois voies sont réglées en fonction de la température de l'eau à la sortie des capteurs solaires dont le fluide est injecté à différents niveaux dans le ballon. Vu le coût élevé des vannes, le nombre d'injection est généralement inférieur à trois (figure 4.6)



Certains ballons sont fabriqués avec un second échangeur solaire, où le fluide primaire passe toujours dans l'échangeur inférieur mais ne passe dans l'échangeur supérieur que si les niveaux de température le justifient. Ce type de ballon est accompagné d'une isolation de 70 mm au lieu de 50 mm concernant les ballons à un seul échangeur.

Puisque l'installation solaire travaillera toujours dans la zone du ballon la plus favorable, ce dernier peut être associé à un échangeur manteau dans le quel le fluide est injecté au bon niveau. Knudsen et Furbo [118] ont confirmé que ce type d'échangeur permet de favoriser la stratification par la création de couches limites chaudes le long de la paroi du ballon, en conseillant une entrée dans la position haute de l'échangeur pour des hautes températures. Pour de faibles températures, une entrée à une hauteur moyenne est préférable. Afin de limiter les pertes thermiques, ce type de ballon utilise une mousse synthétique expansé d'une épaisseur de 115 mm pour la partie latérale et de 150 mm pour la partie haute (figure 4.7).

2. Par convection naturelle

Pour favoriser la stratification, la distribution de chaleur s'effectue par convection naturelle via une canne de stratification. Avec un rayonnement solaire élevé, l'eau chauffée monte rapidement dans le tube thermosiphon pour être disponible dans la partie supérieure du ballon, où celui-ci se réchauffe du haut vers le bas. Shah [119] a montré l'importance des clapets anti retour dont le but de stopper la remonté dans la canne de stratification. Cela a été prouvé par une comparaison avec un dispositif sans clapet qui conduit à un brassage du ballon (figure 4.8 et 4.9).

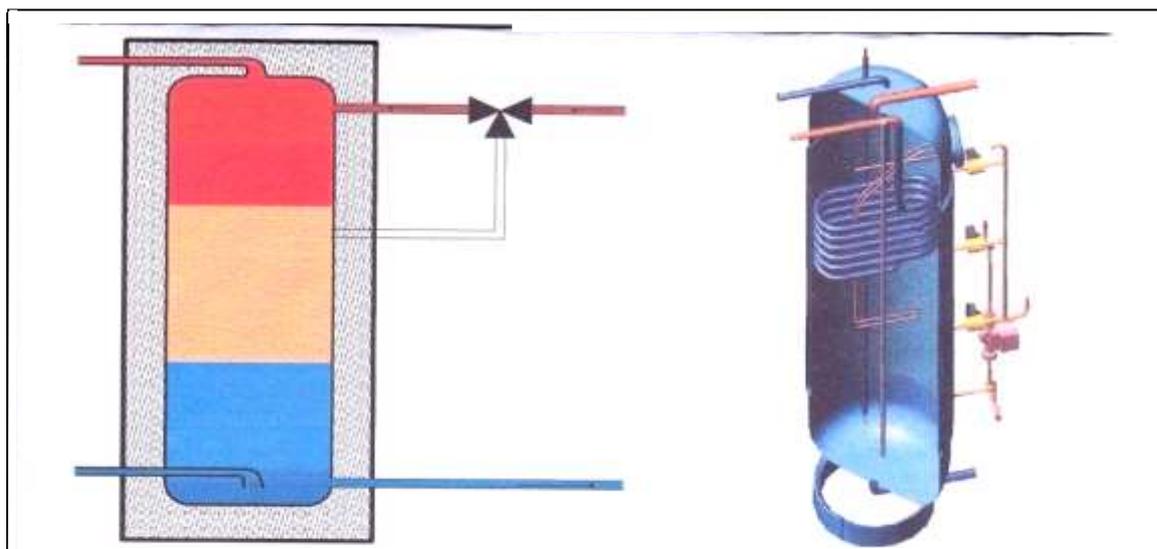


Figure 4.7- Installation permettant une injection directe du fluide en haut ou au milieu du ballon via une vanne 3 voies (à gauche) et ballon à échangeur manteau disposant de 3 hauteurs d'injection de fluide (à droite)

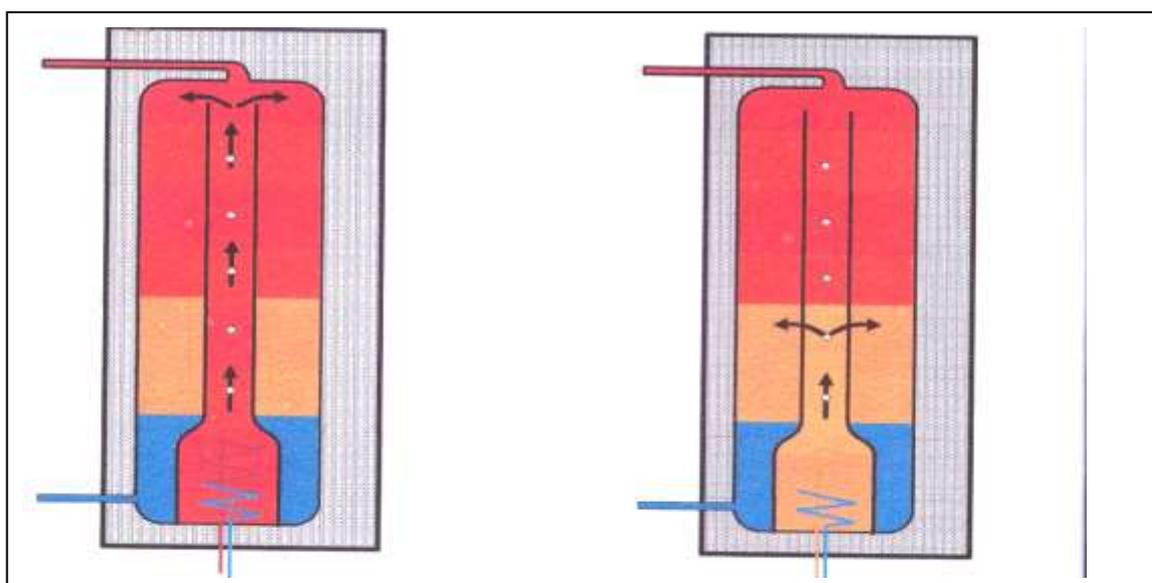


Figure 4.8- Sortie de l'eau en haut du ballon lors d'un ensoleillement élevé (à gauche) et au milieu du ballon lors d'un ensoleillement moyen (à droite)

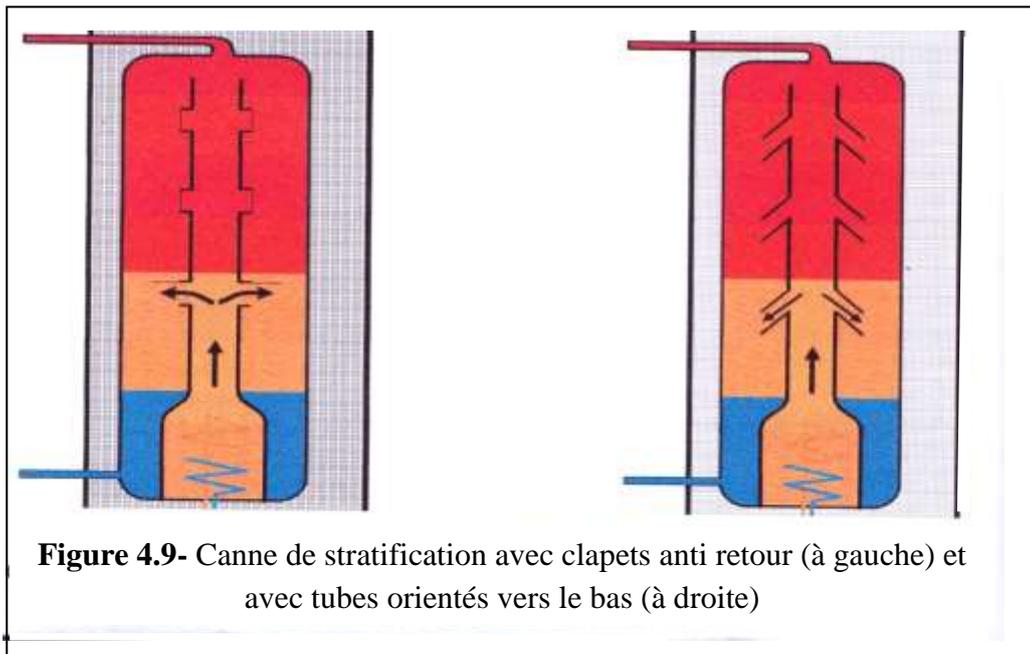


Figure 4.9- Canne de stratification avec clapets anti retour (à gauche) et avec tubes orientés vers le bas (à droite)

La durée de la stratification de l'eau dans le ballon est influencée par deux principaux facteurs qui mènent directement à sa destruction, dont il faut limiter avec force :

1. Le brassage des températures dues au jet

Pour éviter la destratification et l'homogénéisation des températures par le jet, plusieurs techniques existent dont les ballons « tank in tank » sont particuliers par la présence d'un ballon à l'intérieur d'un ballon tampon, ce dernier préserve sa stratification thermique par l'absence complète du jet. Ce même principe se trouve dans un autre modèle où le ballon intérieur est remplacé par un serpentin d'eau chaude instantanée, ce qui permet d'empêcher le brassage des températures par le jet froid et ainsi limiter la destratification (figure 4.10)

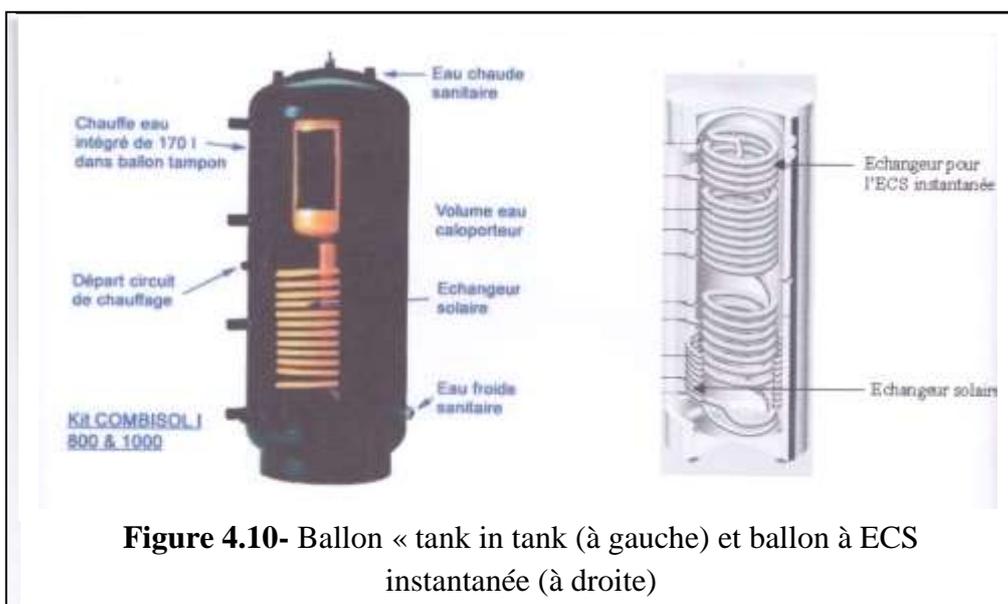
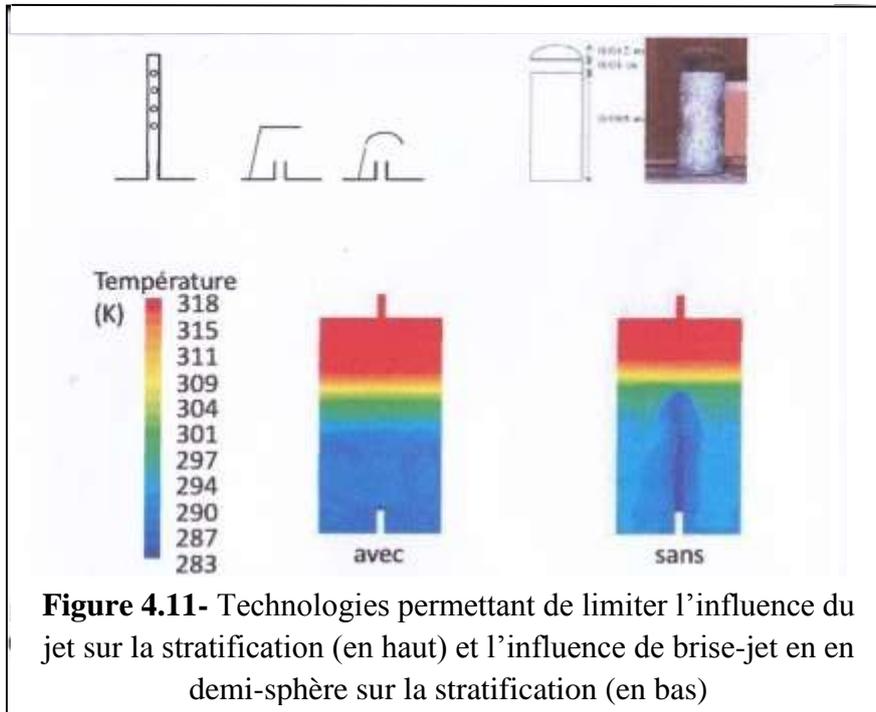


Figure 4.10- Ballon « tank in tank (à gauche) et ballon à ECS instantanée (à droite)

- Les brise-jets ; des dispositifs qui jouent le rôle d'obstacle au développement du jet tout en limitant sa hauteur d'influence (figure 4.11).



- Direction du jet vers le bas du ballon afin de favoriser le brassage dans la partie de basse température et limiter le brassage de l'eau froide avec la partie supérieure du ballon (figure 4.12).



2. L'isolation du ballon

Limiter les pertes du stockage tout en évitant la création de courant de convection au sein du ballon, cela favorise la stratification, pour maintenir celle-ci, une diminution des transferts conductifs sont envisageable par l'utilisation d'une paroi de peu grande résistance thermique, caractérisée par une épaisseur élevée ou par une faible conductivité. Cela peut être effectué par la mise en place d'un matériau isolant, à titre d'exemple la cuve de l'accumulateur Rotex Sanicube Solaris est constitué d'une double paroi en matière synthétique, l'espace entre la paroi externe et la paroi interne est injecté de mousse polyuréthane. Bien que la conductivité thermique du polystyrène soit supérieure à celle du polyuréthane, l'air immobile reste le bon isolant, pour cette raison l'isolation ALU-EPSb employé par Consolar utilise une lame d'air

entre l'isolation de 125 mm de polystyrène et la lame d'aluminium. Selon le constructeur, ce type d'isolation est plus performant pour limiter la destratification.

4.3. Modèles de simulation thermique des ballons solaires

L'objectif de la simulation est l'exploitation de l'énergie solaire par l'être humain, a confirmé que les performances des systèmes solaires évoluent en fonction de la stratification qui règne au sein de dispositif de stockage. Devant l'offre technologique diversifiée, il est donc primordial que le modèle décrive au mieux les différentes technologies présentées afin de limiter la destratification. En principe, il existe 5 modèles différents.

4.3.1. Modèle de ballon idéalement brassé

Ce modèle considère que toute la quantité de l'eau dans le ballon de stockage est à une température uniforme, et qui varie en fonction du temps (elle augmente dans le cas d'une charge et diminue dans le cas d'une décharge, et de l'échange thermique avec l'ambiance).

Le bilan thermique s'écrit comme suit :

$$M \times C_p \times \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in} \times C_p \times (T_{in} - T) - UA \times (T - T_a) \quad (23)$$

4.3.2. Modèle idéalement stratifié

Dans ce modèle, le seul échange thermique qui pourrait exister est celui avec l'ambiance à T_a . Le ballon dit stratifié, est divisé en « N » couches à température uniforme. Le modèle considère que l'injection d'une nouvelle couche intermédiaire n'échange pas de chaleur avec les autres couches rencontrées, où le bilan thermique de la couche « j » de masse « M_j » s'écrit comme suit :

$$M_j \times C_p \times \frac{dT_j}{dt} = -UA \times (T_j - T_a) \quad (24)$$

Lors d'une charge d'un volume « V_C » à « T_C », d'une décharge d'un volume « V_f », de l'introduction de l'eau à « T_f », et en résolvant cette équation pendant un pas de temps « Δt », ce modèle considère que toutes les couches de température inférieures à « T_C », sont déplacées vers le bas du ballon, et que toutes les couches de température supérieures à « T_f », sont déplacée vers le haut du ballon, et donc la température de puisage se calcule par la relation :

$$T_{puisage} = \frac{V_C T_C + (V_L - V_f) \cdot T_1}{V_f} \quad (25)$$

Les étapes de calcul sont représentées dans la figure 4.13.

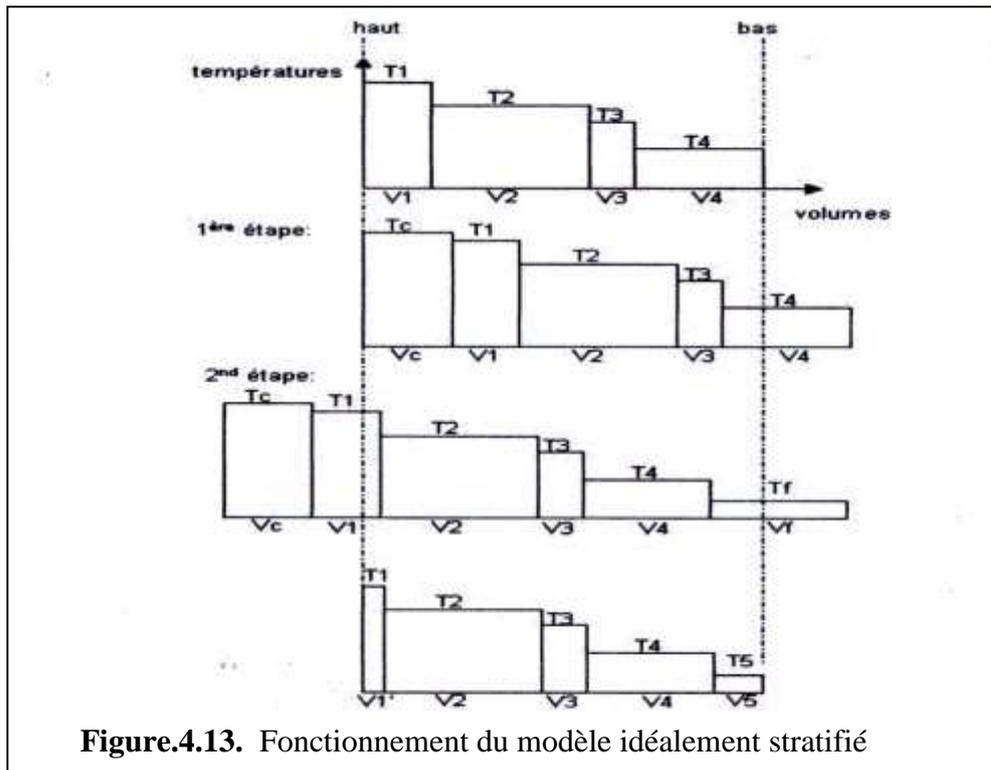


Figure.4.13. Fonctionnement du modèle idéalement stratifié

4.3.3. Modèle de stockage multicouche

Sous le logiciel TRNSYS plusieurs types de modèles à couches existent, ils sont classés suivant le mode d'injection, dont on peut brièvement citer :

Le type 4 de TRNSYS, modèle à « N » couches isotherme, de volume constant au cours de la simulation, ces « N » couches peuvent être d'épaisseurs identiques ou pas. Un nombre « N » tend vers l'infini est la caractéristique d'un modèle idéalement stratifié correspond au mode 2 du type 38 de TRNSYS (figure 4.14).

Il existe d'autres modèles multicouches standards de TRNSYS comme les types 4, 60, 77, 140 et 340 [120].

De manière générale, le bilan énergétique d'une couche « i » peut s'écrire sous la forme :

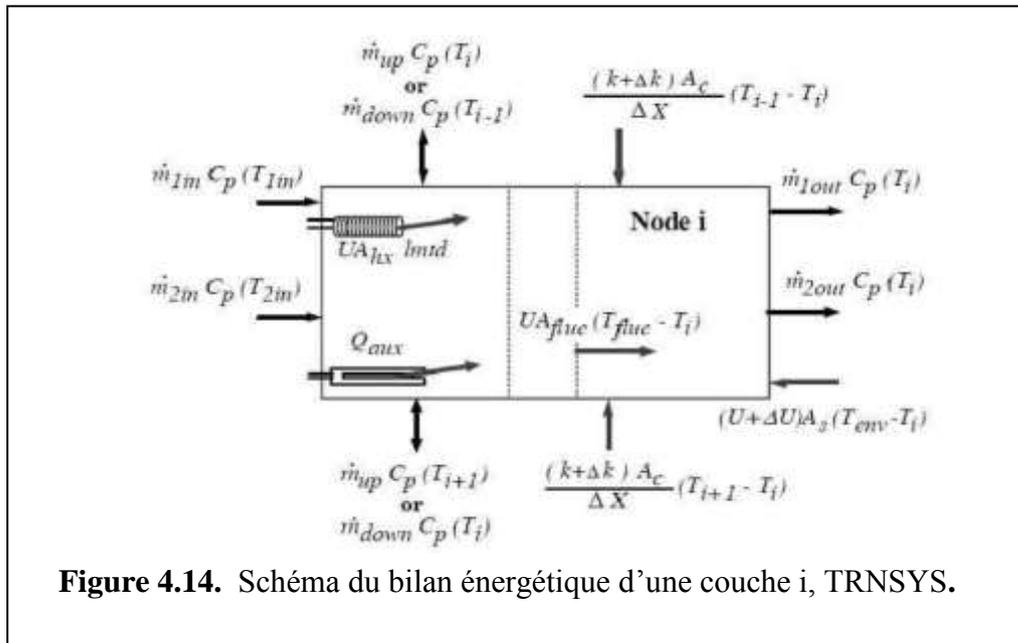
$$(M_i \cdot C_p) \frac{dT}{dt} = \Phi_{env} + \Phi_{cond} + \Phi_{échangeur} + \Phi_{app} + \Phi_{injecté} \quad (26)$$

Avec :

M_i La masse du volume « i » [Kg]

C_p La chaleur massique du fluide [W/Kg.K]

- Φ_{env} Le flux convectif échangé avec l'ambiance [W]
- Φ_{cond} Le flux conductif entre chaque couche [W]
- $\Phi_{échangeur}$ Le flux convectif lié à l'échangeur interne [W]
- Φ_{app} Le flux injecté par une source d'appoint [W]
- $\Phi_{injecté}$ Le flux lié à une injection d'eau froide ou chaude dans le ballon [W]



Bien que le modèle à multicouches évalue parfaitement le comportement global du ballon ainsi qu'une rapidité de calcul, il présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte, les zones ascendantes et descendantes d'une même couche.

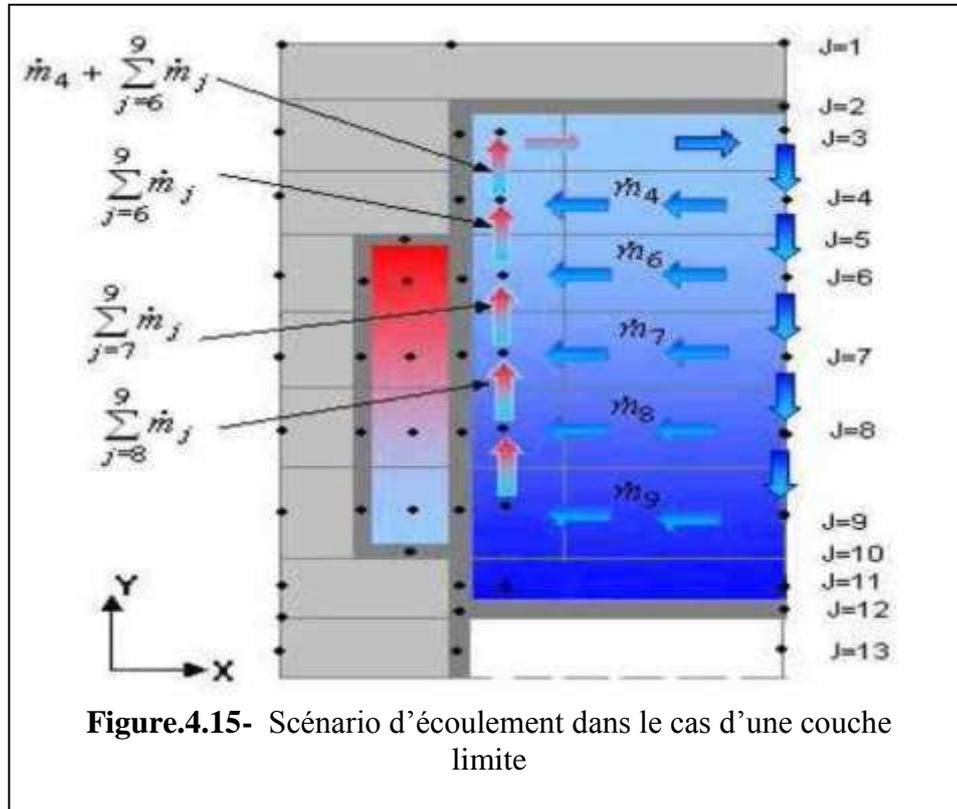
Pour pallier le problème du modèle multicouche, les modèles zonaux ont été développés.

4.3.4. Modèle zonal

Le modèle zonal est utilisé comme outil d'évaluation de la performance énergétique et du confort thermique des bâtiments. Il repose sur une division du réservoir en « N » zones isothermes, où les bilans massiques et thermiques sont écrits pour chaque zone, dont les équations de conservation de la quantité de mouvement ne sont pas prises en compte, chose qui laisse le nombre d'inconnus supérieur aux nombre d'équations. Afin de résoudre le problème, ce type de modèle peut prendre en compte les propriétés thermique et dynamique spécifiques des sources, où les scénarios d'écoulement sont imposés.

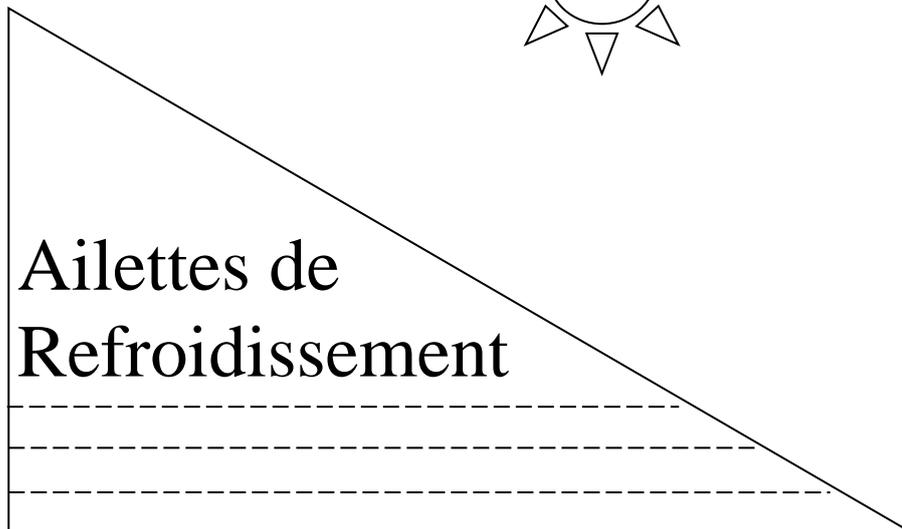
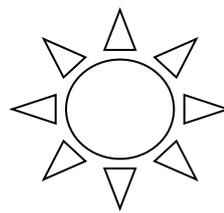
Le modèle zonal développé par Kenjo [121] pour un ballon à échangeur manteau avec injection de fluide à différents niveaux, a été validé expérimentalement en donnant

une satisfaction pour la prédiction de la stratification au sein de tel ballon. Kenjo a retenu deux configurations suivant le signe de l'écart de température entre la température de la paroi et du fluide qui correspondent à la présence d'une couche limite thermique chaude ou froide. La couche limite est identifiée par la résolution des équations de continuité, de Navier Stokes et de conservation (figure 4.15).



4.3.5. Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics)

Les modèles précédents ne pourront pas décrire précisément les transferts de masse et de chaleur au sein du réservoir. La modélisation CFD permet la résolution des équations de Navier-Stokes afin de prédire précisément les champs de vitesse et température liés aux écoulements des fluides. L'approche CFD se base sur deux principes : la discrétisation du domaine de calcul et la résolution numérique des équations de conservation [122].



Ailettes de
Refroidissement

Ailettes

5. Ailettes

5.1. Définition

La façon la plus économique d'augmenter le flux de chaleur cédé par une paroi, peut être obtenu par la réalisation d'ailettes. C'est une solution ayant pour avantage de limiter l'encombrement et l'augmentation de poids résultant de l'ajout de matière. Une ailette est un dispositif thermique, utilisée lorsqu'il faut extraire une densité de flux importante dans un encombrement réduit, visant à augmenter la surface de contact avec un fluide extérieur pour augmenter les échanges convectifs, et donc le transfert de chaleur [123].

5.2. Propriétés

- L'usage des ailettes est peu utile pour les liquides, il est, par contre, utile dans le cas des gaz.
- Des ailettes étroites et rapprochées, limitées par les pertes de charge sont considérées meilleures que des ailettes plus grandes et espacées.
- L'ailette est d'autant plus performante que sa conductivité thermique λ est élevée.
- Le choix des ailettes est alors un compromis entre le coût, l'encombrement, les pertes de charge et le transfert de chaleur.

5.3. Exemples d'applications

-Les systèmes de chauffage des particuliers mettent en jeu des systèmes d'ailettes thermiques afin de transmettre la chaleur issue d'une résistance, dans le cas du chauffage électrique, ou d'un fluide caloporteur en circulation, à l'air ambiant. Ci-dessous, une résistance chauffante composée de la résistance électrique (tube en U), cerclée par une ailette thermique en forme de spirale. Il aurait été possible de remplacer la résistance électrique par un tube dans lequel circulerait un fluide caloporteur (figure 5.1 et figure 5.2)

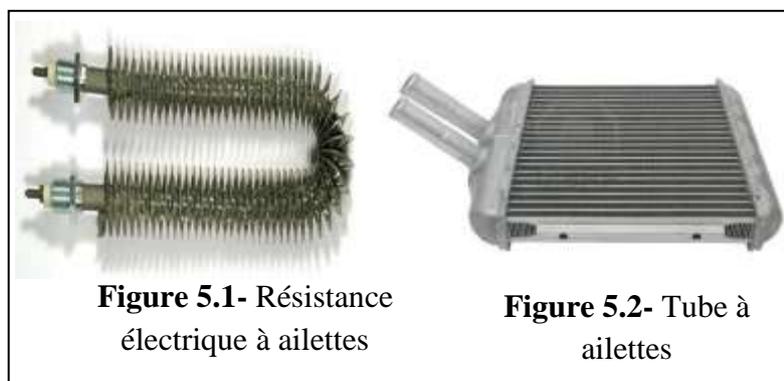


Figure 5.1- Résistance électrique à ailettes

Figure 5.2- Tube à ailettes

Les ailettes thermiques nommées aussi radiateurs dont le but, est de refroidir un élément, en transmettant l'excédent de chaleur au milieu extérieur, qui est l'air dans la plupart des cas. Le radiateur d'une voiture permet de refroidir le moteur. Le liquide de refroidissement circule dans des tubes auxquels sont associées des ailettes thermiques qui transmettent cette chaleur à l'air. La circulation de l'air est assurée par la vitesse du véhicule, ce qui assure un phénomène de convection suffisant.

- Les microprocesseurs des ordinateurs génèrent beaucoup de chaleur lors de leur fonctionnement. Afin d'éviter que ceux-ci soient endommagés par une surchauffe, ils sont parfois recouverts par un radiateur, le plus souvent en aluminium. Ce système d'ailettes transmet directement la chaleur du processeur à l'air (figure 5.3).

- Pour des raisons de radioprotection, des ailettes à la surface du château de transport permettent le refroidissement du combustible usé à l'intérieur par circulation d'air. (figure 5.4).

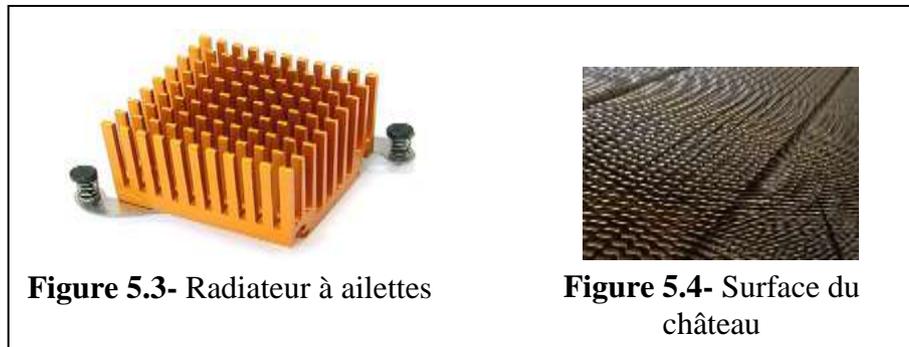


Figure 5.3- Radiateur à ailettes

Figure 5.4- Surface du château

5.4. Flux extrait par une ailette

Une ailette est un milieu bon conducteur de la chaleur dont une dimension est grande devant les autres. La barre est supposée de section suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas de variation de température dans une même section droite à une distance x de l'encastrement dans la paroi à T_0 (figures 5.5 et 5.6) [124].

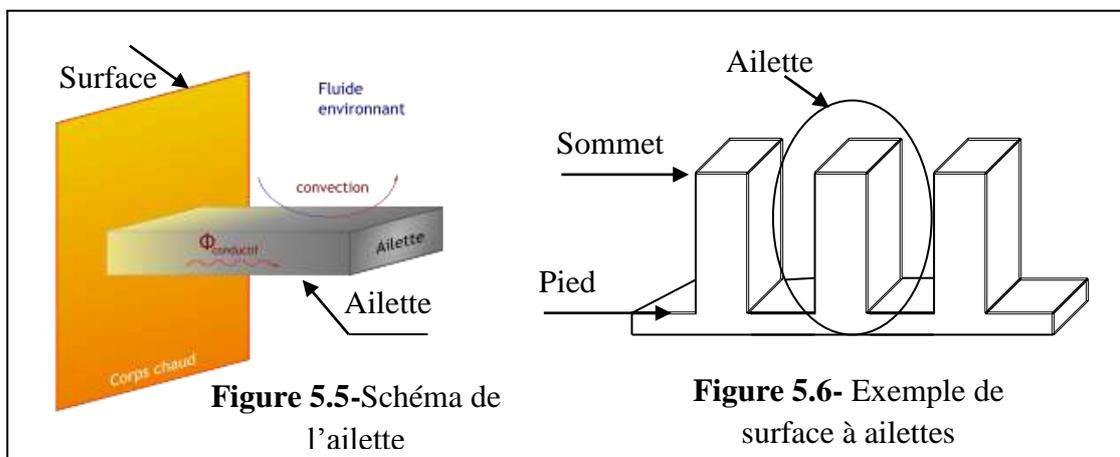


Figure 5.5- Schéma de l'ailette

Figure 5.6- Exemple de surface à ailettes

On suppose que la barre est conductrice, donc λ est grand et le nombre Biot sera très petit, inférieur à l'unité ($Bi \ll 1$)

$$Bi = \frac{h \times L}{\lambda} \quad (27)$$

Sous cette hypothèse, une simplification a pu être réalisée, en considérant que la tranche d'épaisseur « dx » est à une température donnée $T(x)$ et est constante ; donc quasi-uniforme sur une section droite de l'ailette, elle ne dépend que de (x) , distance comptée depuis le pied de l'ailette, car nous sommes en régime permanent d'où cela signifie que le transfert de chaleur est unidirectionnel sur x . Dans notre étude, nous avons besoin de connaître le flux thermique (Q_{ai}) échangé par une ailette. Or, le champ de température dans l'ailette étant à l'évidence multi dimensionnel [125].

5.5. Modélisation de l'ailette

En négligeant l'échange par rayonnement, nous effectuons un bilan d'énergie sur le système constitué par la portion de l'ailette comprise entre les abscisses « x » et « $x+dx$ ». Le problème peut être schématisé comme suit (figures 5.7 et 5.8) :

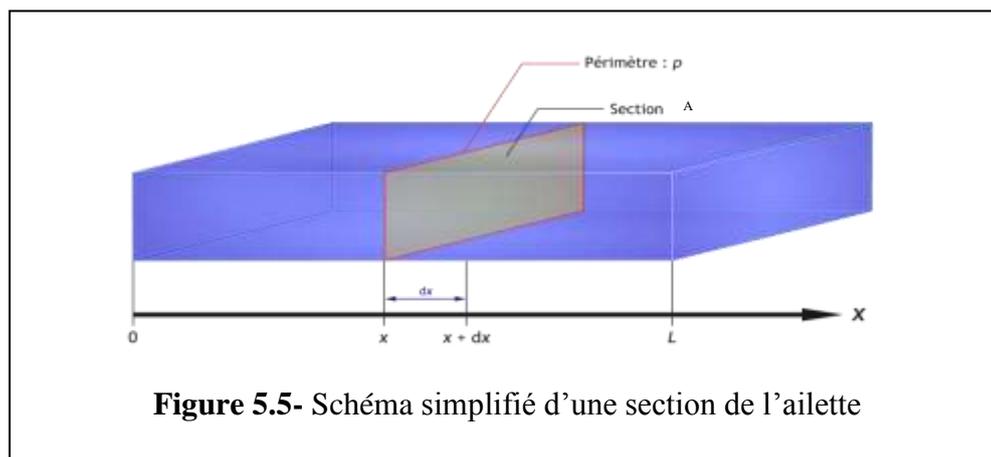


Figure 5.5- Schéma simplifié d'une section de l'ailette

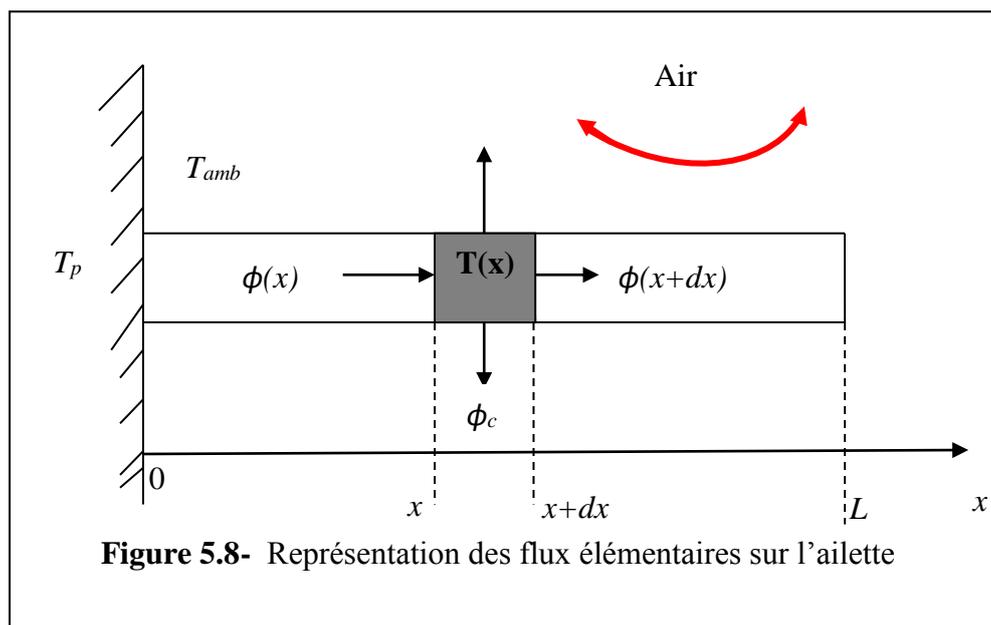


Figure 5.8- Représentation des flux élémentaires sur l'ailette

T_{amb} : Température de l'air ambiant.

T_p : Température de la paroi.

$\varphi_c(x)$: Flux échangé par convection.

$\varphi(x)$: Flux échangé par conduction à l'abscisse « x ».

$\varphi(x + dx)$: Flux échangé par conduction à l'abscisse « $x + dx$ ».

Ainsi nous pouvons écrire le bilan des transferts thermiques pour l'élément « dx » comme suit:

$$\varphi(x) = \varphi(x + dx) + \varphi_c(x) \quad (28)$$

En tenant compte de la loi de Fourier, on obtient :

$$\left(-\lambda \times A \frac{dT}{dx}\right)_x = \left(-\lambda \times A \frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} + h \times p \times dx \times [T(x) - T_{amb}] = 0 \quad (29)$$

Puisque λ et A sont indépendants de « x », nous obtenons :

$$\lambda \times A \frac{\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} - \left(\frac{dT}{dx}\right)_x}{dx} = h \times p \times [T(x) - T_{amb}] \quad (30)$$

Donc $T(x)$ est une solution de l'équation différentielle suivante, appelée « équation de la barre » :

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{hp}{\lambda A} \times (T(x) - T_{amb}) = 0 \quad (31)$$

Avec :

λ : conductivité thermique du matériau ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ;

h : coefficient d'échange convectif ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) ;

p : périmètre de section ;

A : surface de section.

Nous avons établi l'équation différentielle vérifiée par la température « $T(x)$ » d'une ailette encastree dans la paroi métallique à la température « T_p » et baignant dans un fluide qui est l'air à la température « T_{amb} ».

En posant :

$$m^2 = \frac{h \times p}{\lambda \times A} \quad [m^{-2}] \quad (32)$$

L'équation peut encore s'écrire :

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - m^2 (T(x) - T_{amb}) = 0 \quad (33)$$

Est une équation différentielle du 2^{ème} ordre, à coefficients constants et dont la solution générale est de la forme :

$$T(x) = T_{amb} + \alpha e^{mx} + \beta e^{-mx} \quad (34)$$

Où :

α et β sont deux constantes.

Afin de résoudre notre problème, nous disposons de deux conditions limites : La première est donnée par « T_p » en « $x=0$ ». En ce qui concerne la seconde, nous devons distinguer 3 hypothèses :

- Ailette de longueur infinie.
- Ailette de longueur finie à extrémité adiabatique.
- Ailette de longueur finie à extrémité non adiabatique.

- Ailette de longueur infinie

Les différentes conditions limites sont :

- Si $x = 0$: $T_{(x=0)} = T_p$ (température de la paroi)
- Si $x \rightarrow \infty$: $T_{(x=\infty)} = T_\infty$ (température ambiante de l'air)

$$1^{\text{ère}} \text{ CL : } \quad T_p - T_\infty = \alpha + \beta$$

$$2^{\text{ème}} \text{ CL : } \quad 0 = \alpha \exp(m\infty) + \beta \exp(-m\infty) \\ \Rightarrow \alpha = 0 \text{ et } \beta = T_p - T_{amb}$$

Donc La solution est :

$$\frac{T(x) - T_{amb}}{T_p - T_{amb}} = \exp(-mx) \quad (35)$$

La quantité de chaleur transmise par l'ailette à l'air ambiant est la quantité s'écoulant par conduction à travers la base de l'ailette, égale à celle transmise par convection à partir de la surface latérale. Nous aurons donc :

$$Q_{ailette} = -\lambda A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \int_0^\infty hp(T(x) - T_\infty) dx \quad (36)$$

Donc :

$$Q_{ailettes} = \sqrt{h p \lambda A} (T_p - T_{amb}) \quad (37)$$

Cette équation est valable pour un flux de chaleur transmis par une ailette ayant une longueur relativement grande par rapport à sa section transversale, soit : $\frac{L}{A} > 10$

- Ailette de longueur finie à extrémité adiabatique (isolée)

Dans ce cas, la solution générale obtenue est identique au cas précédent, ce sont les conditions aux limites qui diffèrent :

$$\begin{cases} T(x=0) = T_p \\ -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=L} = 0 \end{cases} \quad (\text{Conservation du flux de chaleur en } (x=L))$$

La solution s'écrit :

$$\frac{T(x) - T_{amb}}{T_p - T_{amb}} = \cosh(mx) - \tanh(mL) \sinh(mx) = \frac{\cosh[m(L-x)]}{\cosh(mL)} \quad (38)$$

Le flux total dissipé par l'ailette a pour expression :

$$Q_{ailette} = m \lambda A \tanh(mL) (T_p - T_{amb}) \quad (39)$$

- Ailette de longueur finie avec transfert de chaleur à l'extrémité

En tenant compte des déperditions calorifiques par convection à l'extrémité de la barre, la chaleur s'écoulant par conduction de la face : $x = L$, doit être égale à la chaleur transmise par convection de la section finale de l'ailette à l'air ambiant [126].

Où :

$$-\lambda A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = A h (T_{(x=L)} - T_{amb}) \quad (40)$$

$$\frac{T(x) - T_{amb}}{T_p - T_{amb}} = \frac{\cosh[m(1-x)] + (h/m\lambda) \sinh[m(1-x)]}{\cosh(mL) + (h/m\lambda) \sinh(mL)} \quad (41)$$

Le flux total dissipé par l'ailette a donc pour expression :

$$Q_{ailette} = \sqrt{h p \lambda A} (T_p - T_{amb}) \times \frac{\sinh(mL) + (h/m\lambda) \cosh(mL)}{\cosh(mL) + (h/m\lambda) \sinh(mL)} \quad (42)$$

Etude théorique

1. Calcul du rayonnement global incident

Le rayonnement global incident, pris uniquement en compte au niveau du capteur, et spécifiquement sur sa face avant, il est composé de :

- Rayonnement direct.
- Rayonnement diffus.

$$P_g = P_{dir} + P_{dif} \quad (1)$$

En pratique, l'état du ciel peut être caractérisé par deux coefficients « A » et « B » qui traduisent le trouble atmosphérique du moment, en qualifiant le climat considéré. La transmissivité totale de la couche atmosphérique pour un flux direct s'écrit comme suit :

$$\tau_{dir} = A \times \exp\left[\frac{-B}{\sin(h)}\right] \quad (2)$$

Avec :

$$\sin(h) = \cos \delta \times \cos \omega \times \cos \phi + \sin \delta \times \sin \phi \quad (3)$$

h : est la hauteur du soleil,

δ , ω , ϕ , sont respectivement la déclinaison, l'angle horaire et la latitude, décrits dans le chapitre 1. Les valeurs de A et B sont données par le tableau suivant [127]

Désignation	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
A	0,87	0,88	0,91
B	0,26	0,26	0,43

Tableau.1- Valeurs de A et B

1.1. Calcul du flux diffus

Le flux diffus, en $[w/m^2]$, reçu par un plan horizontal se calcule par la relation suivante:

$$P_{difh} = I_0 \times C \times \sin(h) \times \tau_{diff} \quad (4)$$

Avec :

I_0 : la constante solaire,

C : le coefficient de correction de la distance terre-soleil. Il se calcule comme suit :

$$C = 1 + 0,033 \times \left(\frac{360 \times d}{365} \right) \quad (5)$$

- d : est le numéro du jour dans l'année.

- τ_{diff} : est le coefficient de transmission du rayonnement diffus, donné en fonction de celui du rayonnement direct par la relation :

$$\tau_{diff} = 0,271 - 0,2939 \times \tau_{dir} \quad (6)$$

- Le flux diffus reçu par la surface du capteur, est la somme de deux composantes, l'une est émise par la voute céleste, elle se calcule comme suit :

$$P_{diffc} = P_{difh} \times \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (7)$$

Et l'autre composante en provenance du sol, reçue par le capteur, elle se calcule comme suit :

$$P_{difs} = a \times \frac{1 - \cos \beta}{2} \times (P_{dirh} \times \sin h + P_{difh}) \quad (8)$$

- a : est l'albédo du sol égal à 0,35 [128]

- β : est l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontal.

Alors, le flux diffus total s'écrit comme suit :

$$P_{dif} = P_{difh} \times \frac{1 + \cos \beta}{2} + a \times \frac{1 - \cos \beta}{2} \times (P_{dirh} \times \sin h + P_{difh}) \quad (9)$$

1.2. Calcul du flux direct

Le flux direct, en $[W/m^2]$, dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires. Il se calcule par la relation suivante:

$$P_{dir} = P_{dirh} \times \cos i \quad (10)$$

$$P_{dirh} = (I_0 \times c) \times \tau_{dir} \quad (11)$$

$$\cos i = \cos \omega \times \cos \delta \times \cos(\varnothing - \beta) + \sin \delta \times \sin(\varnothing - \beta) \quad (12)$$

2. Différents modes de transfert de chaleur au niveau du distillateur solaire

Proposés par Dunkle [129] et prouvés par Cooper [130], deux principaux modes de transfert de chaleur sont effectués au niveau du distillateur solaire : un transfert interne et l'autre externe, que l'on peut citer comme suit :

2.1. Transfert interne

L'échange de chaleur interne concerne le transfert thermique par convection, par rayonnement et par évaporation entre la saumure et la paroi de condensation.

2.1.1. Transfert thermique par convection

L'expression de l'équation de chaleur par convection en régime turbulent est la suivante :

$$Q_{csp} = h_{csp} \times (T_{sed} - T_p) \quad (13)$$

h_{csp} : est le coefficient de convection, exprimé par la relation empirique suivante :

A partir du théorème de Vaschy-Buckingham, h_{csp} peut s'exprimer en fonction des nombres adimensionnels tel que :

$$h_{csp} = \frac{N_u \times \lambda}{D} \quad (14)$$

Où :

D : est la longueur caractéristique de l'espace compris entre la saumure et la paroi métallique.

N_u : est le nombre sans dimension de Nusselt, qui caractérise l'échange thermique entre l'eau et la paroi, défini comme suit :

$$N_u = c \times [G_r \times P_r]^n \quad (15)$$

Avec, G_r : comme étant le nombre sans dimension de Grashof qui caractérise la convection libre dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Il est défini comme suit :

$$Gr = \frac{\beta \times g \times \rho^2 \times D^3 \times \Delta T}{\mu^2} \quad (16)$$

Avec:

g : accélération de la pesanteur

β : coefficient de dilatation

ΔT : différence de température [°C]

D : longueur caractéristique [m]

ρ : masse volumique du fluide [Kg/m³]

μ : viscosité dynamique [Kg/ms]

P_r : est le nombre de Prandtl qui caractérise les propriétés thermiques du fluide, en représentant le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement (viscosité cinématique) et la diffusivité thermique, défini comme suit :

$$P_r = \frac{\mu \times C_p}{\lambda} \quad (17)$$

C_p : est la capacité thermique massique en [J.kg⁻¹.K⁻¹]

λ : est la conductivité thermique [W.m⁻¹.K⁻¹]

Les valeurs de « c » et « n » dépendent du nombre de Grashof

- Pour la convection laminaire :

$$n = \frac{1}{4} \text{ et } 0,2 < c < 0,6 : 10^4 < Gr < 3,2 \times 10^5$$

- Pour la convection turbulente :

$$n = \frac{1}{3} \text{ et } 0,07 < c < 0,15 : 3,2 \times 10^5 < Gr < 3,2 \times 10^7$$

La distribution de la température et de la géométrie rencontrées dans le distillateur solaire a donné un nombre de Grashof compris entre $1,2 \times 10^5$ et 10^7 , ce qui correspond à $c = 0,075$ et $n = \frac{1}{3}$, proposé par Dunkle [129]. Il a ensuite été prouvé que le transfert de chaleur par convection entre la saumure et la paroi de condensation, inclinée d'un angle « β », peut être calculé par la relation suivante[130] :

$$Q_{csp} = 0,884 \times \left[T_{sed} - T_p + \frac{P_{sed} - P_p}{268,9 \times 10^3 - P_{sed}} \times T_{sed} \times \frac{1 + \cos \beta}{2} \right]^{\frac{1}{3}} \times (T_{sed} - T_p) \quad (18)$$

P_{sed} , P_p : représentent respectivement les pressions partielles et de la vapeur d'eau à la température T_{sed} et T_p . D'après Siaka Toure et Pierre Mankam [131], la relation (19) donne en $[N/m^2]$ de meilleures valeurs de la pression dans le distillateur solaire simple à effet de serre.

$$P = 7236,2 - 431,43 \times T + 10,76 \times T^2 \quad (19)$$

2.1.2. Transfert thermique par évaporation

La quantité de chaleur de l'évaporation de l'eau est donnée par la relation suivante :

$$Q_{evap} = 16,276 \times 10^{-3} \times Q_{csp} \times \frac{P_{sed} - P_p}{T_{sed} - T_p} \quad (20)$$

2.1.3. Transfert thermique par rayonnement (eau-paroi)

Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'eau saumâtre et la paroi se calcule par la relation suivante [132]:

$$h_{rsp} = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times [(T_{sed})^2 + (T_p)^2] \times [T_{sed} + T_p] \quad (21)$$

Avec :

ε_{eff} : est l'émissivité effective, son expression est la suivante :

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_{sed}} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1 \right]^{-1} \quad (22)$$

ε_{sed} : émissivité de l'eau.

ε_p : émissivité de la paroi.

σ : constante de Stefan Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

Donc l'expression du flux thermique échangé par rayonnement est :

$$Q_{rsp} = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times [(T_{sed})^4 - (T_p)^4] \quad (23)$$

2.2. Transfert externe

D'après Cooper [130], deux principaux modes de transfert thermique existent entre le distillateur et le milieu extérieur, qui s'effectuent par convection et par rayonnement entre la paroi et l'ambiance. Leurs expressions définies par Dunkle [33n] sont:

2.2.1. Transfert par convection :

$$Q_{cpa} = h_{cpa} \times (T_p - T_{amb}) \quad (24)$$

h_{cpa} : est le coefficient d'échange thermique convectif entre la paroi et l'ambiance. Il se calcule en fonction de la vitesse du vent « V_v (m/s) », d'après Cooper et W.R.W [133] :

$$h_{cpa} = 5,7 + 3,8 \times V_v \quad (25)$$

2.2.2. Transfert par rayonnement :

$$Q_{rpc} = \varepsilon_v \times \sigma \times [(T_p)^4 - (T_c)^4] \quad (26)$$

T_c : est la température équivalente du ciel. D'après Dugunet [127], elle se calcule en fonction de la température ambiante « T_{amb} » :

$$T_c = 0,0552 \times (T_{amb})^{\frac{3}{2}} \quad (27)$$

$$T_{amb} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \times \sin \frac{(t - 8) \cdot \pi}{12} + \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (28)$$

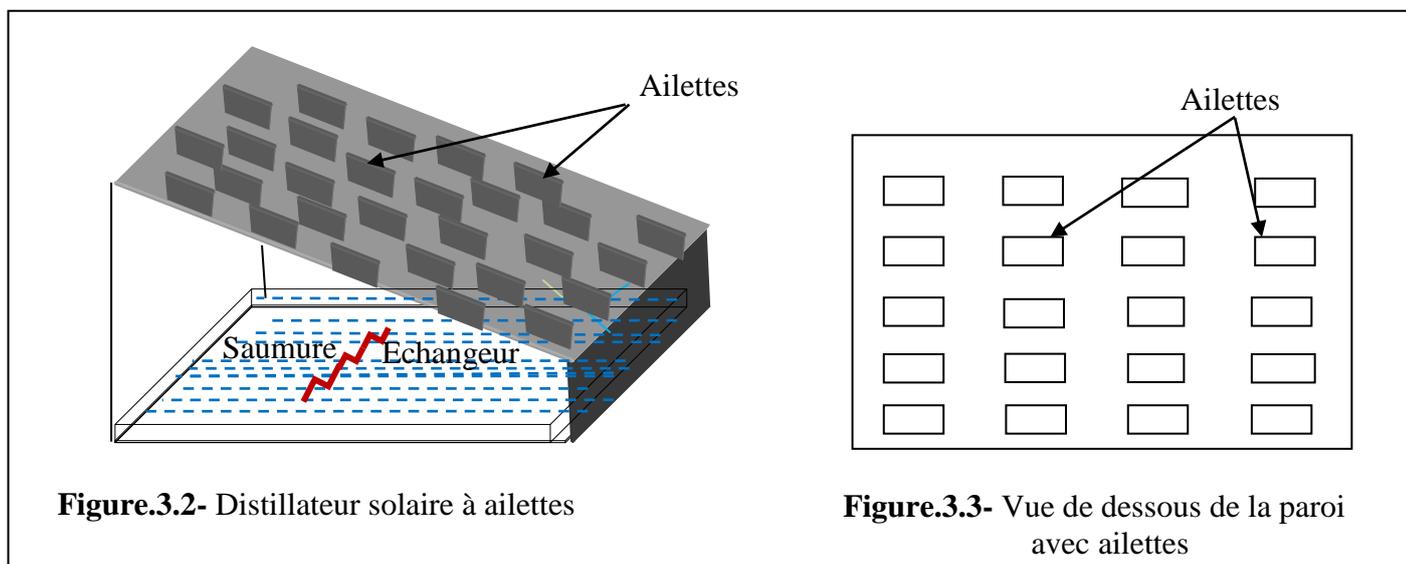
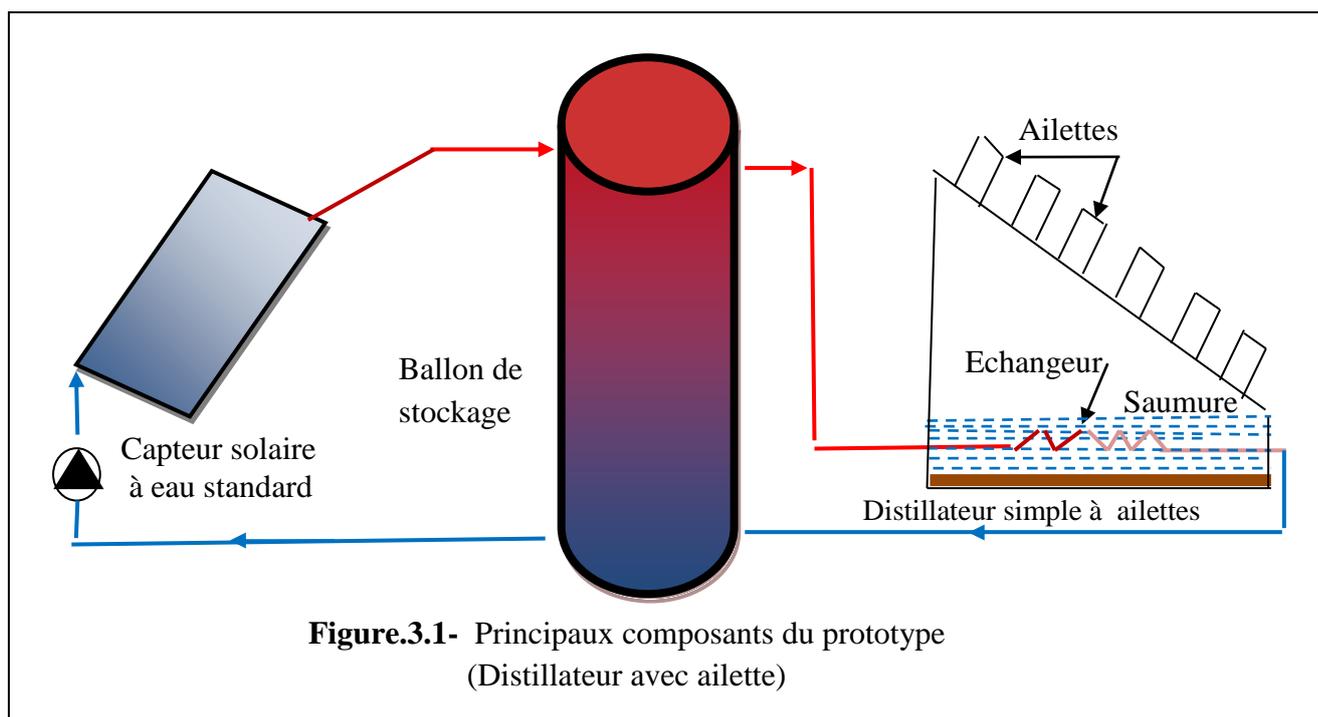
T_{max} et T_{min} : sont respectivement la température minimale et maximale de l'ambiance extérieure.

3. Principaux composants de l'installation

Notre prototype comporte 4 composants essentiels (Figure 3.1):

1. Le capteur solaire standard qui transforme le rayonnement solaire en énergie thermique.
2. Le ballon de stockage d'eau chaude qui est une cuve bien isolée, assurant le stockage de la chaleur collectée par les capteurs jusqu'au moment de son utilisation,
3. Le circuit primaire (circuit fermé) qui relie le capteur au ballon de stockage et qui permet le transfert de chaleur de l'un vers l'autre.
4. Le distillateur solaire, sert de la production d'eau distillée.

La figure 3.2 ci-dessous montre la face extérieure de la paroi métallique à ailettes :



4. Fonctionnement

Le capteur, transforme le rayonnement solaire en chaleur, au fluide caloporteur. Ce dernier évacue alors cette chaleur vers le ballon de stockage, qui est ensuite transférée vers la saumure via un échangeur de chaleur immergé, type « tube ». Le fluide refroidi est alors renvoyé vers le capteur. Ce cycle se répète (pour autant que l'ensoleillement persiste) jusqu'à ce que la température dans le bas du ballon de stockage atteigne celle du capteur. Au sein du ballon de stockage, l'eau chaude

s'élève par mouvement de convection. Une stratification thermique s'opère : l'eau plus chaude se concentre en partie haute du ballon, l'eau plus froide, en partie

basse. Avec un dimensionnement habituel pour une telle installation, une surface de 0,8 à 1,5 m² de capteur correspond à 60 jusqu'à 100 litres de capacité de stockage. La régulation enclenche la pompe du circuit primaire lorsque la température dans le capteur est plus élevée (de quelques degrés) que la température régnant dans la partie inférieure du ballon de stockage. La pompe est arrêtée lorsqu'aucune chaleur ne peut plus être transférée du capteur vers le ballon.

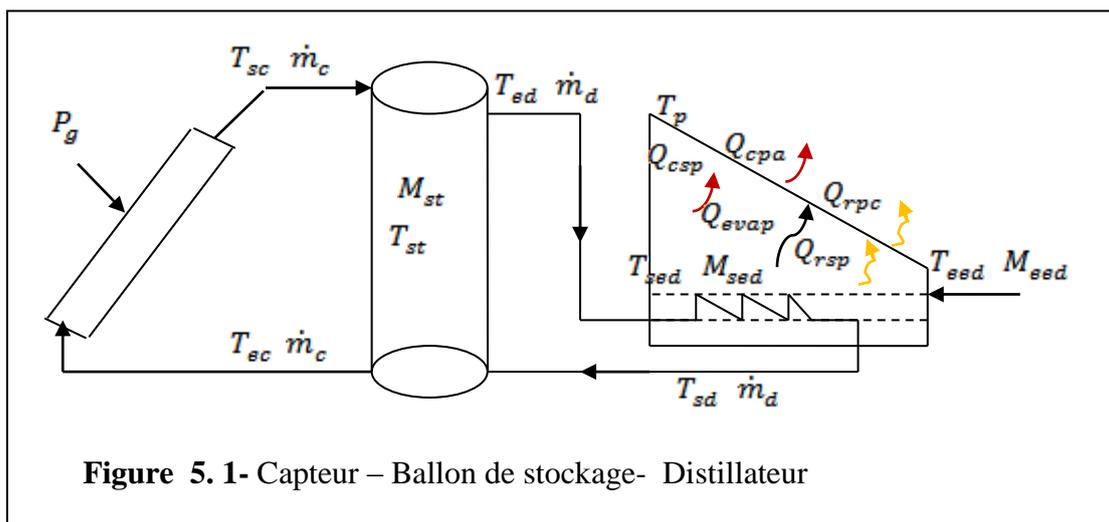
5. Problème physique

5.1. Prototype avec distillateur à paroi sans ailettes (Figure 5. 1)

Le problème physique consiste à déterminer les paramètres caractérisant le ballon de stockage (la masse et la température) ainsi que ceux caractérisant le capteur solaire (le débit et la température) en fonction des paramètres météorologiques, ainsi que l'évolution par rapport au temps :

- de la température de l'eau de stockage.
- de la température de l'eau à la sortie du capteur et de l'échangeur.
- de la température de la paroi métallique.
- de la température de l'eau saumâtre.
- de l'écart de température entre la paroi de condensation et la surface d'évaporation.
- le rendement, l'efficacité globale et interne du distillateur solaire.

5.1.1. Schéma d'installation



5.1.2. Formulation du modèle :

La formulation mathématique du modèle a été établie par le bilan thermique qui illustre les principaux mécanismes d'échanges thermiques par rapport au temps, en se

basant sur des hypothèses simplificatrices, dont le but est de simplifier l'étude du phénomène de la distillation solaire active.

5.1.3. Hypothèses simplificatrices :

- Les pertes thermiques dans les différentes canalisations sont négligeables.
- Le système (capteur-ballon de stockage-distillateur) est parfaitement isolé.
- Les échanges thermiques et massiques entre la surface libre de l'eau et la couverture sont décrits en considérant que la température et la pression partielle de vapeur d'eau sont constantes.
- Le gradient de température entre la face interne et externe de la couverture est négligeable.
- La température de l'eau dans le ballon de stockage est uniforme, un revêtement sélectif est appliqué sur la face extérieure.
- Les propriétés physiques des différents matériaux sont considérées constantes.

5.1.4. Bilan thermique

5.1.4.1. Distillateur solaire :

La loi de Kirchhoff nous a permis d'établir le bilan énergétique au niveau du distillateur solaire, dont la résolution mathématique a été abordée par une approche numérique basée sur la méthode de Gauss-Seidel d'itérations.

- Paroi métallique :

$$\frac{M_p C_{pp}}{S_p} \times \frac{dT_p}{dt} + h_{ce} \times (T_p - T_{amb}) + h_{rpc} \times (T_p - T_c) = h_{gsp} \times (T_{sed} - T_p) \quad (29)$$

- La saumure :

$$\frac{M_{sed} \times C_p}{S_{sed}} \times \frac{dT_{sed}}{dt} + h_{gsp} \times (T_{sed} - T_p) = \dot{m}_d \times C_p \times (T_{ed} - T_{sd}) \quad (30)$$

- L'échangeur type tube

$$\dot{m}_d \times C_p \times (T_{ed} - T_{sd}) = \dot{m}_{sed} \times C_p \times (T_{sed} - T_{eed}) \quad (31)$$

L'efficacité est calculée comme suit :

$$\varepsilon = \frac{T_{sed} - T_{eed}}{T_{ed} - T_{eed}} \quad (32)$$

5.1.4.2. Le capteur solaire

D'après Duffie et Beckman [134], Les capteurs solaires vitrés sont décrits par l'équation suivante :

$$Q_{captée} = f(T_c, T_{amb}, P_g, \dot{m}_c) \quad (33)$$

$Q_{captée}$: est l'énergie captée par 1 m² de capteur solaire et par unité de temps.

$$\dot{m}_c \times C_p \times (T_{sc} - T_{ec}) = F_R \times (\tau \times \alpha) \times P_g - F_R \times U_L \times \Delta T \quad (34)$$

Où ;

F_R : est un facteur caractérisant les pertes thermiques du capteur.

τ : est la transmissivité du vitrage.

α : est l'absorptivité de l'absorbeur dans le spectre visible.

P_g : est la puissance globale incidente.

U_L : est le coefficient global de déperdition thermique du capteur.

ΔT : est l'écart de température entre le fluide à l'entrée du capteur et la température ambiante extérieure.

$F_R(\tau\alpha)$ et $F_R U_L$: sont indépendants du vent ; leurs valeurs sont spécifiées par l'utilisateur et choisies parmi les capteurs solaires sélectionnés. Des valeurs génériques sont proposées pour les capteurs vitrés, et correspondent aux résultats des essais de certification des capteurs de la compagnie Thermo-Dynamics [135]. Ces valeurs sont :

$$F_R(\tau\alpha) = 0,68 \text{ et } F_R U_L = 4,90 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$$

5.1.4.3. Ballon de stockage:

En négligeant la stratification des températures de l'eau dans le ballon de stockage, nous appliquons le modèle de «ballon idéalement brassé», où la totalité du liquide est à une température uniforme qui varie en fonction du temps via un ajout d'énergie pendant la charge ou un puisage d'énergie pendant la décharge. Le bilan thermique s'écrit alors :

$$Q_c = Q_s + Q_u + Q_p \quad (35)$$

Q_c : est la puissance captée.

Q_s : est la puissance stockée.

Q_u : est la puissance utilisée.

Q_p : est la puissance perdue.

Après développement, l'équation (35) devient :

$$\begin{aligned} \frac{M_{st} \times C_p}{S_{st}} \times \frac{dT_{st}}{dt} &= A \times F_R \times [(\tau \times \alpha) \times P_g - U \times (T_{ec} - T_{amb})] - \dot{m}_d \times C_p \\ &\times (T_{ed} - T_{sd}) - k_s \\ &\times (T_{st} - T_e) \end{aligned} \quad (36)$$

k_s : la conductance entre le stockage et l'extérieur.

T_e : la température dans l'espace entourant le ballon de stockage.

5.2. Prototypage d'un distillateur à paroi avec ailettes

Dans le but d'améliorer le rendement du distillateur solaire simple et à effet de serre, tout en sachant qu'il dépend directement de l'écart de température entre la saumure et la paroi de condensation, nous avons eu l'idée de créer une éventuelle baisse de la température de cette dernière, en plaçant des ailettes de refroidissement sur sa face extérieure (Figure 5. 2).

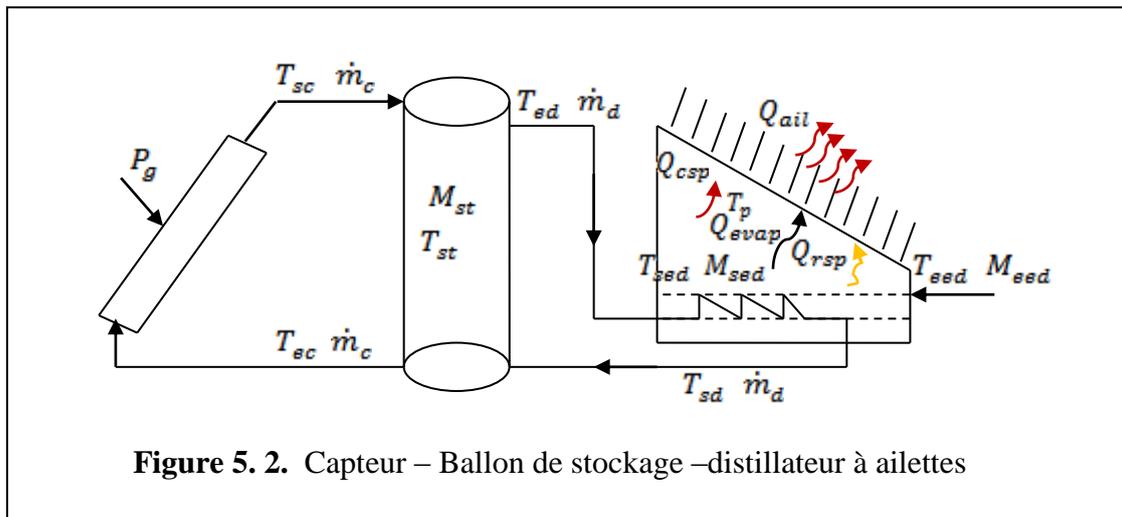


Figure 5. 2. Capteur – Ballon de stockage –distillateur à ailettes

5.2.1. Formulation du modèle

Concernant la formulation mathématique, établie par le bilan thermique qui illustre les principaux mécanismes d'échanges thermiques par rapport au temps. Il en sera de même pour les deux modèles. Sauf au niveau de la paroi métallique, l'échange thermique par convection et rayonnement externes seront négligés et remplacés par le flux thermique transféré à travers les ailettes de refroidissement montées sur la face extérieure de cette paroi.

- Paroi métallique

$$\frac{M_p C_{pp}}{S_p} \times \frac{dT_p}{dt} + N \times Q_{ailettes} = h_{gsp} \times (T_{sed} - T_p) \quad (37)$$

N : est le nombre d'ailettes montées sur la paroi métallique.

$Q_{ailettes}$: est le flux thermique transmis par une ailette calculé par l'équation (42. chapitre 1)

h_{gsp} : est le coefficient global équivalent de la convection, le rayonnement, et l'évaporation entre la saumure et la face intérieure de la vitre. Il se calcule comme suit :

$$h_{gsp} = h_{csp} + h_{rsp} + h_{évap} \quad (38)$$

6. Résolution mathématique

6. 1. Distillateur solaire

Pour obtenir la solution des équations régissant le fonctionnement du distillateur solaire, nous avons utilisé la méthode itérative de Gauss-Seidel, afin de résoudre les équations ainsi discrétisées.

- Discrétisation des équations

Les équations issues du bilan thermique sont discrétisées et ordonnées, par rapport à la température et qui sont :

$$\begin{aligned} * \frac{M_p C_{pp}}{S_p} \times \frac{T_p^{(t+\Delta t)} - T_p^{(t)}}{\Delta t} + h_{ce} \times T_p^{(t+\Delta t)} + h_{rpc} \times T_p^{(t+\Delta t)} - h_{ce} \times T_{amb} \\ - h_{rpc} \times T_c = h_{gsp} \times T_{sed}^{(t+\Delta t)} - h_{gsp} \times T_p^{(t+\Delta t)} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} * \frac{M_{sed} \times C_p}{S_{sed}} \times \frac{T_{sed}^{(t+\Delta t)} - T_{sed}^{(t)}}{\Delta t} + h_{gsp} \times T_{sed}^{(t+\Delta t)} - h_{gsp} \times T_p^{(t+\Delta t)} \\ = \dot{m}_d \times C_p \times (T_{ed} - T_{sd}) \end{aligned} \quad (40)$$

Après développement, il en résulte ce qui suit :

$$\begin{aligned} * \left[\frac{M_p C_{pp}}{S_p \times \Delta t} + h_{ce} + h_{rpc} + h_{gsp} \right] \times T_p^{(t+\Delta t)} - h_{gsp} \times T_{sed}^{(t+\Delta t)} = \frac{M_p C_{pp}}{S_p \times \Delta t} \times T_p^{(t)} + h_{ce} \times \\ T_{amb} + h_{rpc} \times T_c \end{aligned} \quad (41)$$

$$* \left[\frac{M_{sed} \times C_p}{S_{sed} \times \Delta t} + h_{gsp} \right] \times T_{sed}^{(t+\Delta t)} - h_{gsp} \times T_p^{(t+\Delta t)} = \frac{M_{sed} \times C_p}{S_{sed} \times \Delta t} \times T_{sed}^{(t)} + \dot{m}_d \times C_p \times (T_{ed} - T_{sd}) \quad (42)$$

Le système d'équations de deux inconnues, ainsi obtenu peut se mettre sous la forme d'une matrice $[A]$ qui s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_p^{(t+\Delta t)} \\ T_{sed}^{(t+\Delta t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad \text{Avec :}$$

$$A_{11} = \frac{M_p C_{pp}}{S_p \times \Delta t} + h_{ce} + h_{rpc} + h_{gsp}$$

$$A_{12} = -h_{gsp}$$

$$A_{21} = -h_{gsp}$$

$$A_{22} = \frac{M_{sed} \times C_p}{S_{sed} \times \Delta t} + h_{gsp}$$

$$B_1 = \frac{M_p C_{pp}}{S_p \times \Delta t} \times T_p^{(t)} + h_{ce} \times T_{amb} + h_{rpc} \times T_c$$

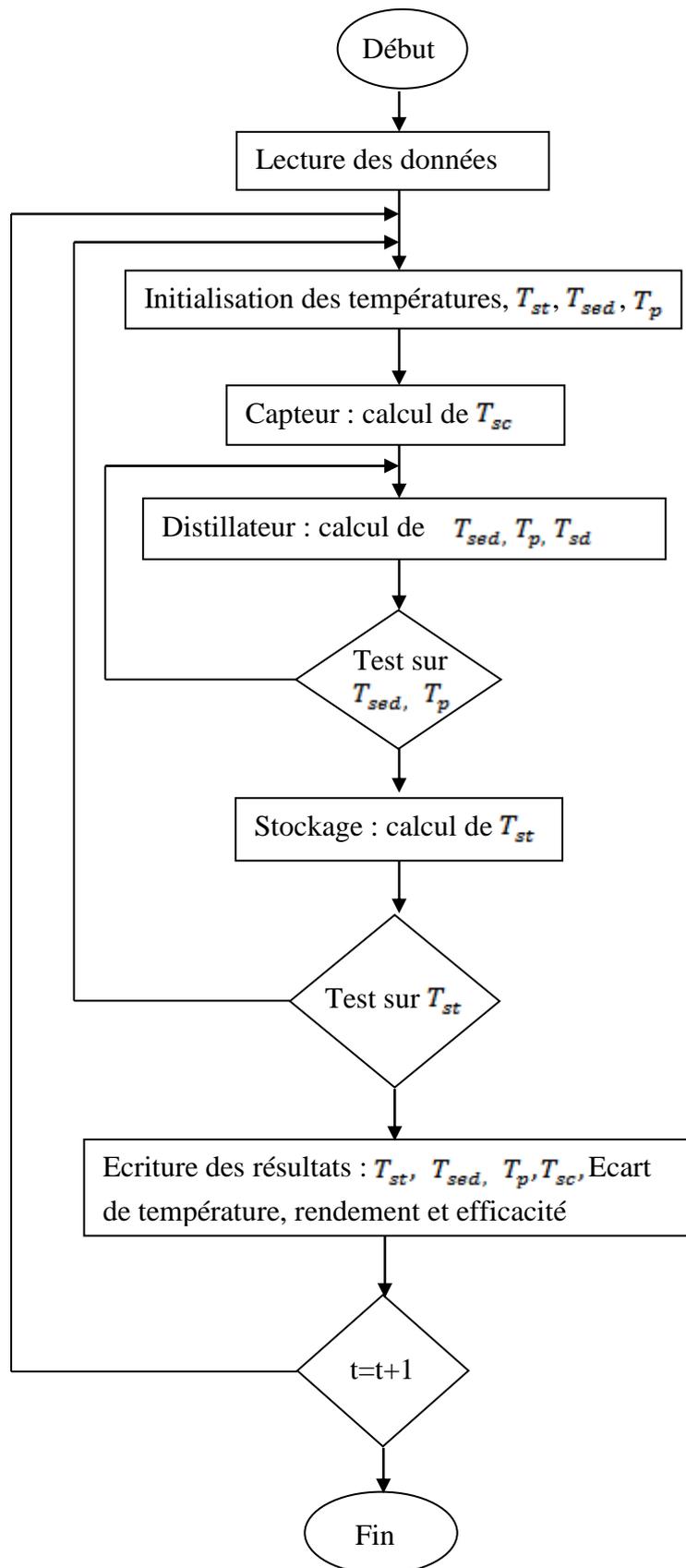
$$B_2 = \frac{M_{sed} \times C_p}{S_{sed} \times \Delta t} \times T_{sed}^{(t)} + \dot{m}_d \times C_p \times (T_{ed} - T_{sd})$$

6. 2. Ballon de stockage

Afin d'évaluer la température de l'eau de stockage, la méthode d'Euler nous a permis d'intégrer l'équation (36) numériquement avec un pas de temps de l'ordre d'une heure. Un tel choix, basé sur une précision suffisante, est obtenu par cette méthode, ainsi qu'un pas inférieur à une heure n'apporte aucune amélioration à la précision des résultats. Pour chaque instant « $i\Delta t$ », T_s est calculé comme suit :

$$T_{st_{i+1}} = T_{st_i} + \frac{\Delta t \times S_{st}}{M_{st} \times C_p} \times \{ A \times F_R \times [(\tau \times \alpha) \times P_g - U \times (T_{ec} - T_{amb})] - \dot{m}_d \times C_p \times (T_{ed} - T_{sd}) - k_s \times (T_{st} - T_e) \} \quad (43)$$

7. Organigramme général du programme de calcul

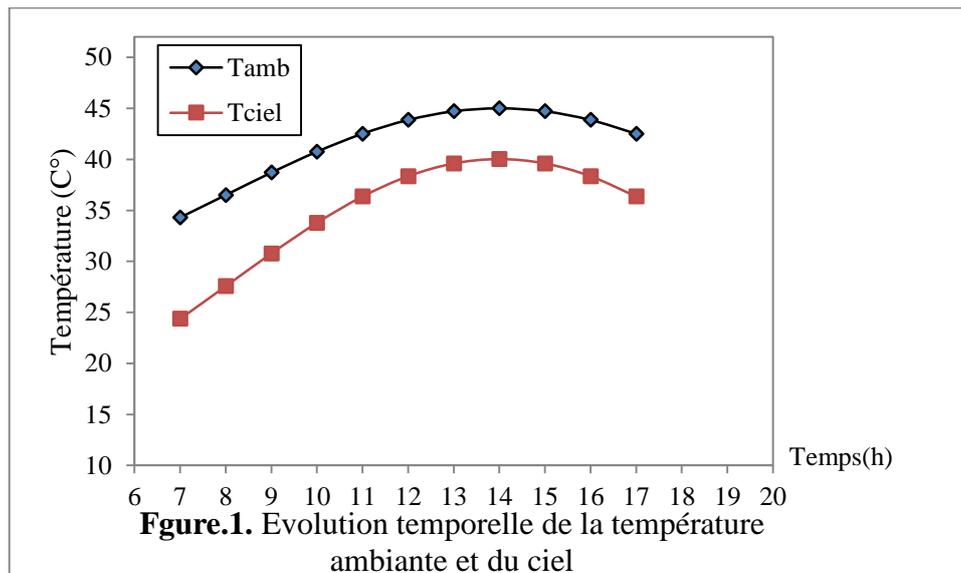


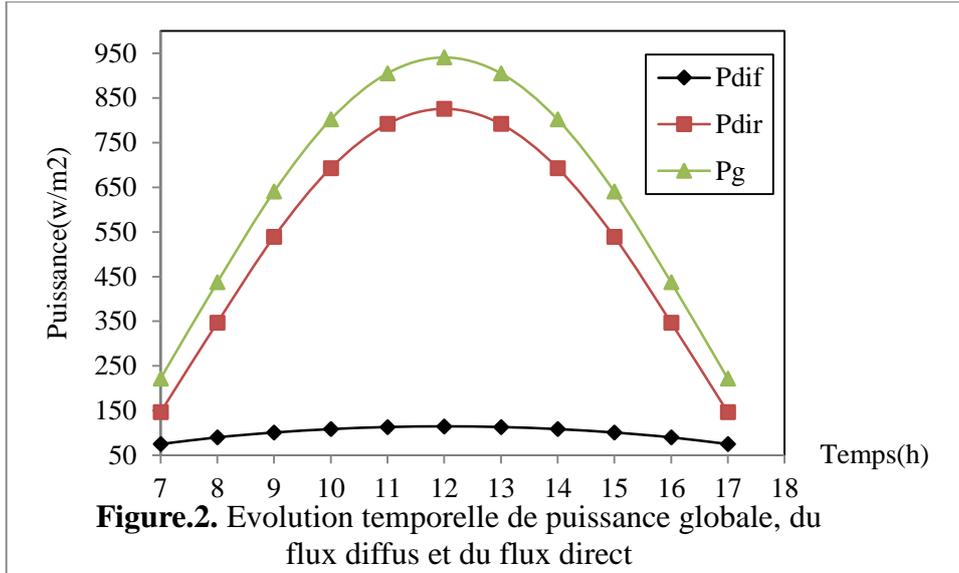
Résultats et discussion

La résolution des différentes équations décrivant notre modèle, nous a permis d'obtenir des résultats en considérant les paramètres météorologiques de la journée du 15 Juillet. Les calculs sont effectués, pour chaque composant de l'installation à un temps initial « t_0 », et à une température initiale « T_0 », et avec un pas de temps égal à une (1) heure. En tenant compte des coordonnées géographiques, de la région considérée : région de Ouargla (sud d'Algérie).

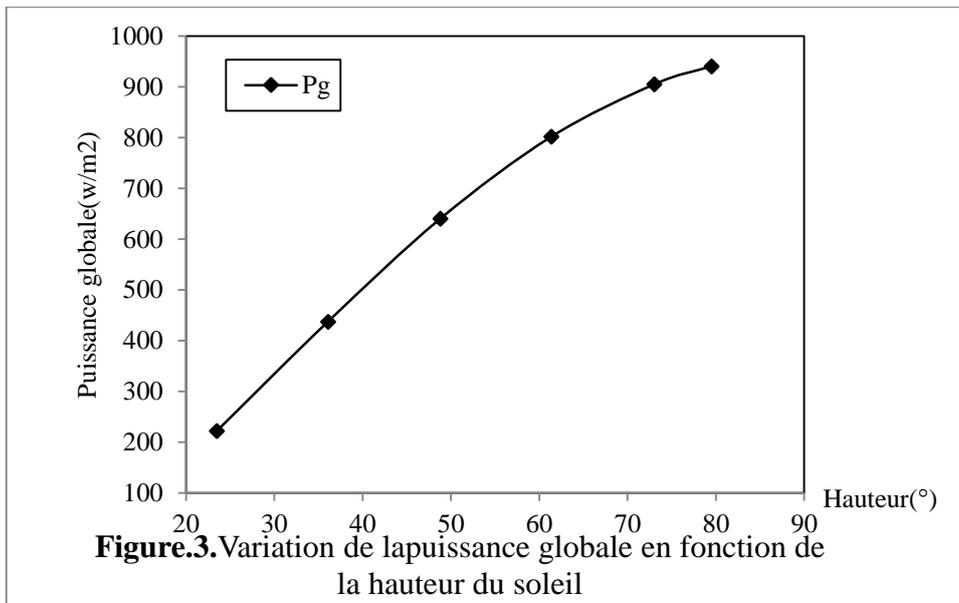
- Variation de la température ambiante et celle du ciel

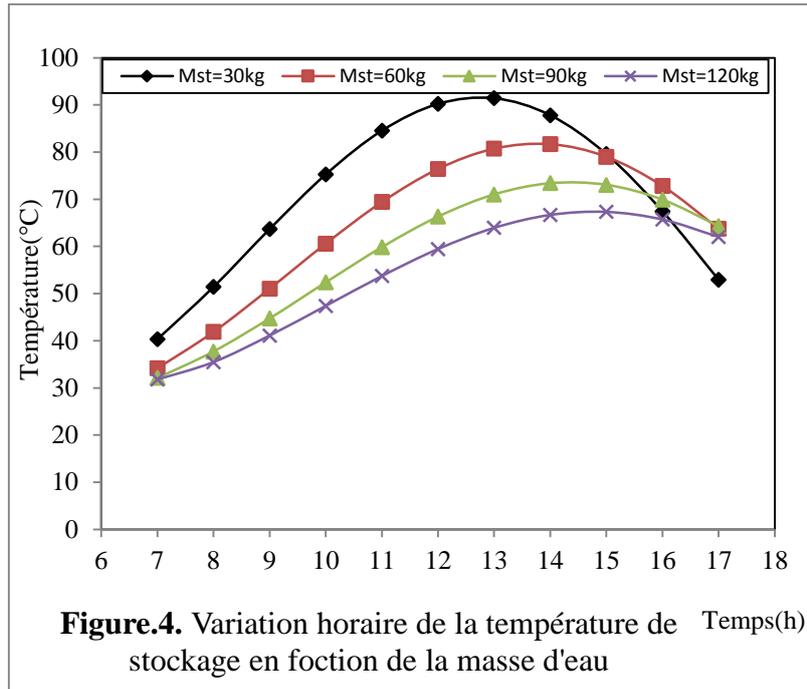
La température est un état instable dont les variations au voisinage de l'environnement dépendent du rayonnement solaire, du vent, de l'altitude et de la nature du sol. Elle est aussi dépendante de la nature des surfaces environnantes et est influencée par l'occupation du site et par son relief [136]. Le calcul des températures (du ciel et ambiante), issu des relations trigonométriques de corrélations (27) et (28) et déduites des relevés météorologiques horaires sous un abri à 1,5 mètre du sol, dont la relation (28) est fonction des valeurs minimale, maximale et du temps. Ce dernier facteur nous indique le comportement horaire du soleil réchauffant l'atmosphère par l'intermédiaire de la surface de la terre car celle-ci stocke et réémet la chaleur par rayonnement et par convection. La propagation de cette chaleur est alors assurée par la diffusion due aux turbulences créées par le vent. La température varie également en fonction de la couverture nuageuse. Néanmoins, dans notre étude, la journée de calcul est bien claire, où la température tend à s'élever parce que le rayonnement direct est plus important. Le minimum des températures est rencontré au petit matin, juste avant le lever du soleil sous l'influence du rayonnement diffus (figure2). A l'inverse, la terre et donc l'atmosphère, se refroidiront davantage la nuit par rayonnement infrarouge vers la voûte céleste (figure1.).



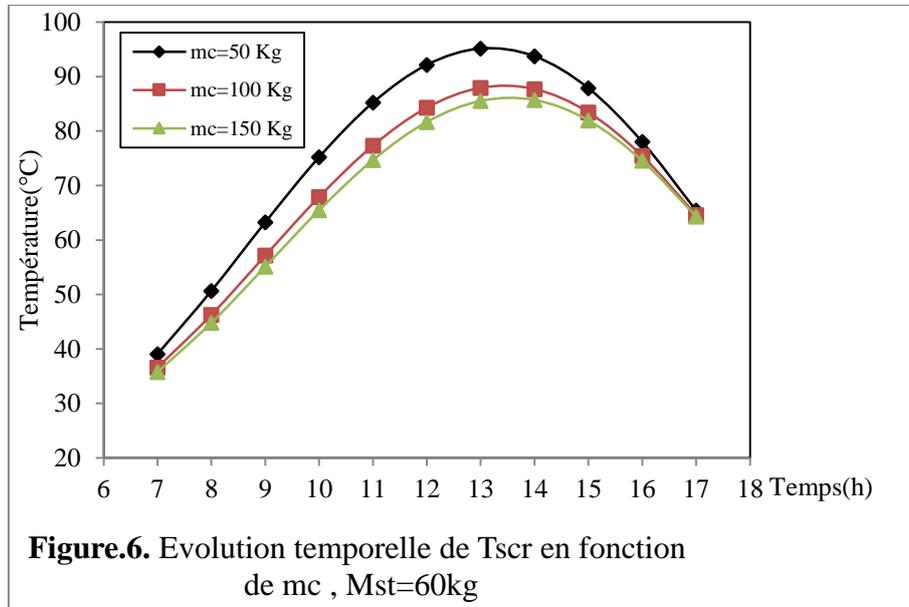
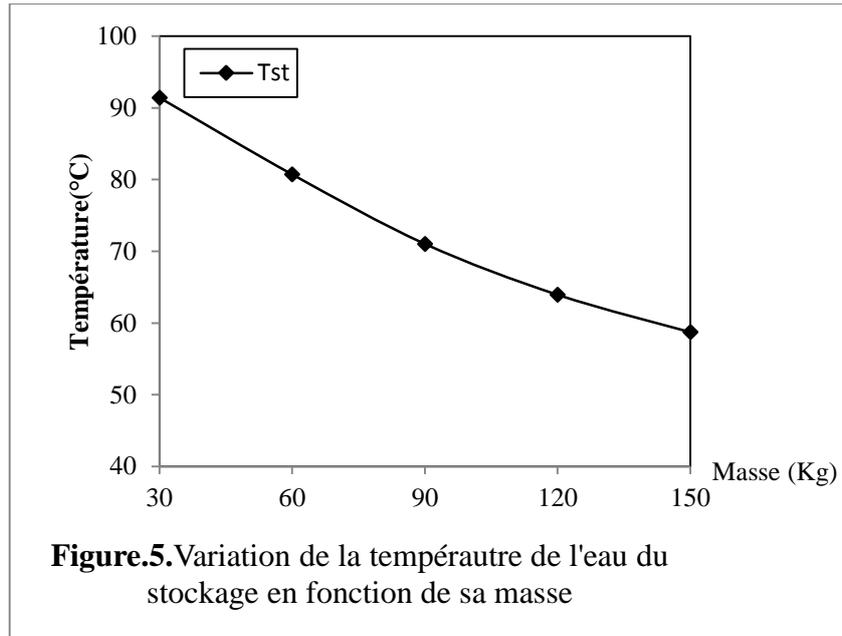


On remarque à travers la figure 3 que l'éclairement global ainsi que le flux direct incident sur la surface du capteur solaire varie, au cours du temps, en fonction de la position du Soleil donc ils sont proportionnels à la hauteur du soleil, et ils atteignent leurs valeurs maximales à midi et leurs valeurs minimales au lever et au coucher du soleil. Par contre, le flux diffus reste à des valeurs inférieures à celles du flux direct, parce qu'il est diffusé dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère avant d'atteindre la terre, d'où il rencontre dans sa direction des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière. Le flux diffus atteint son maximum à midi ; il est aussi proportionnel à la hauteur du soleil, où cette dernière nous permet de calculer le coefficient de transmission selon la relation ($t_{0_{dif}}$ et $t_{0_{dir}}$).

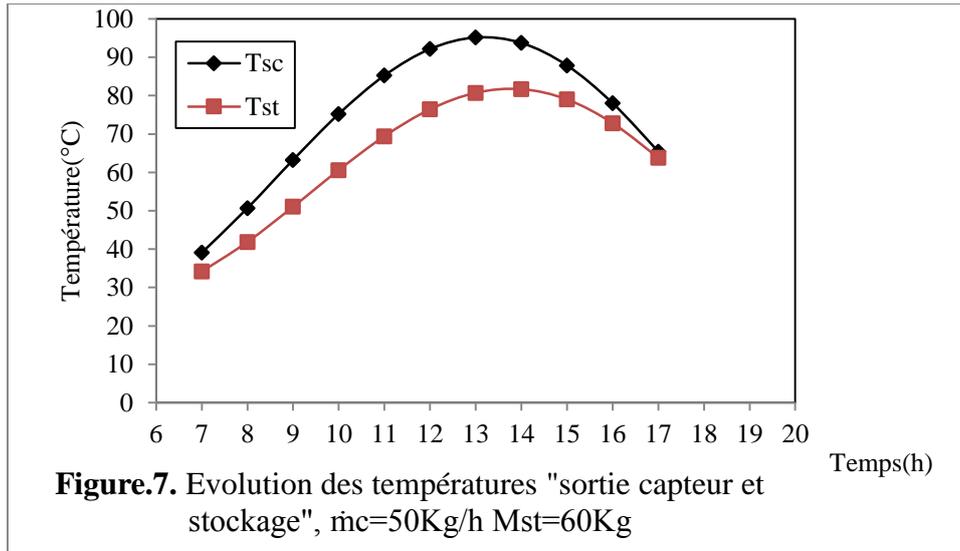




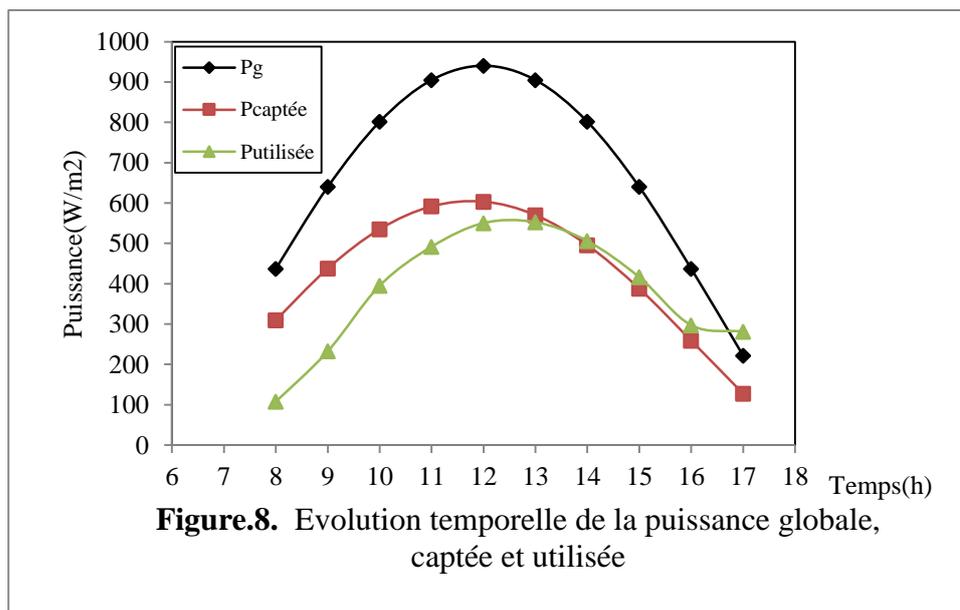
La température de l'eau de stockage est calculée pour un modèle de stockage brassé en supposant que l'eau du ballon est une quantité d'un mélange parfait et instantané. De ce fait, la stratification n'est pas présente. Nous considérons une séquence durant laquelle la masse du ballon passe de 30 Kg à 120 Kg, et toutes les autres entrées sont constantes. La température d'alimentation d'eau saumâtre équivaut 25°C. La température de l'eau, après récupération, est supposé constante. La température extérieure pour le calcul des pertes du ballon est égale à la température ambiante. Selon la figure 4, la température de l'eau de stockage est inversement proportionnelle à la masse du ballon « Mst ». La figure 5 montre, par contre, que la température de l'eau de stockage diminue nettement si la masse d'eau augmente. Cette température atteint son maximum à 13 heures pour la faible masse d'eau, mais cela ne signifie pas un bon rendement de l'installation dont il peut être obtenu avec l'augmentation de la grandeur « $Mst \cdot C_p \cdot \Delta T$ », où cette dernière augmente lorsque « Mst » augmente car le stockage risque d'être saturé. On remarque aussi qu'à 17 heures, la température de stockage pour la masse de 30 Kg chute plus vite et reste inférieure à celle correspondante aux autres masses qui ont une faible différence. Donc on peut conclure que la masse optimale du ballon de stockage est $Mst = 60$ Kg, où la température du stockage atteint des valeurs maximales entre 11 heures et 16 heures.



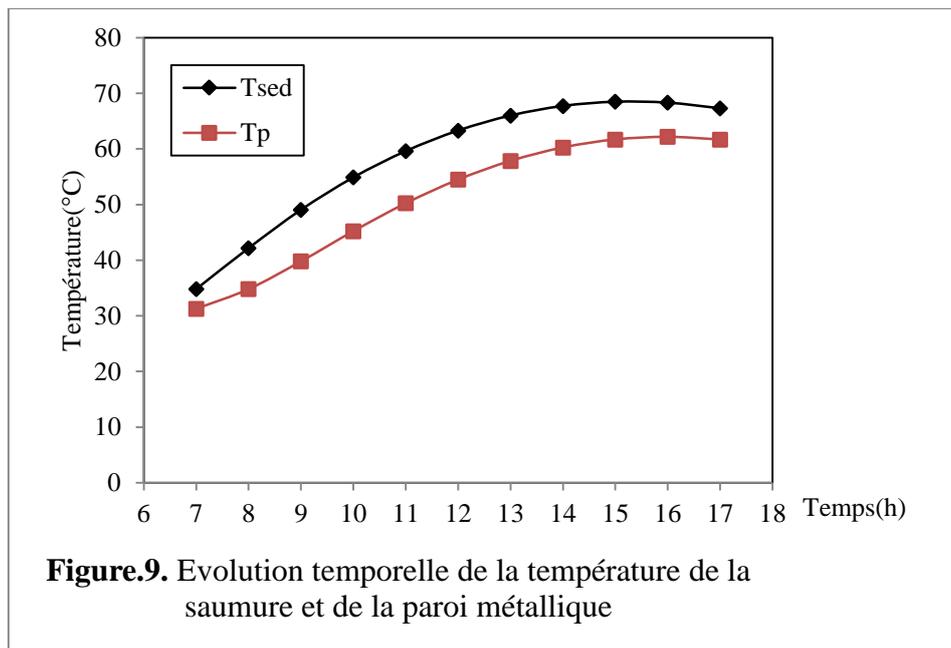
La figure 6 montre une variation paramétrique de la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur solaire, où une température maximale est obtenue pour un débit de 50 kg après 9.00 heures. Une égalisation de cette température est obtenue, pour « $\dot{m}_c = 100$ et 150 kg », et les températures continuent d'augmenter tant qu'il y a du flux solaire malgré une diminution du débit considéré en fin de journée. Donc on peut dire qu'augmenter le débit du fluide caloporteur « \dot{m}_c » n'est pas à envisager dans ce cas. Alors un débit de 50 Kg/h est considéré comme une valeur optimale pour nos calculs.



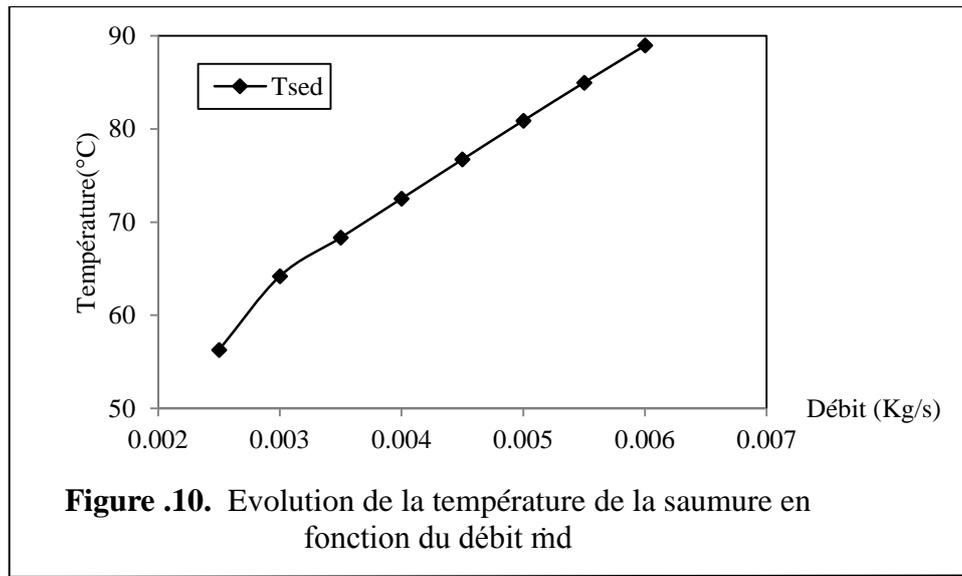
La figure 7 montre l'évolution de la température de l'eau de stockage et celle à la sortie du capteur solaire qui est similaire à celle de l'énergie globale incidente qui est considéré, d'après les équations appropriées, comme normal, où à chaque heure Tsc dépasse Tst. Ceci est logique car l'eau de stockage est alimentée et chauffée par le débit d'eau sortant du capteur solaire. A 17.00 heures, les deux températures s'égalisent et atteignent leurs valeurs maximales, ensuite la température du ballon de stockage « Tst » commence à dépasser celle correspondant la sortie du capteur « Tsc ». Cela peut être expliqué par le refroidissement du fluide caloporteur, dû à l'atténuation du rayonnement solaire global incident, tandis que le ballon de stockage garde la chaleur à une haute température. Une étude expérimentale réalisée sur le stockage sensible a prouvé qu'on peut avoir une durée de stockage de 10 heures [41]. On remarque que la valeur maximale est obtenue à 14 heures pour une masse de stockage égale à 60 kg, ce qui nécessite la mise en place d'une vanne pour stopper l'eau qui vient du capteur solaire et qui peut refroidir l'eau du stockage.



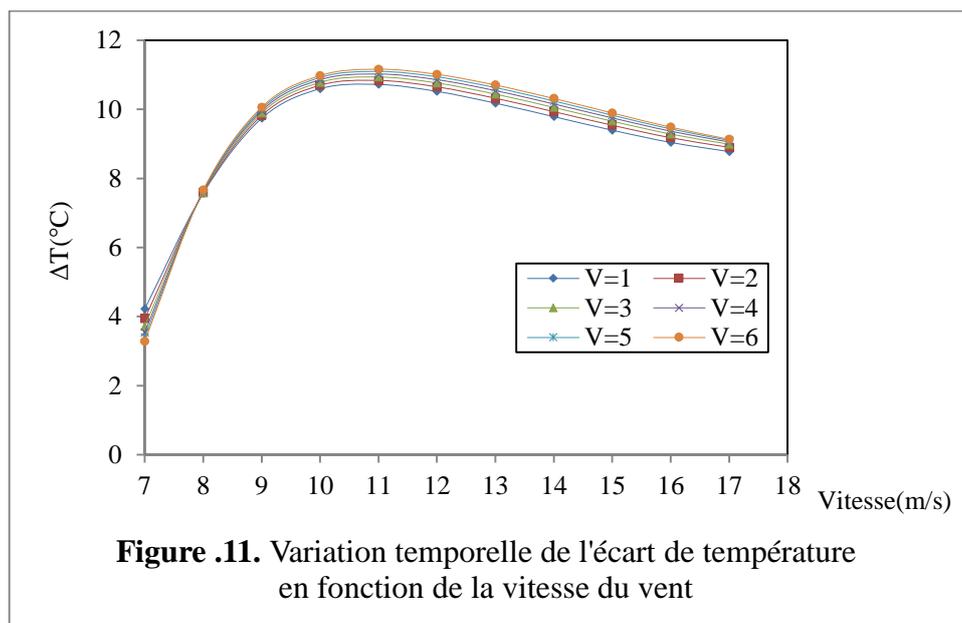
D'après la figure 8 on constate que la puissance captée et utilisée est inférieure à la puissance globale incidente. Dans la matinée, la puissance utile pour chauffer la saumure est inférieure à celle captée, puis elle l'égalise à 14.00 heures, ensuite elle la dépasse. Egalement, et durant cette période les deux puissances ont la même allure que l'on peut interpréter par l'existence d'une forte liaison entre elles. Après 16.00 heures, la puissance utile change de sens pour rester presque constante, ce qui signifie que le distillateur reçoit de la chaleur directement de l'énergie stockée dans le ballon d'eau. Ce phénomène peut être interprété comme suit : avant 16.00 heures, la température de l'eau du ballon varie en fonction du rayonnement incident, et au-delà de cette heure le ballon garde au maximum la même température de l'eau de stockage.



La figure 9 nous donne la température de la saumure (T_{sed}), et celle de la paroi métallique (T_p). Un écart de la température existe entre les deux, il est considéré comme un paramètre essentiel pour produire de la vapeur d'eau, dont cette dernière engendre de l'eau distillée, où la production horaire est représentée dans la figure 13. On peut expliquer l'évolution des températures par l'existence du rayonnement solaire. Le débit d'eau s'écoulant dans l'échangeur de chaleur, type « tube » provoque l'échauffement de la saumure dont la température de cette dernière en dépend, et où la figure 10 nous indique que l'augmentation du débit d'eau sortant du ballon de stockage favorise l'évaporation de la saumure avec une température élevée, issue d'une surface d'échange élevée, ce qui réchauffe systématiquement la paroi métallique. La figure 10, montre l'évolution de la température de la saumure en fonction du débit d'eau « md » circulant dans l'échangeur de chaleur où une température maximale est obtenue pour une grande quantité d'eau, mais cela ne signifie pas qu'on pourrait avoir cette valeur qui est liée directement aux dimensions de l'échangeur et à la quantité de la saumure existante dans le bac, car un grand débit « md » provoque l'encombrement et le dysfonctionnement de l'installation, dû la diminution de la surface d'évaporation.



La figure 11 montre que l'évolution de l'écart de température entre la saumure et la paroi métallique est une fonction croissante et ce depuis 7.00 heures jusqu'à midi, et cet écart commence ensuite à diminuer tout doucement jusqu'à ce qu'il devienne presque stable. Cela peut être expliqué par l'échauffement évolutif de la saumure dû à l'intensité du rayonnement solaire, et où cet échauffement se stabilise, par la suite grâce à la régularité de la température de l'eau venant du ballon de stockage et qui alimente l'échangeur de chaleur. La figure ci-dessous montre aussi une variation paramétrique de l'écart de température en fonction de la vitesse du vent, dont l'influence est presque négligeable et que les résultats sont aussi confirmés par la figure 12.



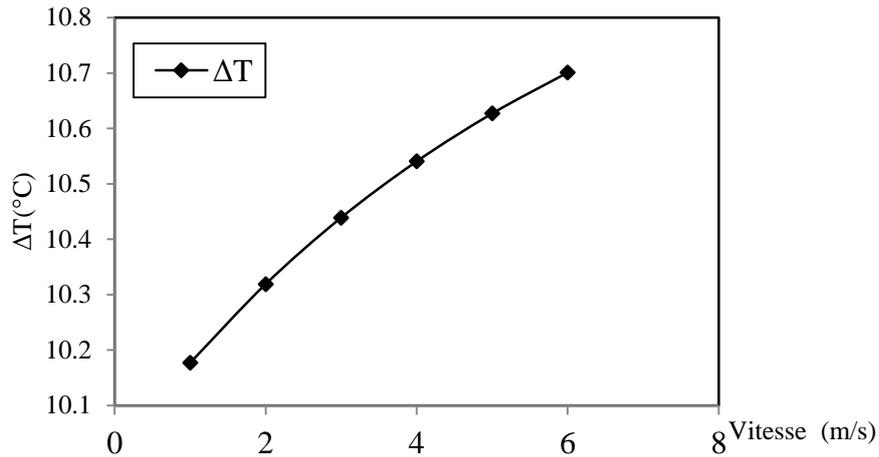


Figure.12. Variation de l'écart de température entre la saumure et la paroi métallique en fonction de la vitesse du vent

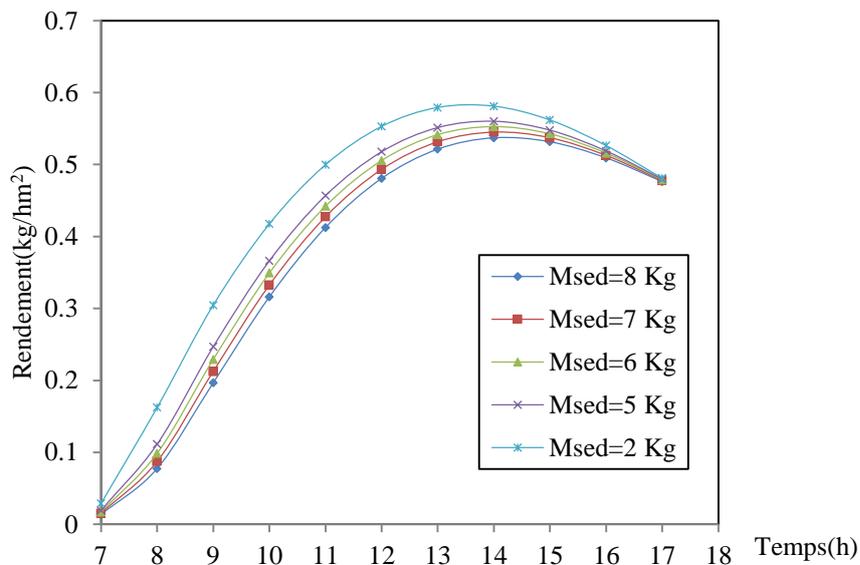
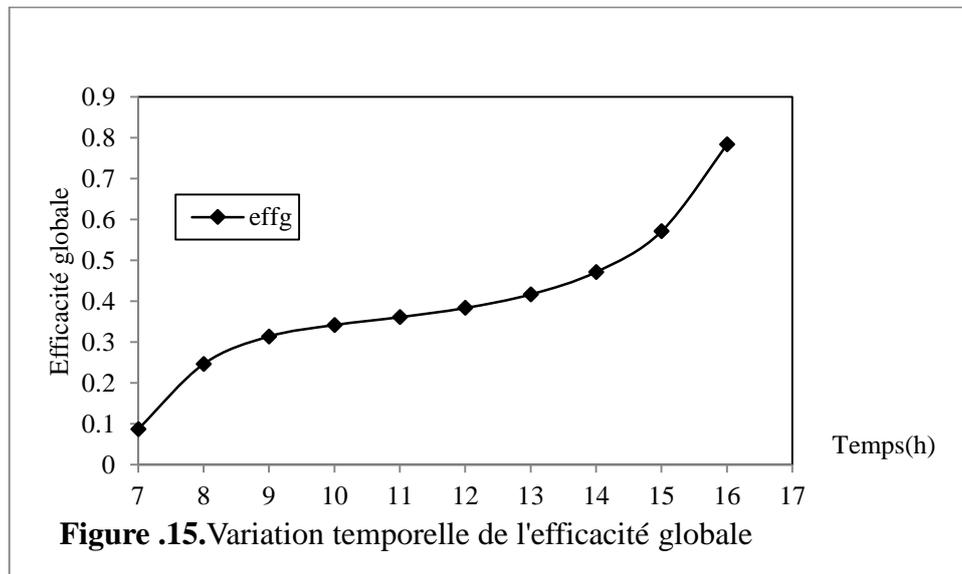
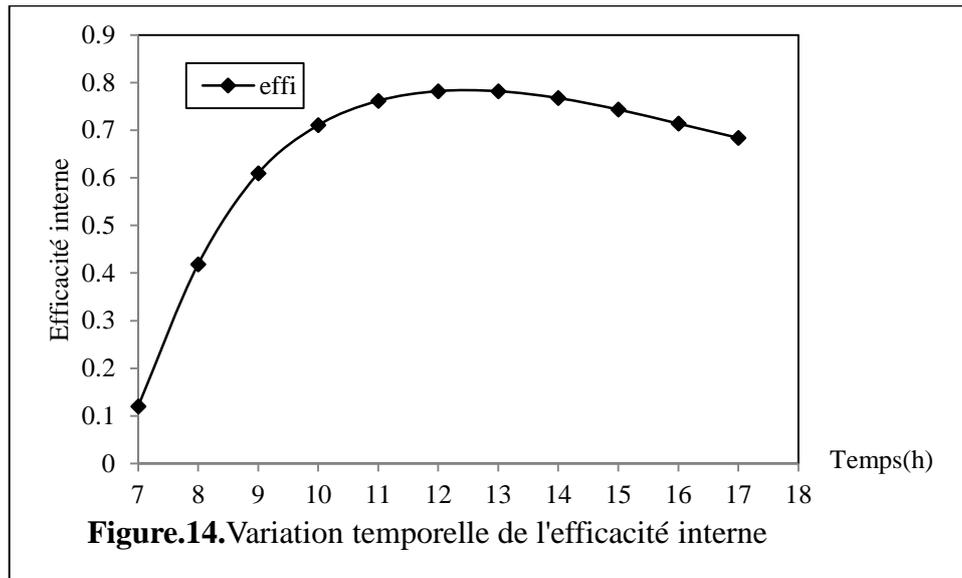


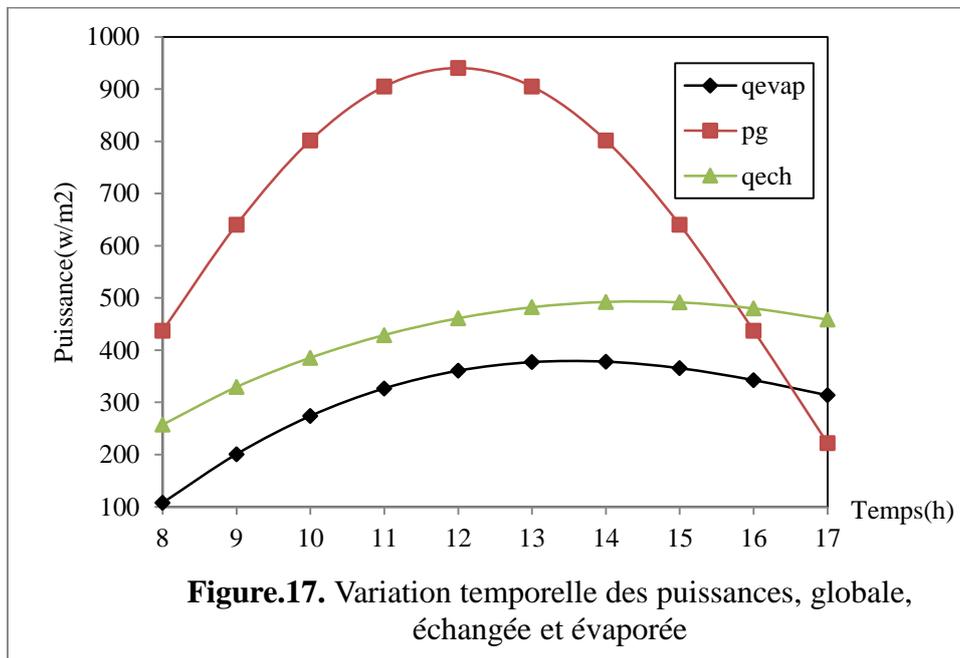
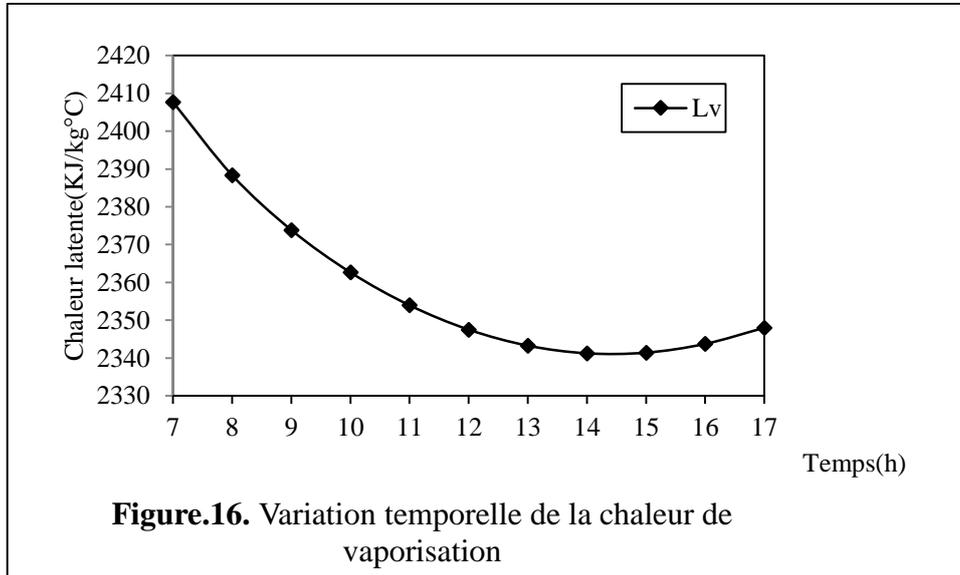
Figure.13. Evolution temporelle du rendement en fonction de la masse d'eau

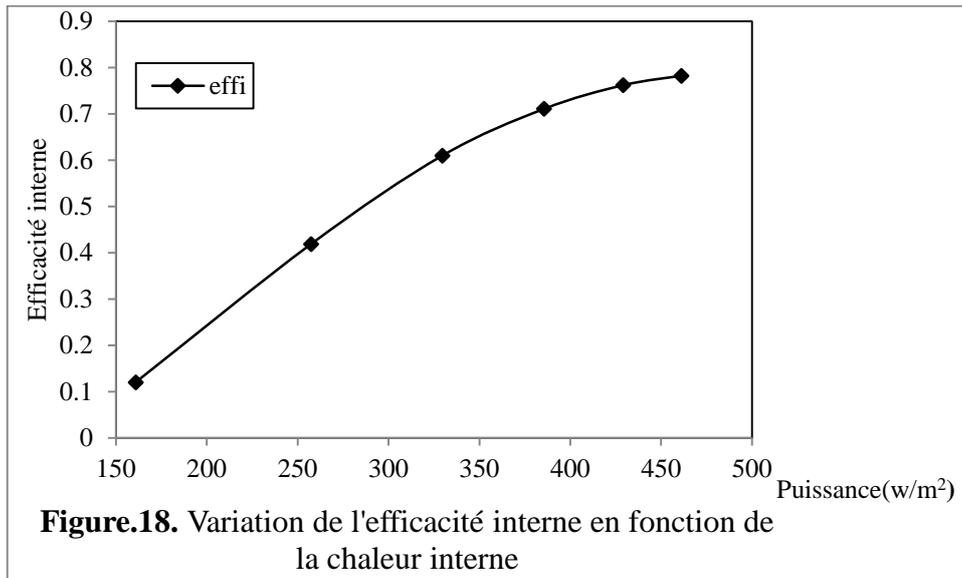
L'évolution temporelle du rendement représenté dans la figure 13, apparaît bonne et encourageante pour une réalisation de notre prototype théorique, car la quantité de l'eau distillée ne cesse d'augmenter pour atteindre une valeur de 0,58 litres à 14.00 heures, puis après, cette quantité diminue et reste presque constante. Le meilleur rendement est obtenu par une faible masse d'eau (2 Kg) en début de journée. Par contre, la production s'égalise pour d'autres quantités supérieures à 2 Kg. A cet effet et pour éviter le dépôt rapide des sels dans le bac du distillateur ainsi que l'échangeur ne soit pas découvert, on opte pour une masse d'eau un peu plus grande.



On remarque que les figures 13, 14 et 15 correspondantes respectivement à la variation temporelle du rendement, de l'efficacité interne et globale et qui ont presque la même allure mathématique, nous montrent que le rendement augmente et atteint sa valeur maximale de 0,56 litre à 14.00 heures, pour cinq litres de saumure. Cela peut être expliqué par une meilleure quantité d'énergie évaporée à la même heure, ainsi qu'une faible quantité de la chaleur latente de vaporisation (voir figure16). Concernant l'efficacité interne, on remarque clairement son influence par respectivement l'énergie solaire incidente, l'énergie évaporée et celle cédée par l'échangeur de chaleur. L'efficacité interne augmente jusqu'à midi puis après elle commence à diminuer légèrement malgré que la puissance globale chute considérablement après 13.00 heures. Dans ce cas, la faible diminution de l'efficacité interne est due à l'énergie évaporée qui continue à augmenter puis commence à diminuer timidement. L'efficacité globale, qui est proportionnelle à l'énergie

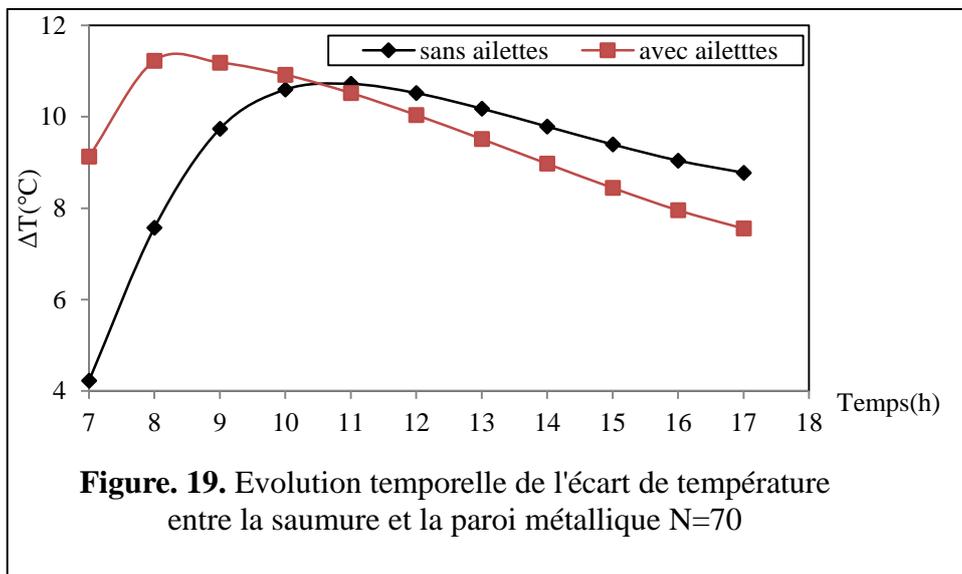
évaporée et est inversement proportionnelle à l'énergie globale incidente, elle augmente également et continue à évoluer positivement pour atteindre son maximum après 16.00 heures, où la quantité de l'énergie évaporée dépasse la puissance globale (figure 17). L'efficacité interne progresse aussi avec la chaleur reçue par l'échangeur et ainsi cédée à la saumure (figure18).



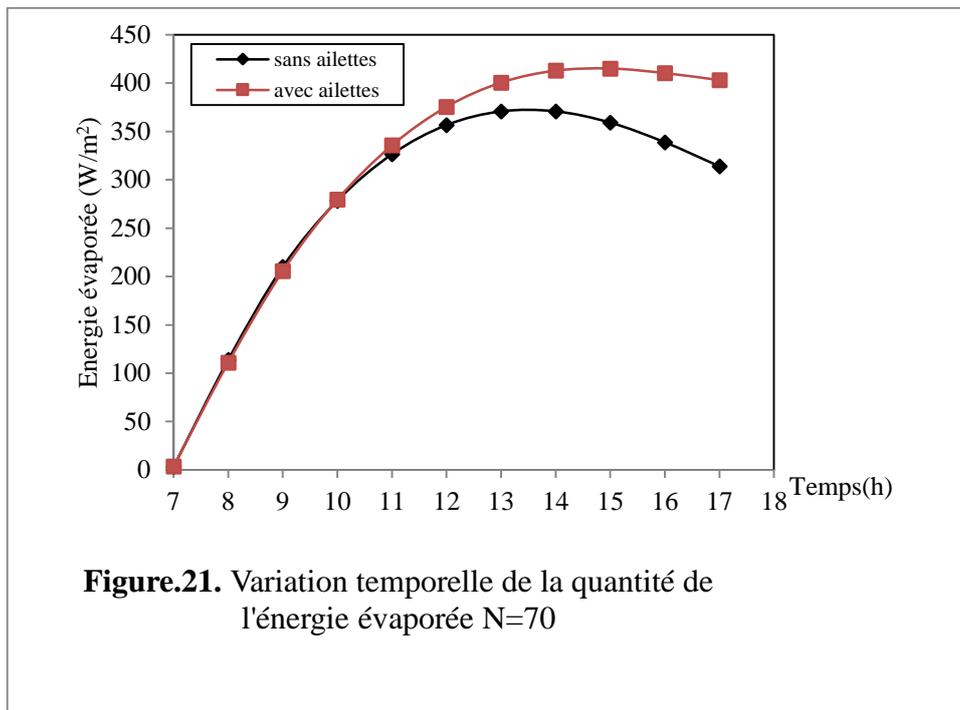
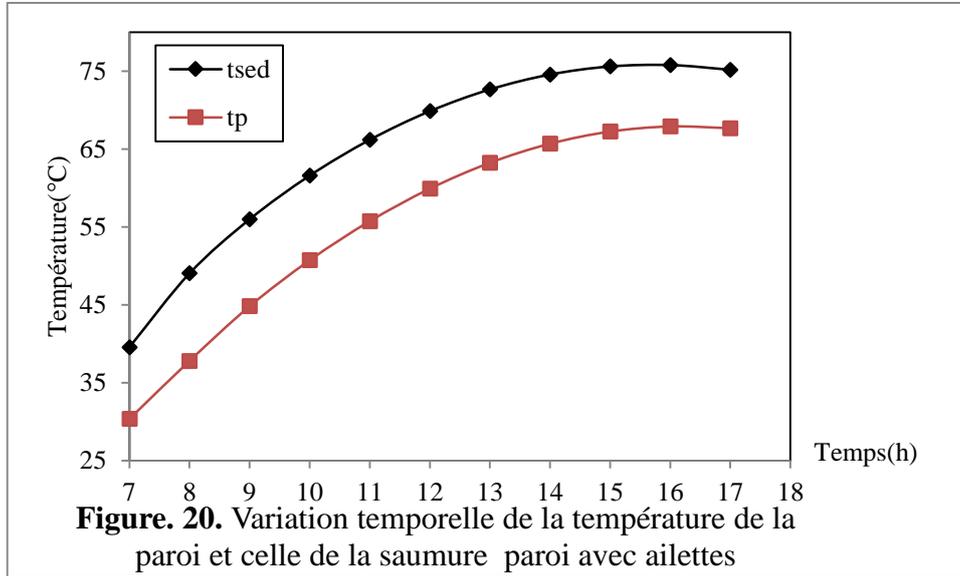


- Paroi à ailettes

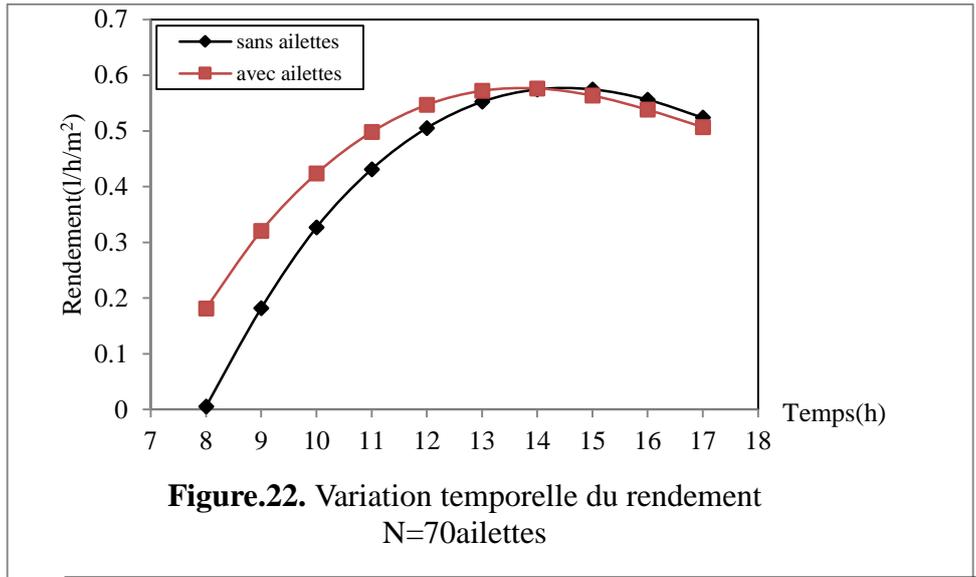
La production journalière du distillateur solaire simple et à effet de serre, est liée à l'écart de température entre la saumure et la paroi de condensation. Elle peut, néanmoins, s'améliorer si cet écart augmente. En effet, agrandir cet écart dépend essentiellement de l'augmentation de la température de la saumure, ou de la diminution de la température de la paroi, où pour notre cas nous avons opté pour la seconde solution, c'est à dire diminuer la température de la paroi en ajoutant des ailettes sur sa face extérieure afin d'obtenir un écart supérieur à celui trouvé avec le distillateur à paroi sans ailettes. D'après la figure 19, montrant l'évolution temporelle de cet écart, on constate que ce dernier dépasse fortement celui de la paroi sans ailettes et ce jusqu'à 10.00 heures, au delà de cette heure, l'écart diminue pour atteindre des valeurs inférieures.



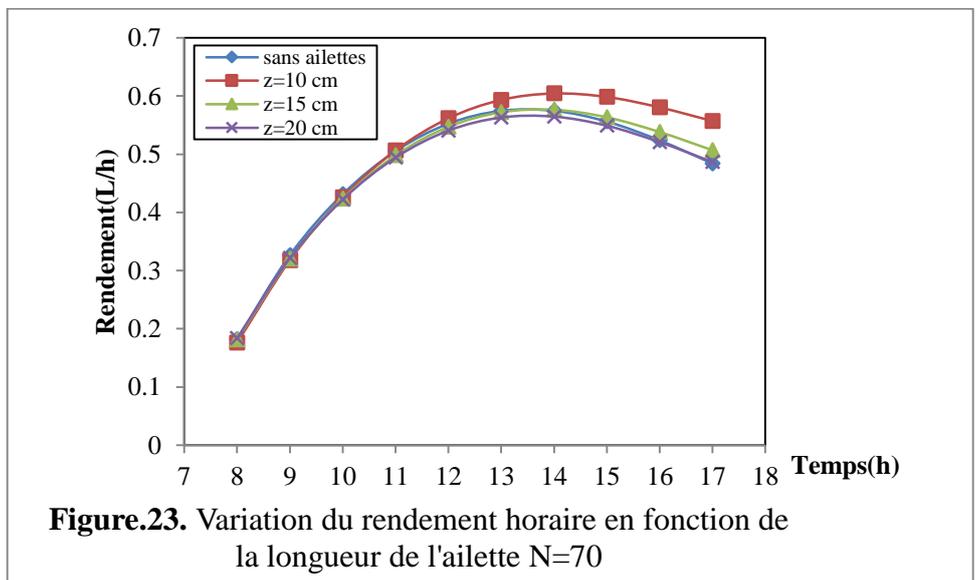
La figure 20 montre l'évolution temporelle de la température de la saumure et celle de la paroi métallique à ailettes, d'où on remarque que cette évolution est simultanément croissante. Ce phénomène peut être dû à l'augmentation de l'énergie évaporée (selon la figure 21), et pourtant, l'écart de température existe toujours durant toute la journée.



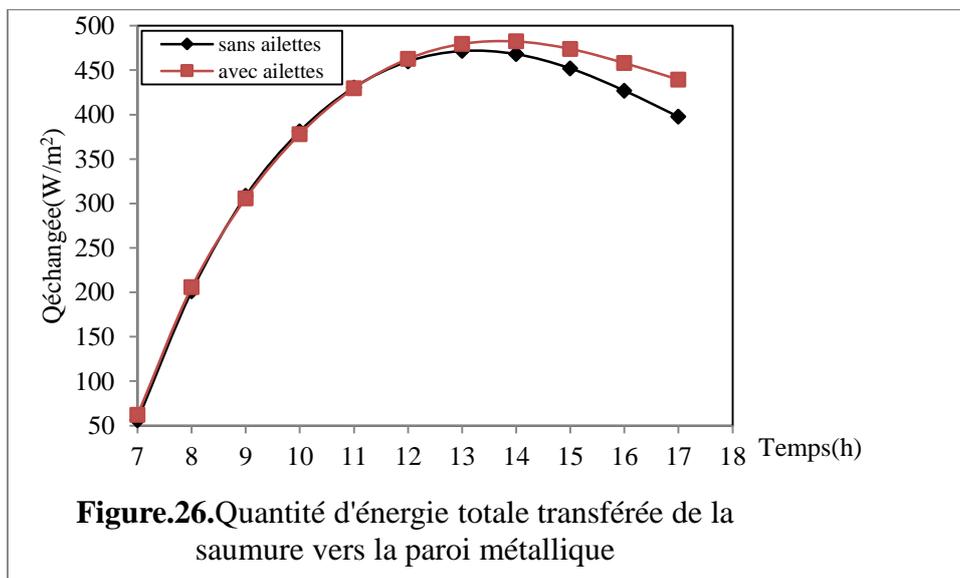
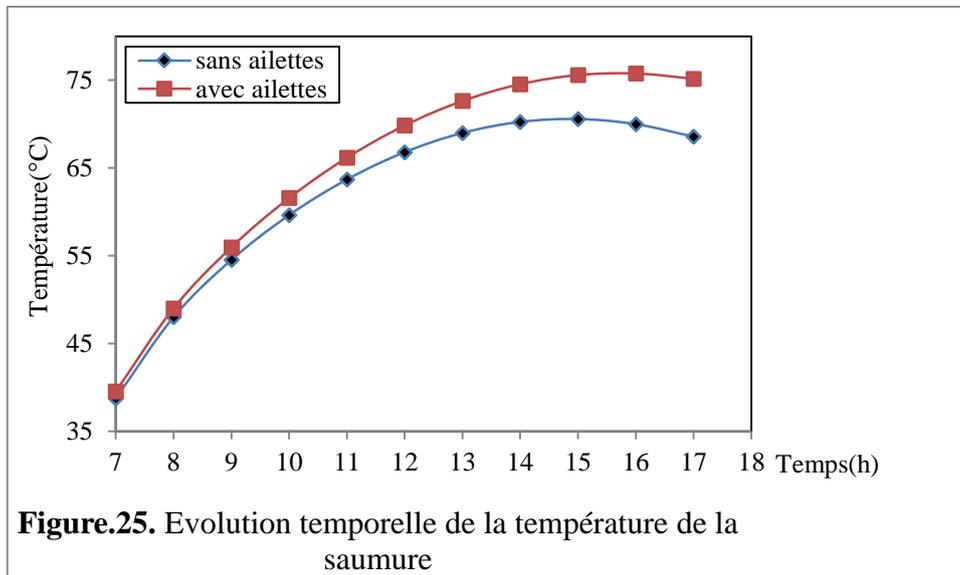
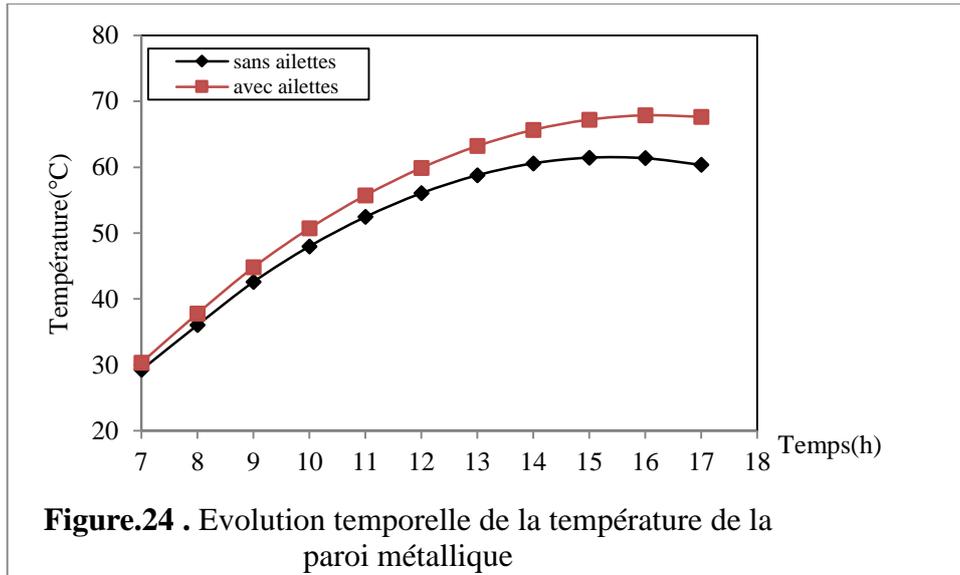
A travers la figure 22, on peut constater l'amélioration remarquable du rendement horaire du distillateur solaire avec une paroi à ailettes, et où une légère diminution est constatée après 14.00 heures.



La figure 23, montre que le rendement horaire du distillateur ne s’améliore pas avec l’augmentation de la longueur de l’ailette, où on trouve une certaine similitude au niveau des résultats si on augmente cette grandeur. Donc, on peut conclure qu’une longueur de 10 cm qui est considérée comme valeur optimale, donne un meilleur rendement horaire.



La figure 24, montre l’augmentation horaire de la température de la paroi à ailette, où une telle augmentation peut être due à une augmentation de la température de la saumure (figure 25), et ce grâce à la quantité d’énergie gagnée par cette dernière et celle perdue vers la paroi de condensation. Selon la figure 26, nous pouvons constater une raisonnable amélioration de ces résultats, comparés à ceux obtenus avec une paroi de condensation sans ailettes.



La figure 27, nous montre la variation horaire de la chaleur latente de vaporisation, qui est une fonction décroissante durant la journée. Une importante différence a été obtenue, en termes de valeurs, entre une paroi à ailette et une paroi sans ailettes, d'où on peut interpréter ce phénomène par la croissance de la température de la saumure dont la chaleur latente de vaporisation en dépend, suivant la formule (16' p33).

La diminution de cette dernière a vraiment favorisé l'amélioration du rendement horaire représenté dans la figure 23, et calculé par la relation (16 p33). L'augmentation de l'énergie transférée vers le milieu extérieur schématisée par la figure 28, nous a permis de constater également que l'emplacement des ailettes sur la surface métallique favorise l'augmentation de la chaleur de condensation sur cette dernière et automatiquement la production horaire d'eau distillée.

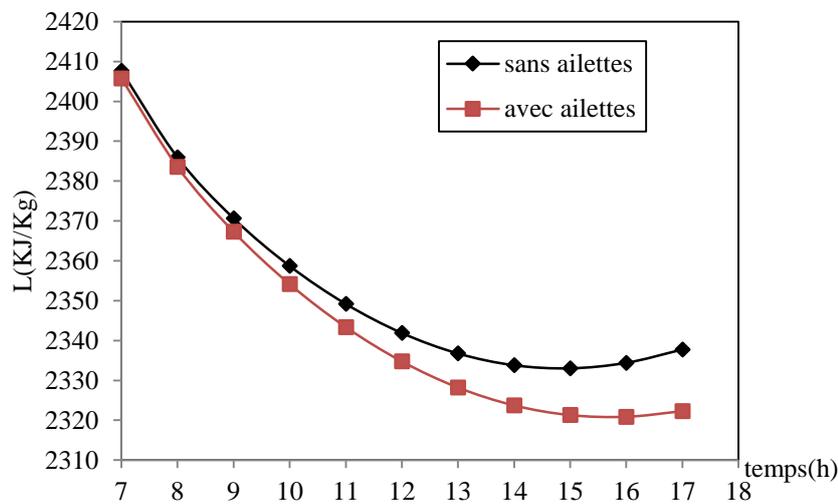


Figure.27 . Evolution temporelle de la chaleur latente de vaporisation

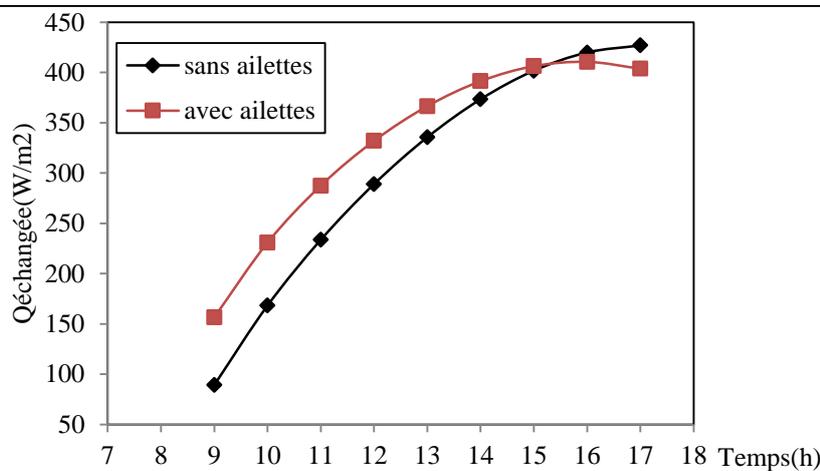
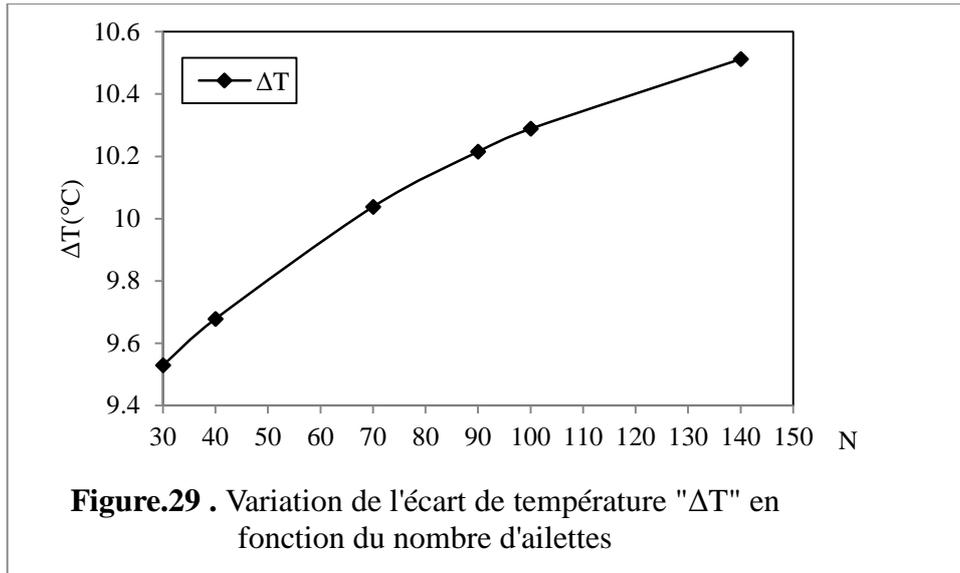
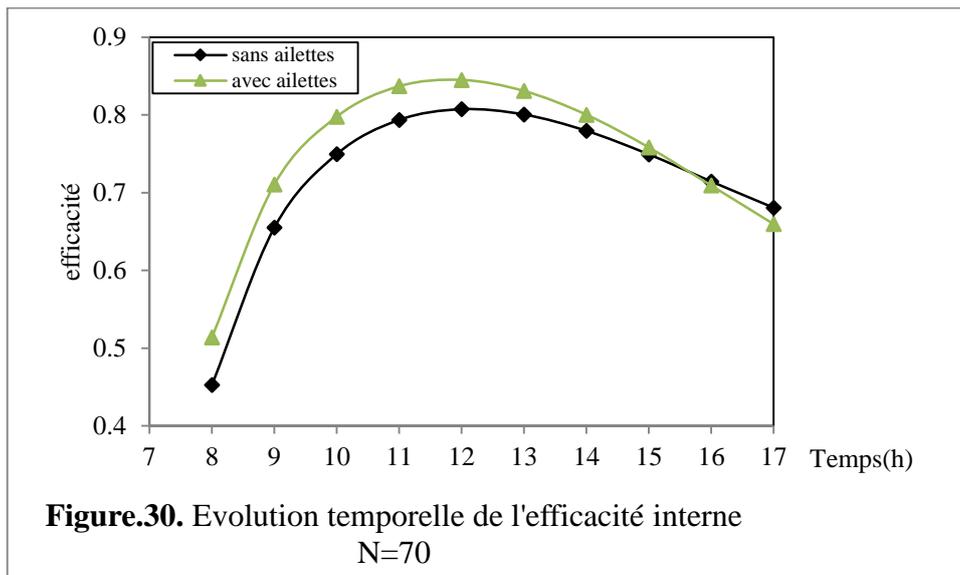


Figure.28 . Quantité d'énergie transférée de la paroi vers le milieu extérieur

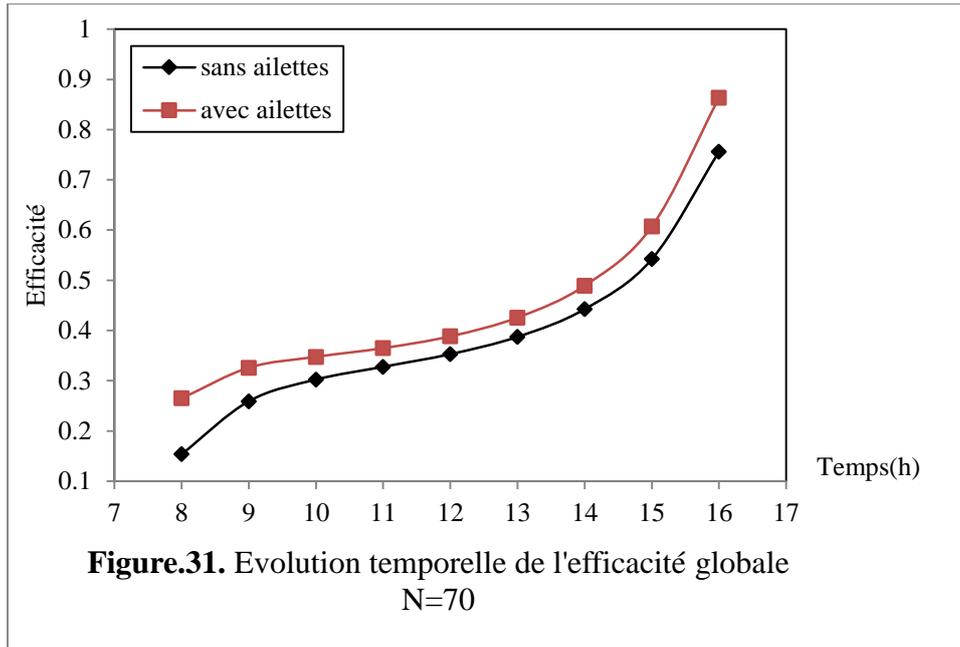


D'après la figure 29, on constate que l'écart de température ΔT est proportionnel au nombre d'ailettes, dont on peut fixer un nombre optimal de 70 ailettes, car au delà de ce nombre, l'écart varie très faiblement.



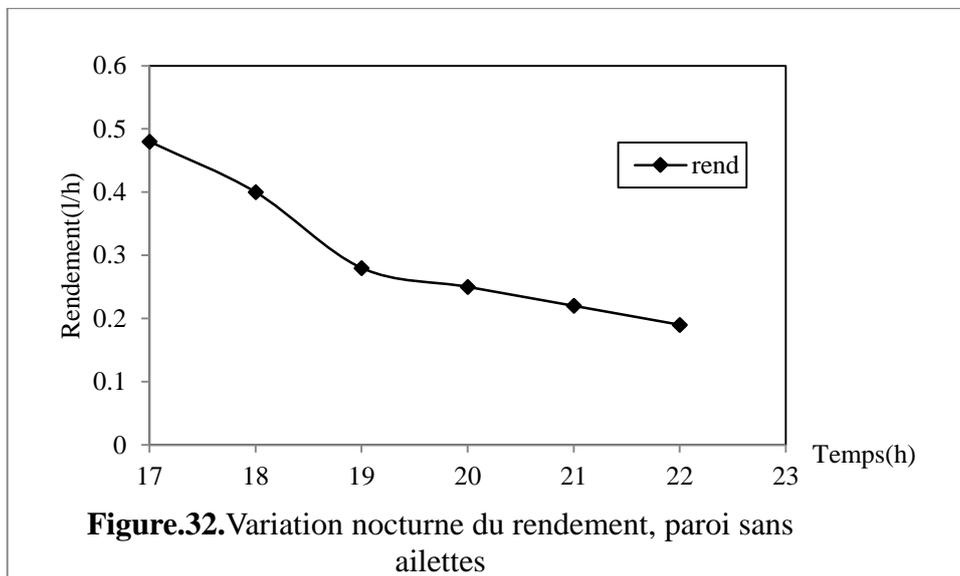
On peut remarquer, à travers la figure 30, la faisabilité de notre modèle dont l'efficacité journalière dépasse celle trouvée pour un distillateur solaire à paroi sans ailettes. Ce résultat est lié à la température de la saumure et à celle de la paroi et à l'énergie évaporée.

Concernant la figure 31, qui représente l'efficacité globale pour une paroi à ailettes est représentée, on voit clairement que celle ci varie de la même façon que celle à une paroi sans ailettes, mais avec un certain dépassement. Cela est logiquement dû à l'amélioration de la quantité d'énergie évaporée.

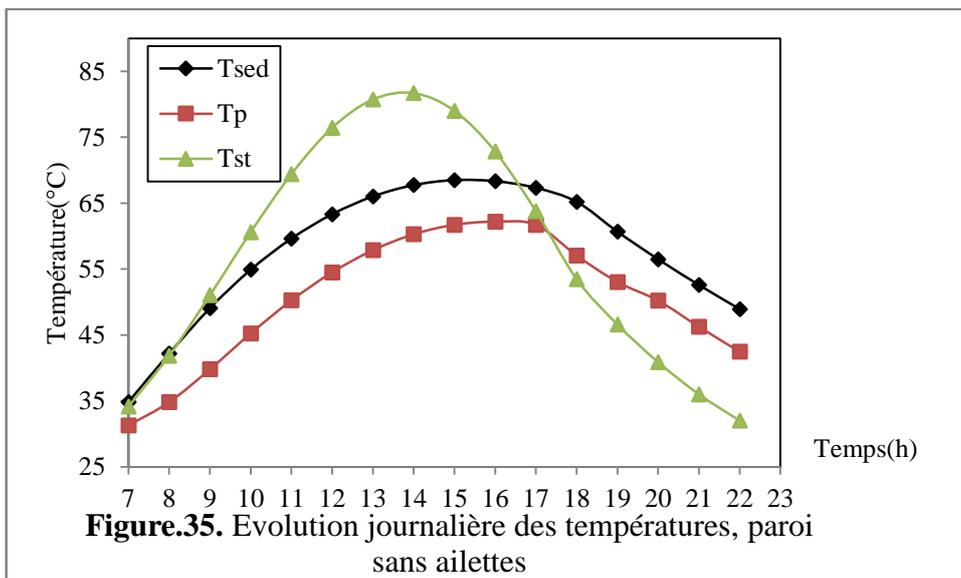
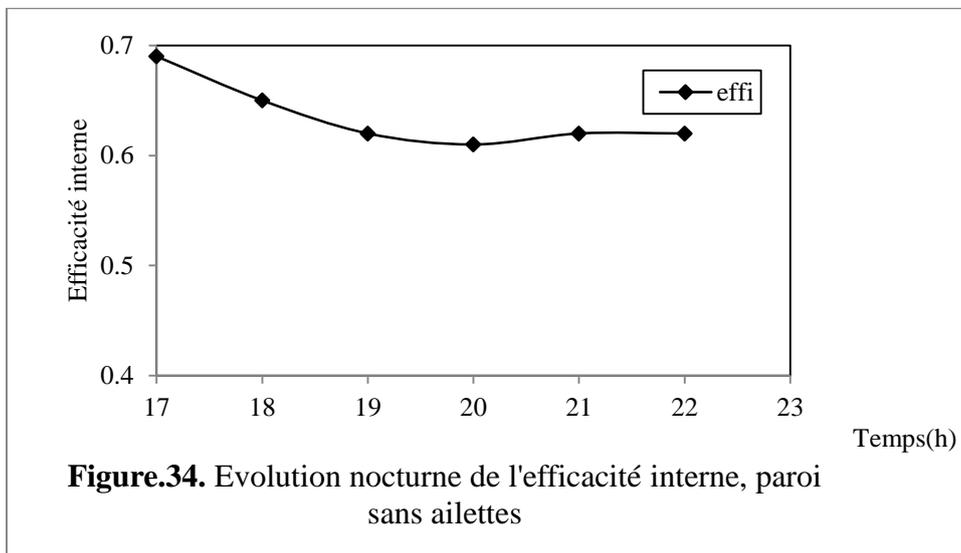
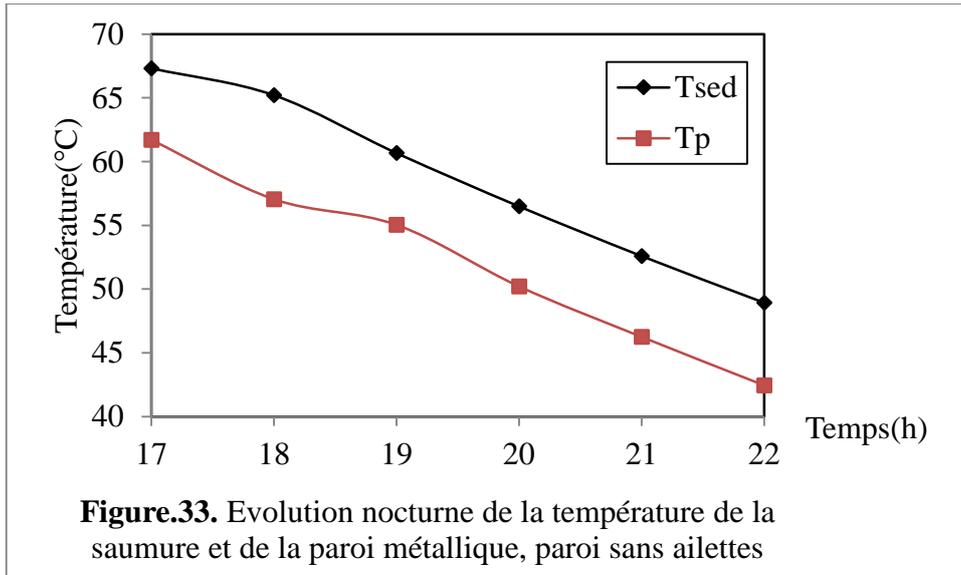


- Résultats nocturnes

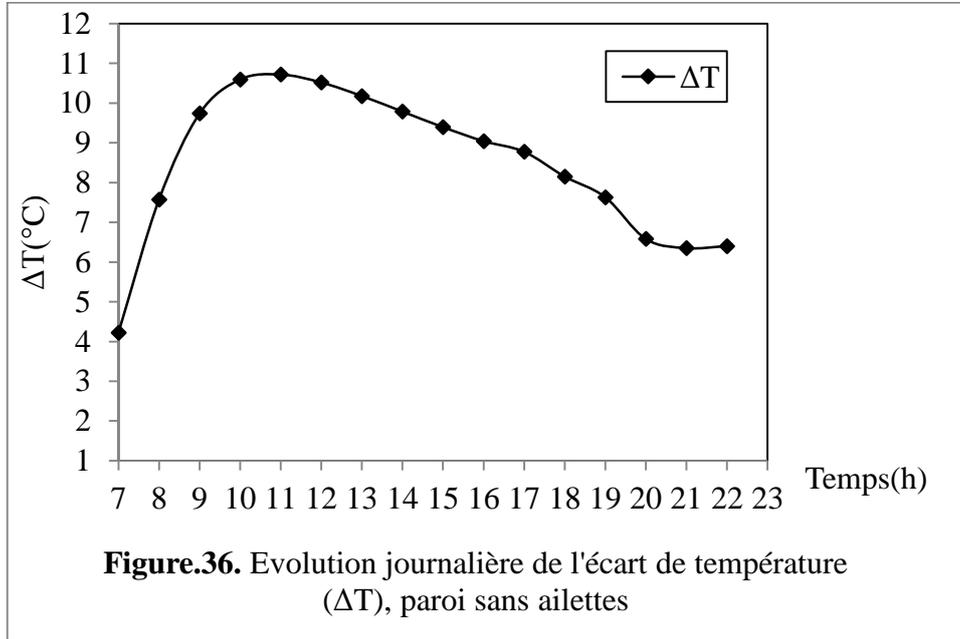
D'après la figure 32, on constate l'existence d'une production durant la nuit. Néanmoins, cette production commence à se dégrader vu la baisse de la température de la saumure, qui est dû par un refroidissement de la température de l'eau du stockage.



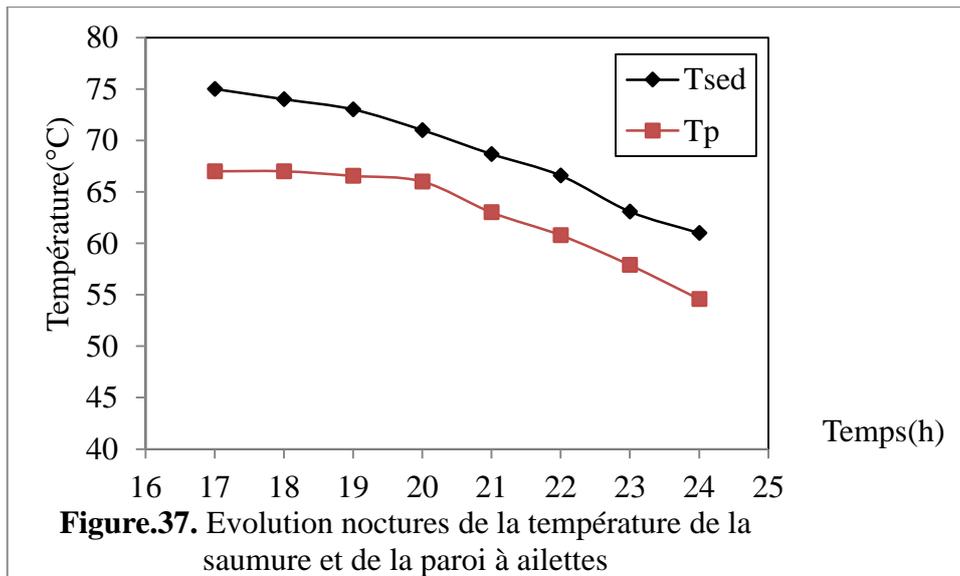
A travers la figure 33, on remarque une chute apparente de la température de la saumure et celle de la paroi métallique, à cause d'un rafraichissement de l'air ambiant extérieur. Un écart de température reste presque constant durant la soirée et ce à partir de 20.00 heures, où le distillateur a pu produire de l'eau distillée, tout en présentant une bonne efficacité interne, confirmée dans la figure 34.

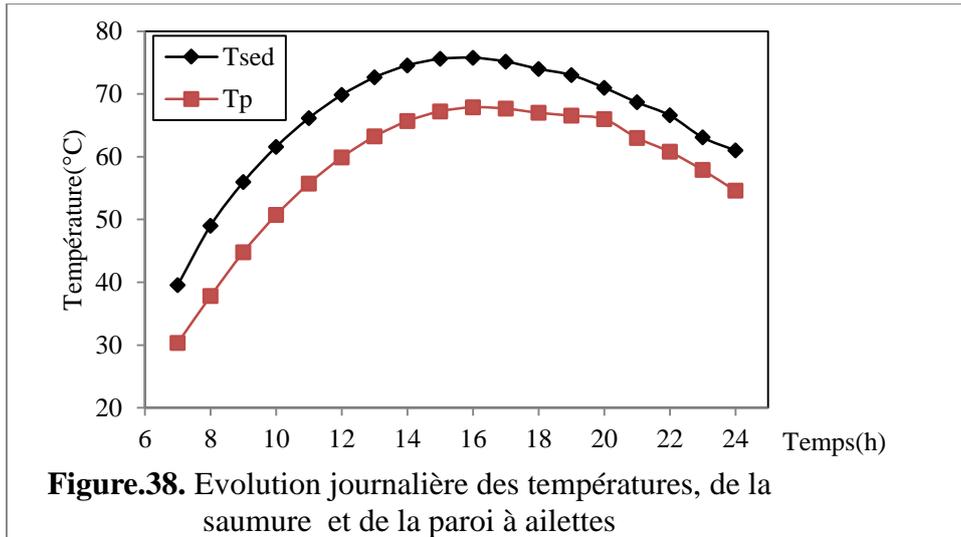


La figure 35, montre l'évolution journalière (diurne et nocturne) de la température de la saumure qui dépasse celle du ballon de stockage à 17.00 heures. Cet état nous oblige de stopper l'introduction de l'eau chaude venant du capteur solaire dans le ballon de stockage.



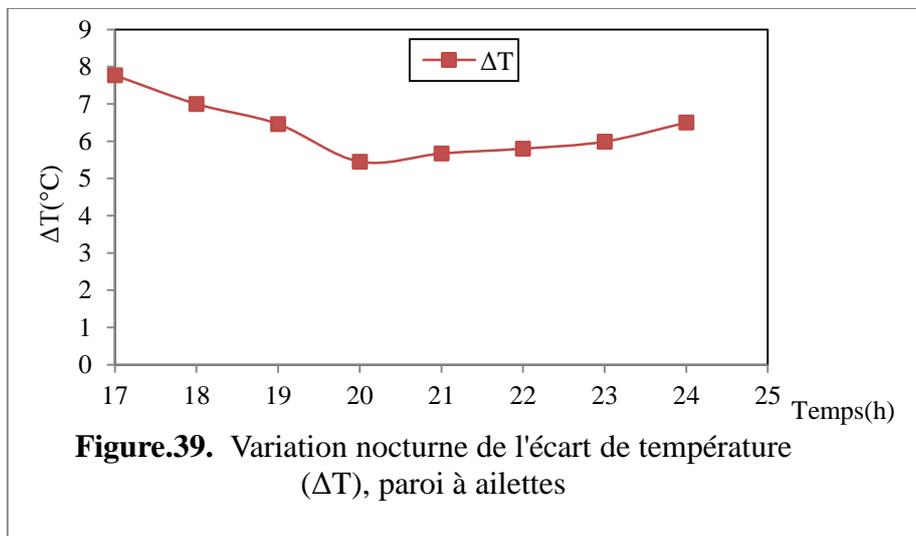
La figure 36, montre une chute considérable de l'écart de température entre la saumure et la paroi de condensation. On remarque qu'une telle chute ne provoque pas l'annulation de cet écart, ce qui permet notamment la production nocturne de l'eau distillée.



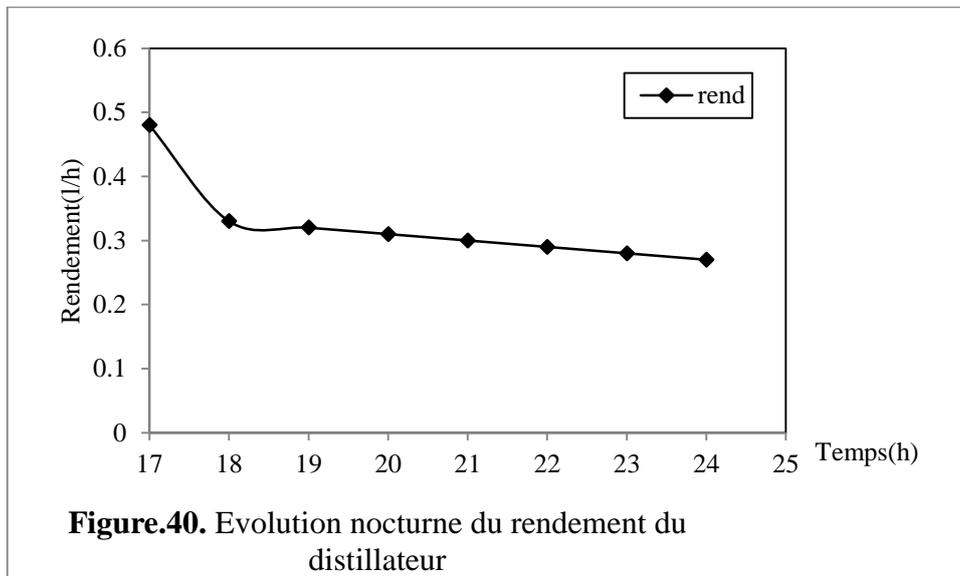


- Paroi à ailettes

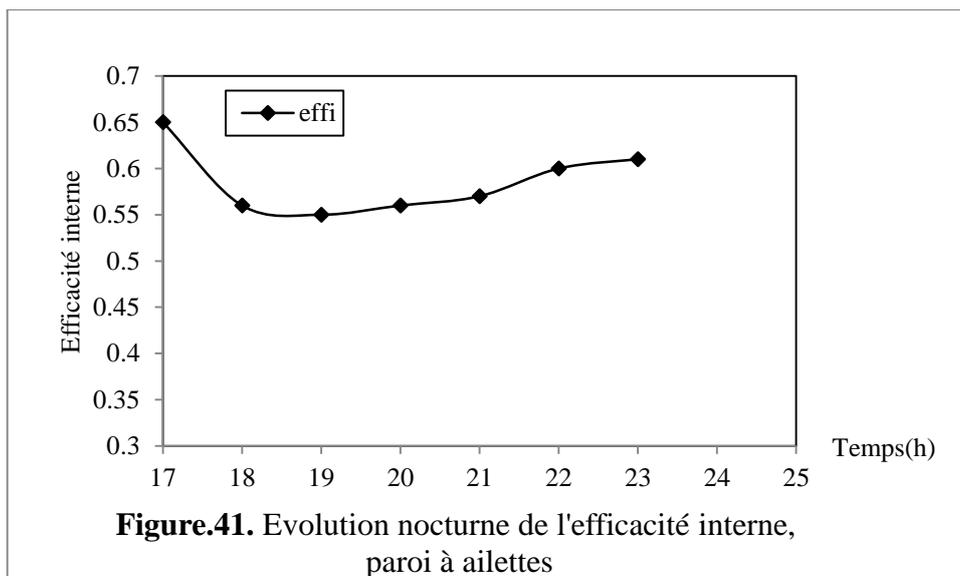
D'après la figure 37, où la paroi de condensation possède des ailettes sur sa face extérieure, on constate une diminution de la température de cette dernière ainsi que celle de la saumure. Un écart de température existe toujours mais avec une certaine dégradation durant la nuit (figure 38). Ce phénomène est illustré par la figure 39, dans laquelle, on remarque une dégradation de cet écart, puis après 20.00 heures une légère augmentation de cet écart se produit. On peut interpréter cette variation comme suit : avant 20.00 heures, la saumure s'échauffe grâce à la chaleur cédée par le tube échangeur, induisant l'échauffement de la paroi grâce à la chaleur cédée par la saumure, alors que son refroidissement est dû uniquement à la chaleur perdue vers le milieu extérieur à travers les ailettes, ce qui engendre un rapprochement entre les deux températures. Par contre, durant la nuit, on remarque une divergence entre les allures de ces deux températures, où la baisse de la température ambiante favorise notamment la chute de la température de la paroi métallique, donc l'écart de température automatiquement augmente

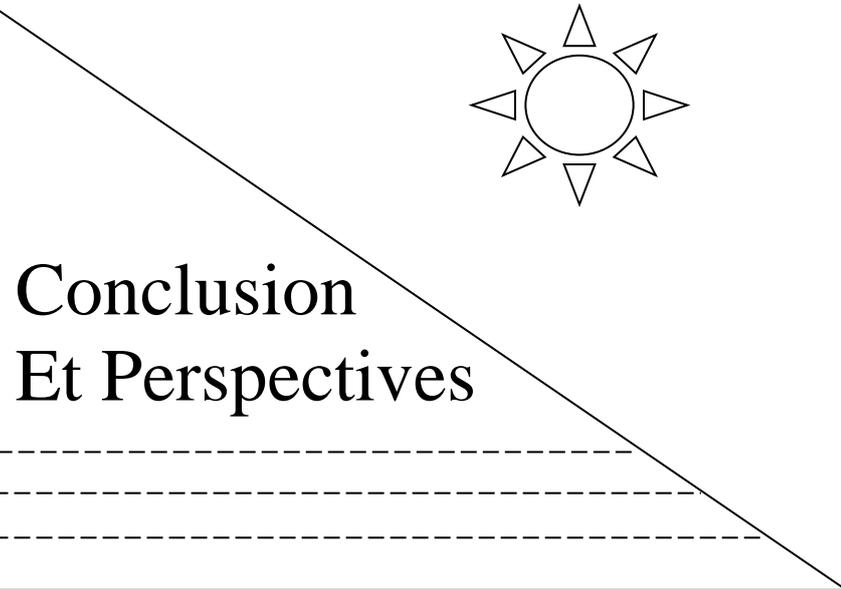
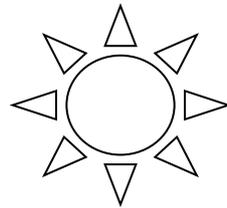


La figure 40, nous montre une dégradation du rendement nocturne, où un distillateur avec paroi à ailettes se comporte physiquement de la même manière que celui avec paroi sans ailettes. On remarque aussi que la production baisse après 17.00 heures puis après, elle diminue timidement, et les quantités de l'eau distillée sont ainsi rapprochées, où cela peut être provoqué par l'échauffement presque régulier de la saumure ainsi qu'au refroidissement de la paroi suite à la chute de la température ambiante durant la nuit. Le rendement peut atteindre la nuit une valeur de 2.58 litres.



Dans la figure 41, on remarque que l'efficacité interne se dégrade après 17.00 heures, ensuite, elle augmente pour atteindre la valeur de 61% ; cela est dû à une bonne quantité d'énergie évaporée au sein du distillateur solaire et à un écart de température compatible avec l'énergie thermique reçue par la saumure.





Conclusion et perspectives

Il est vrai que notre pays l'Algérie ne manquera pas de si tôt de ses énergies fossiles, mais nous devons nous accoutumer à l'idée que l'ère de l'abondance prendra fin progressivement. Leurs substitution par d'autres sources doit donc être envisagée.

L'Algérie étant un pays semi-aride, son potentiel solaire figure parmi les plus importants du monde. Dont l'intérêt de l'exploiter, des énergies renouvelables, inépuisable, propre, s'imposent dans des conditions comme une priorité, où la promotion des énergies renouvelable constitue un des grands axes de la politique énergétique et environnementale, en reconnaissant leurs retombées bénéfiques dans le développement économique du pays.

Une recherche bibliographique approfondie et liée à l'actualité des problèmes climatiques, nous a permis de prendre conscience du problème de pénurie d'eau en Algérie, où le dessalement de l'eau saumâtre par différentes techniques, particulièrement, la distillation solaire, peut être une alternative à cette menace, notamment dans les régions arides et isolées. Dont le but de protéger l'environnement et de se procurer de nouvelles ressources hydriques.

L'objectif de ce travail était d'étudier le comportement de notre installation comportant le distillateur solaire couplé à un ballon de stockage de l'eau chaude qui est chauffée via un capteur solaire standard.

Pour mener à bien l'étude de cette technologie, nous avons choisi de l'aborder par une approche fondamentale, avec l'élaboration d'un modèle numérique permettant de décrire le comportement de l'installation en fonction des sollicitations extérieures. dans le but d'optimiser le fonctionnement global de l'installation. Notre modèle nous a permis d'analyser son comportement à l'échelle d'une journée, en intégrant les phases transitoires. Notre installation ne possédant pas de systèmes d'appoint. Au niveau de la simulation numérique, et à l'aide du modèle détaillé que nous avons développé, nous avons essayé de réaliser une étude de sensibilité paramétrique sur les différents composants de l'installation. L'objectif est donc de déterminer, quels sont les paramètres les plus influents sur la production du distillateur ?

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement du distillateur solaire couplé. Il apparaît en particulier que l'irradiation globale reste le paramètre le plus influant, aussi :

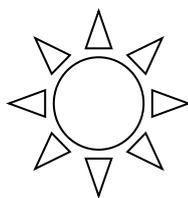
- Une bonne évolution temporelle du rendement est obtenue avec une faible masse d'eau.
- Un progrès de l'efficacité interne est fonction de la chaleur reçu par l'échangeur.

- L'augmentation apparente de l'écart de température entre la surface de condensation et la surface d'évaporation, que ce soit pour le distillateur avec paroi sans ailettes et avec paroi avec ailettes comparé à l'écart obtenue pour le distillateur traditionnel.
- Vue de la proportionnalité existe entre cet écart, le rendement et l'efficacité globale, toutes ces caractéristiques ont évolué.
- 70 ailettes de 10 cm de longueur, sont considérés respectivement, le nombre optimal et la longueur optimale pour l'obtention de la performance de notre installation.
- Le couplage du ballon au distillateur, s'avère une idée encourageante pour le développement de la distillation solaire.
- Capturer de l'énergie solaire via un capteur solaire, a permis de produire la chaleur et la stocker dans le ballon d'eau chaude, afin de garantir une continuité de la production d'eau distillée .

Notre recherche bibliographique nous a aussi permis de savoir que les performances installations comportant des ballons d'eau chaude assurant le stockage de l'énergie solaire visant à répondre aux besoins thermiques , sont directement affectés par le phénomène de la stratification au sein du ballon, qui peut en effet augmenter d'une façon considérable.

Des perspectives sont donc envisagées pour :

- élaborer une approche par modélisation afin de pouvoir caractériser l'impact de la stratification sur les performances, et optimiser les paramètres qui favorisent la stratification et limitent sa destruction, tels que la conduction thermique et les différents écoulements dans le ballon de stockage.
- Une réalisation expérimentale de notre modèle afin de confirmer les résultats obtenus par la modélisation mathématique.
- Enfin, exploiter de l'énergie propre et abondante , la stocker car elle est limitée par le temps reste la sérieuse préoccupation de l'homme, dont l'objectif de ne pas perturber cette précieuse source par la pollution de l'atmosphère, en utilisant les autres formes de l'énergie nocives et coûteuse.



Références
bibliographiques

Three horizontal dashed lines indicating a list structure within a right-angled triangle.

Bibliographie et webgraphie

- Gisement solaire

- [1] M. P. Thekaekara. APPLIED OPTICS 15 (4) (1976) 915-920.
- [2] <http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/le-changement-climatique/le-changement-climatique>
- [3] http://www.juggling.ch/gisin/physique/KeplerLois/Ellipse_proprietes.pdf
- [4] http://www.solimp-be.net/solimp_tech.htm
- [5] http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/contenu/alternative/alter_etape1_4.html
- [6] <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire.htm>
- [7] Alain Ricaud Jan 2011 Gisement solaire et transferts énergétiques, Université De Cergy-Pontoise
- [8] <http://fr.wikipedia.org/wiki>
- [9] http://www.astrosurf.com/gap47/scolaires/Soleil_Nouveau/inventeurs-soleil.htm
- [10] http://www.panneauxsolaires.be/doc/ECS_Notes_De_Cours_Soltherm_Architectes.pdf
- [11] <http://crescerelegendo.files.wordpress.com/2008/12/nuvole-e-sole.jpgeau>

- Eau et dessalement

- [12] http://fr.wikipedia.org/wiki/Quatre_éléments
- [13] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Eau>
- [14] E. Delyannis, Solar Energy, 75 (2003) 357-366.
- [15] C. Paton, A. Davis, The seawater greenhouse for arid lands, in: Proc. Mediterranean Conf. on Renewable Energy Sources for Water Production, Santorini, 10-12 June 1996.
- [16] Perret, J., A.M. Al-Ismaili, S.S. Sablani, Development of Humidification-dehumidification System in a Quonset Greenhouse for Sustainable Crop Production in Arid Regions. Biosystems Engineering 191 (3) (2005) 349-359.

- [17] B.REMINI. La problématique de l'eau en Algérie du nord. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, (Juin 2010) pp. 27-46.
- [18] Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. 07 Mars 2009
- [19] <http://www.lenntech.fr/applications/potable/faq/faq-eaupotable.htm#ixzz2iwMSkvMq>
- [20] http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Dittmar
- [21] http://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_de_mer#Origine_du_sel_de_l.27eau_de_mer
- [22] <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaire>
- [23] A. Maurel. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Lavoisier Tec&Doc. 2001
- [24] Alain Maurel Consultant, atelier plan bleu/meditep eau, énergie et changement climatique en méditerranée Dessalement de l'eau de mer, énergie nucléaire, énergies renouvelables, Carthage Tunisie – lundi 17 décembre 2007.
- [25] Diatomées:Lipides et/ou assimilation du Gaz carbonique, Brigitte Gontero Meunier – BIP-CNRS
- [26] Maurel A., Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : Et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, Tec & Doc Lavoisier 2006
- [27] A.A.S. Malik, G.N. Tiwari, A. Kumar and M.S. Sodha, Solar Distillation, Pergamon Press, Oxford, England, 1982.
- [28] A.A. Sfeir and G. Guarracina, Ingénierie des Systèmes Solaires, Applications à l'Habitat, Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [29] M. Telks, Solar Distiller for Life Rafts, Office of Science, USA, 1945.
- [30] E.D. Howe and B.W. Theimat, Twenty Years of Work on Solar Distillation at the University of California, Solar. Energy, 16 (1974) 97–195.
- [31] L.G. Savornin, Etude sur l'Evaporation et la Condensation de l'Eau dans les Distillateurs Solaires, Application Thermique de l'Energie Solaire dans le Domaine de la Recherche et de l'Industrie, Colloques Internationaux, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1961, 589–600.

- [32] E. Delyannis, The patros solar distillation plant, *Sol. Energy*, 12 (1968) 113–115.
- [33] P.I. Cooper, Digital simulation of transient solar stills process, *Sol. Energy*, 12 (3) 313, (1969).
- [34] N.Ouazene, A. Benzoui, Influence de la mouillabilité du vitrage sur les propriétés thermo optiques d'un distillateur solaire, *Enersol 2001, Adrar (Algérie)*.
- [35] S.D. Gomkale, S.Y. Ahmed, R.L. Data, Fresh water from sea by solar still, Paper presented at the Annual Meeting, Indian Institute of Chemical Engineers, India, December 1964.
- [36] B. Baume, Heat and mass transfer process in solar still of hot box type, Krzhizhanovsky Power Institute, Moscow, Russia, 1963.
- [37] S.Satcunanathan and H.P Hansen, An Investigation of some of the parameters Involved in solar distillation, *Solar energy*, 14(1973) 353-363.
- [38] N. Banda, Modélisation informatique des distillateurs solaires à effet de serre, thèse de 3^{ème} cycle, Perpignan 1978.
- [39] http://isolation.comprendrechoisir.com/comprendre/isolation_thermique.
- [40] M.Maalem, Modélisation mathématique d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulière. Thèse de 3^{ème} cycle, U.S.T.H.B. 1983.
- [41] Baibutaev.K B, Achilov.B M and Kamaeva.G. Effect of salt concentration on the evaporation process in solar stills. *Geliotekhnika* 6(2) (1970) 82-84
- [42] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, 'Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et Applications', Technique et Documentation, 2^{ème} Edition, 1980.
- [43] A. Chaker et G. Menguy. *Efficacité Interne d'un Distillateur Solaire Sphérique*. *Revue des Energies Renouvelables*, Numéro Spécial (2001) 53 - 58.
- [44] Sartori. E. Solar still versus solar evaporator: A comparative study between their thermal behaviours. *Solar Energy* 56 (2) (1996) 199-201.
- [45] Tiwari. G. N. *Solar Energy ; Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. *Energy Conversion and Management* 40 (5) (2002) 509-518.
- [46] 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.
- [47] Ali, H, Experimental study on air motion effect inside the solar still performance.

Energy Conversion & Management 32 (1991) 67-70.

- [48] Suneja. S and Tiwari. G.N., Effect of water flow on internal heat transfer solar distillation. Energy Conversion & Management 40 (5) (1999) 509-518.
- [49] Kwatra. H.S. Performance of a solar still :Predict effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature, Solar Energy 56 (3) (1996) 261-266.
- [50] Cooper.P.I. The absorption of radiation in solar stills. Solar energy 12 (1969) 333-346.
- [51] P. Valsaraj. An Experimental Study on Solar Distillation in a single Slope Basin Still by Surface Heating the Water Mass", Renewable Energy 25 (2002) 607-612.
- [52] De Paul. I. New model of basin type solar still. Journal of Solar Energy Engineering 124 (2002). 311-314.
- [53] Suneja.S et Tiwari. G.N., Performance evaluation of an inverted absorber solar-still, Energy conversion and Management, 39 (3-4) (1998)173-180
- [54] Kumar. S, Tiwari.G.N et Singh. H.N. Annual performance of an active solar distillation system. Desalination 5(1) (2000) 79-88.
- [55] Akash. B.A, 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.
- [56] Muhammed Ali Samee, Umar K. Mirza, Tariq Majeed, Nasir Ahmad, Design and performance of a simple single basin solar still, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11(3) (2005) 543-549.
- [57] S. Aboula –Enein, A. A. El-Sebaii, M.R.I Ramadan, A.El-Bialy, Year- round performance of a modified single-basin solar still with mica plate as a suspended absorber, Energy 25 (2000) 35-49.
- [58] Sangeeta Suneja, G.N. Tiwarl, S.N. Rai, Parametric study of an inverted absorber double-effect solar distillation system, Physics Department, MMH College, Ghaziabad (UP), India, 1997.
- [59] Mousa Abu-Arabie, Yousef Zurigat, Hilal Al-Hinai, Saif Al-Hiddabi Modelling and Performance Analysis of a Solar Unit With Double-Glass Cover Cooling, Desalination 143 (2002) 173-182.
- [60] E. Zayouti; L. Bouirden; A. Aharoune, M. Banouni, Distillation Solaire,

Amélioration de la Condensation de la Vapeur d'Eau dans les Distillateurs Solaires, International Forum on Renewable Energies, FIER, Tétouan-Maroc, FIER, Laboratoire de Thermodynamique Métallurgique et Rhéologie des Matériaux, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, BP28/S, Agadir, Maroc, 2002.

- [61] M. Benhammou, B. Omari, M. Gahgah, L. Amer, A. Boubghal, Réalisation et Expérimentation d'un Distillateur Solaire Couplé à un Condenseur, Station d'Expérimentation des Equipement Solaires en Milieu Saharien, B.P. 478, Route de Reggane-Adrar, 2003.
- [62] A.Harmim et M.Boukar, Simulation d'un distillateur solaire hot-box couplé à un insolateur plan, *Revue Internationale d'héliotechnique* 21 (2000).
- [63] G.N. Tiwari, S.K. Shukla, I.P. Singh, Computer Modeling of Passive/Active Solar Stills by Using Inner Glass Temperature. *Desalination* 154 (2003)171-185.
- [64] Y.P Yadav, Transient performance of a high temperature solar distillation system, *Desalination*, 91 (1993) 145-153.
- [65] K. Voropoulos, E. Mathioulakis, V. Belessiotis, Solar stills coupled with solar collectors and storage tank—analytical simulation and experimental validation of energy behavior, *Solar Energy* 75 (2003) 199–205.

- Capteur, principe de stockage

- [66] [http://www.panneaux_solaires.be/doc/ECS_Notes_De_Cours_Soltherm Architectes.pdf](http://www.panneaux_solaires.be/doc/ECS_Notes_De_Cours_Soltherm_Architectes.pdf)
- [67] N.Tsoukpoe K. E., Le Pierrès N., Luo L., Stockage de chaleur solaire à long terme, CIFEM 2010 (Colloque International Francophone d'Energétique et Mécanique), Saly (Sénégal), 16-20 mai 2010.
- [68] SOCACIU,LG. Seasonal Sensible Thermal Energy Storage Solutions, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* ISSN 1583-1078 Issue 19, July-December 2011 p. 49-68.
- [69] Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et a refroidissement de serres maraîchères en France : étude de préféaisabilité Application of aquifer thermal energy storage for heating and cooling of greenhouses in France prefeasibility study Rapport final BRGM/RP-55481-FR avril 2007.
- [70] J.-C. Hadorn, BASE consultants SA, Lausanne: IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – Annual report of the operating agent (RA 2005).

- [71] Serge Blaise EKOMY ANGO. Contribution au stockage d'énergie thermique en en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase, thèse de doctorat, 'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Spécialité Energétique, ParisTech Centre de Bordeaux.
- [72] FARID M.M. et al.– A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy conservation and management* 45 (2004) 1597-1615
- [73] //fr.wikipedia.org/wiki/Matériau_à_changement_de_phase.
- [74] VINEET VEET T. et BUDDHI D. PCM thermal storage in building: a state of art. *Renewable and sustainable energy reviews* 11 (6) (2007) 1146–1166.
- [75] ATUL.S. et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (2009) 318–345.
- [76] KHERROUF S. Améliorer le confort thermique en période chaude des locaux sous toiture légère dans les bâtiments existants par le traitement adapté des composants d'enveloppe. Rapport final de la convention ADEME-EDF N°05 04 C 0001 (2008).
- [77] Kuznik.F. Etude d'un matériau composite zéolithe/MgSO₄ pour le stockage intersaisonnier. Projet de fin d'étude, CEMTIL, 2010.
- [78] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolapo, B. Zalba, L. F. Cabeza. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1. Concepts, materials and modelisation, *Renewable and sustainable energy reviews* 14 (1) (2010) 31-55.
- [79] Akgün U., Prediction of Adsorption Equilibria of Gases, Genehmigten Dissertation, Technischen Universität München, 2006.
- [80] N. Tsoukpo, K. E, Liu, H, Le Pierrès, N. Luo, L. A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (2009) 2385-2396.
- [81] Marsteau, S. Adsorption, ED 4263. *INRS* 29 (39) (2005).
- [82] DUQUESNE, M., Résolution et réduction d'un modèle non-linéaire de stockage d'énergie par adsorption sur des zéolithes, Thèse de Doctorat (2013). Bordeaux.
- [83] Hongois, S., Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, Thèse de Doctorat (2011). INSA de Lyon.
- [84] Hauer.A, Mehling. H, Schossig. P, Yamaha. M, Cabeza. L, Martin.V, Setterwall.

F, Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage (2001), IEA, Annex 17, Final Report.

- [85] Pinel P., Cruickshank C.A., Beausoleil-Morrison I., Wills A., A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(7) (2011) 3341-3359.

Ballon de stockage

- [86] BUSCARLET C. et CACCAVELLI D. (2006) Suivi et évaluation énergétiques du plan soleil chauffe - eau solaires individuels, DD/ENR-035 RS

- [87] Duffie, J.A., & Beckman, W.A. 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, New York.

- [88] *Brumleve* T. D. (1974) *Sensible* heat storage in liquids; Sandia Labs Report, SLL-73-0263

- [89] Davis, E.S. and Bartera, R. Stratification in solar water heater storage tank, *Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the heating and Cooling of Buildings* (1975). Charlottesville, Virginia, pp. 38-42.

- [90] Shah, L.J. (1999). Investigation and Modeling of Thermal Conditions in low flow SDHW systems. PhD thesis, Report R-034, Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, ISBN 87-7877-035-1

- [91] Cole. R.L. and Bellinger, F.O. Thermally stratified tanks, *ASHRAE Transaction* 88, Part2(1) (1982) 1005-1017.

- [92] Wuestling, M.D., Klein, S.A. and Duffie, J.A. Promising control alternatives for solar water heating systems, *Journal of Solar Energy Engineering* 107 (1985) 215-221.

- [93] Dincer. I, M.A. *Rosen Thermal energy storage. Systems and applications* (2002). John Wiley & Sons.

- [94] Zurigat, Y.H., P.R. and Ghajar, A.J. Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 34 (1991) 115-125.

- [95] Ghajar, A.J. and rigat, Y.H. Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage, *Numerical Heat Transfer* 19 Part A, (1991) 65-83.

- [96] Van Berkel, J., Rindt, C.C.M., Van Steenhoven. Modeling of two-layer stratified stores, *Solar energy* 67 (1999) 65-78.
- [97] Yee C. K., Lai F. C. Effects of a Porous Manifold on Thermal Stratification in a liquid Storage Tank. *Solar Energy* 71 (2001) 241-254.
- [98] Hahne, E. and Chen. Y. Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot-water stores. *Solar Energy* 64 (1998) 9-18.
- [99] Lavan. Z. and Thompson, J. Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks, *Solar Energy* 19 (1977) 519-524.
- [100] Safi M.J, Loc.T. Development of thermal stratification in a two-dimensional cavity: a numerical study. *Int. J.H. Mass Transfer* 37 (1994) 2017-2024.
- [101] Yousef H. Zurigat, Pedro R. Liche, and Afshin J. Ghajar. Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 34 (1991) 115 – 125.
- [102] Afshin J. Ghajar and Yousef H. Zurigat. Numerical study of the effect of inlet geometry on stratification in thermal energy storage. *Numerical Heat Transfer Part A : Applications* 19 (1991) 65– 83.
- [103] Jacob van Berkel, Camilo C. M. Rindt, and Anton A. van Steenhoven. Modelling of two– layer stratified stores. *Solar Energy* 67 (1999) 65– 78.
- [104] Carlsson, P.F.,. Heat storage for large low flow solar heating systems. In *Proceedings of ISES Solar World Congress. Budapest Hungary* 5 (1993) 441-445.
- [105] Hegazy, A.A. Effect of Inlet Design on the Performance of Storage-Type Domestic Electrical Water-Heaters. *Applied Energy* 84 (2007) 1338-1355.
- [106] Van Koppen, C.W.J., Thomas, J.P.S. and Velkamp, W.B. The actual benefits of thermally stratified storage in a small and medium size solar system. *Proceedings ISES Solar World Congress, (1979) 579-580. Atlanta U.S.A.*
- [107] Abu-Hamdan, M. G. Zurigat Y.H. and Ghajart A.J. An experimental study of a stratified thermal storage under variable inlet temperature for different inlet designs, *International Journal Heat and Mass Transfer* 35 (1992) 1927-1934.
- [108] Davidson, J., Adams, D. & Miller.J. A Coefficient to Characterize Mixing in Solar Water Storage Tanks. *Journal of Solar Energy Engineering*, 116(2) (1994) 94-99.
- [109] Davidson J.H., Adams D.A. Fabric Stratification Manifolds for Solar Water Heating. *Journal of Solar Energy Engineering* 116 (1994) 130-136.

- [110] Abdoly, M.A. , Rapp, D. Theoretical and experimental studies of stratified thermocline storage of hot water. *Energy Conversion and Management*, 22(3) (1982) 275–285.
- [111] Nelson, J.E.B., Balakrishnan, A.R. and Murthy, S.S Experiments on stratified chilled water tanks, *International Journal of Refrigeration* 22 (1999) 216-234.
- [112] Al-Najem, N.M. Degradation of a stratified thermocline in a solar storage tank, *International Journal of Energy Research* 17 (1993) 183-191.
- [113] Ismail, K.A.R., Leal, J.F.B. and Zanardi, M.A Models of liquid storage tanks, *International Journal of Energy Research* 22 (1997) 805-815.
- [114] Hahne, E. and Chen, Y. Numerical study of flow and heat transfer characteristics in hot-water stores, *Solar Energy* 64 (1998) 9-18.
- [115] Miller, C.W. Effect of conducting wall on a stratified fluid in a cylinder, AIAA Paper No. 77-792, AIAA 12th Thermophysics Conference, Albuquerque (1977) New Mexico.
- [116] S.Satyanaryana Murthy, J.E.B. Nelson, and T.L.Sitharama Rao. Effect of wall conductivity on thermal stratification. *Solar Energy*, 49(4) (1992) 273 – 277.
- [117] Murthy, S.S., Nelson, J.E.B. and Rao, T.L.S. Effect of wall conductivity on thermal stratification, *Solar Energy* 49 (1992) 273-277.
- [118] Knudsen S., Furbo S. Thermal stratification in vertical mantle heat-exchanger with application to solar domestic hot water systems, *Applied Energy* 78 (2004) 257-272.
- [119] Shah L.J., Andersen E. and Furbo S. Theoretical and experimental investigations of inlet stratifiers for solar storage tanks. *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 2086-2099.
- [120] David Blandin. Modélisation et validation expérimentale de nouveaux concepts de ballons solaires à forte stratification. thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2010.
- [121] Kenjo L., Buscarlet C., Inard C. Etude du comportement thermique d'un chauffe-eau solaire à faible débit. *FIER'*(2002) 102-107.
- [122] <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/divers/Colloque-strategies/11-Bahloul-Approche-CFD.pdf>

- Ailettes

[123] www.almo-handiss.com

[124] Transfert thermique, école des mines Nancy, Yves JANNOT, 2012

[125] Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) Année 2011/2012 Licence de Mécanique. L3THERMIQUE APPLIQUÉE Frédéric Doumenc Version 2.1.

[126] Kotler Vivien 2AP - ENSGSI Unfer Aurélien Étude thermique des ailettes.

- Etude théorique

[127] Michel Dugnet, Les séchoirs solaires, Théorie et pratique, Unisco, Paris, 1985

[128] Michel Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, office de publications universitaire, tome 3, volume 2, 1986.

[129] R.V. Dunkle, Solar water distillation, the roof type still and multiple effect diffusion still, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Victoria, Australia, (1961) 895-902.

[130] P.I. Cooper, The maximum efficiency of single effect solar still, Solar energy, 15 (1973) 205-217.

[131] Siaka Toure and Pierre Meukam, A Numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic condition in Abidjan (Côte d'Ivoire), Renewable Energy 11(1997) 319-330.

[132] R.N. Morse, W.R.W. Read. Rational basis for engineering development of a solar still. Solar energy 12 (1968) 5-17.

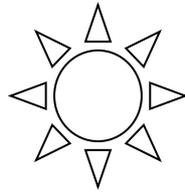
[133] P.I. Cooper and W.R.W, Design Philosophy and Geometric experience for Australian solar stills, Australia, Solar energy 16 (1974) 1-8.

[134] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Edition, John Wiley -Interscience, New York & Sons, 1991.

[135] Chandrashekar, M. and Thevenard, D., Comparison of WATSUN 13.1 Simulations with Solar Domestic Hot Water System Test Data from ORTECH/NSTF – Revised Report, Watsun Simulation Laboratory, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, N2L 3G1, 1995.

[136] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11241>

- [137] Gora NIANG, Mamadou ADJ, Dorothé AZILINON, Vincent SAMBOU ,
Atou SALL, Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire destiné à la
récupération de l'énergie stockée dans la toiture-terrasse en béton d'un
bâtiment, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.



Annexes

Transient System Simulation

A.1. Généralités

Le logiciel de simulation TRNSYS est un environnement complet et extensible, dédié à la simulation dynamique des systèmes. Développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (Sofia-Antipolis-Marseille) (CSTB) dans le cadre de collaboration internationale. TRNSYS est aujourd'hui une référence au niveau mondial dans le domaine de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes.

La simulation dynamique permet, par exemple, de simuler le comportement énergétique d'un bâtiment et de son équipement (chauffage, climatisation) en fonction de l'emplacement, des matériaux de construction utilisés, de l'architecture, du concept énergétique choisi, etc.

Plusieurs centaines de composants TRNSYS sont disponibles couvrant un large spectre d'application (Energie solaire, éoliennes, Hydrauliques, photovoltaïques, piles à combustibles, cogénération, comportement des usagers, analyse et optimisation tarifaire, régulation, stockage d'énergie intersaison, thermique du bâtiment, Tours de refroidissements, Turbines à gaz, Matériaux à changement de phase, piles à combustible, analyse économique...) (Figure. A.1).

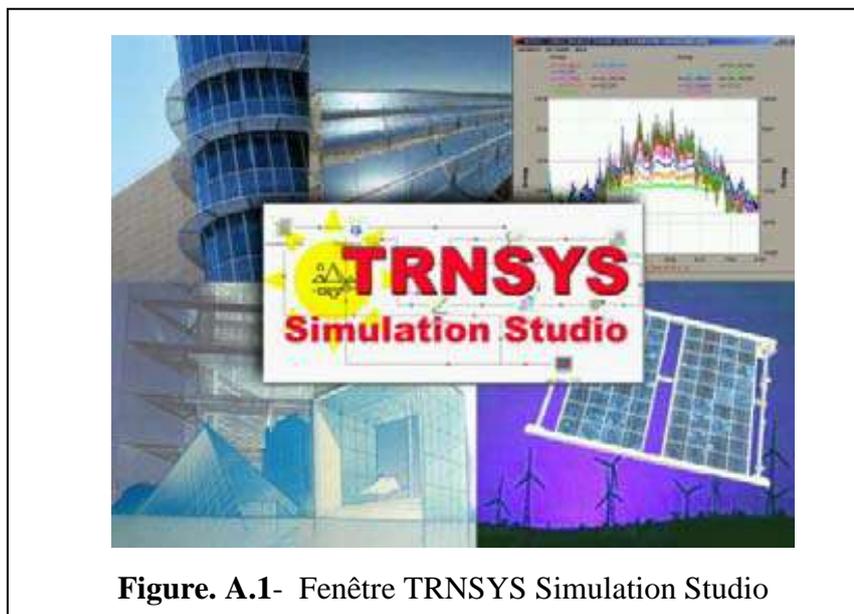
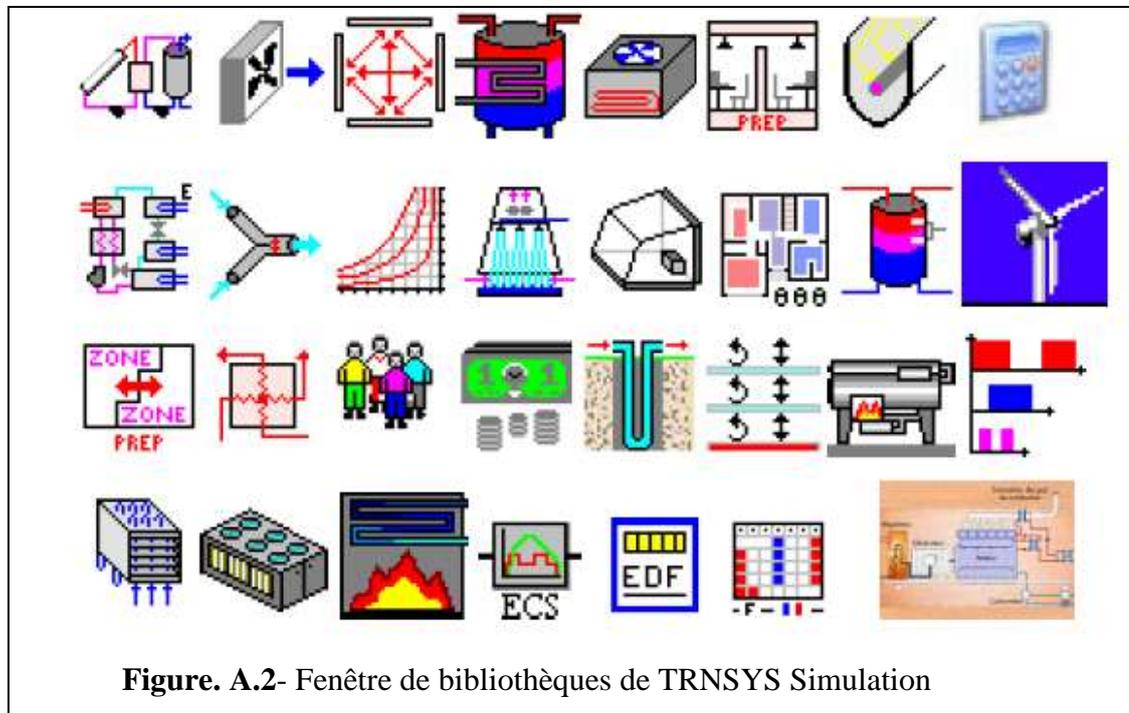


Figure. A.1- Fenêtre TRNSYS Simulation Studio

Ses bibliothèques peuvent être connectées pour effectuer des études pluridisciplinaires techniques et économiques.

Le TRNSYS Simulation Studio est un environnement de simulation de nouvelle génération dédié au calcul des performances thermiques des bâtiments multizones et de leurs équipements, ainsi que des systèmes thermiques en général. Son interface graphique, évoluée, réduit de façon substantielle le temps d'apprentissage du simulateur TRNSYS ainsi que l'effort nécessaire pour définir un

projet de simulation. La conception modulaire et **ouverte** de TRNSYS permet, aux utilisateurs, un contrôle sur les organigrammes, une adaptation plus réaliste des composants au projet étudié et la possibilité de créer aisément le composant spécifique pour un problème posé, en utilisant uniquement la partie "solveur" de TRNSYS (Figure. A.2).



Le TRNSYS Simulation Studio est un environnement de simulation de nouvelle génération dédié au calcul des performances thermiques des bâtiments multizones et de leurs équipements, ainsi que des systèmes thermiques en général. Son interface graphique, évoluée, réduit de façon substantielle le temps d'apprentissage du simulateur TRNSYS ainsi que l'effort nécessaire pour définir un projet de simulation. La conception modulaire et **ouverte** de TRNSYS permet, aux utilisateurs, un contrôle sur les organigrammes, une adaptation plus réaliste des composants au projet étudié et la possibilité de créer aisément le composant spécifique pour un problème posé, en utilisant uniquement la partie "solveur" de TRNSYS.

Le logiciel TRNSYS, depuis sa version commercialisée en 1975 a bénéficié de nombreuses améliorations grâce à ses utilisateurs (plus de 500), à ses participations à de nombreuses publications et à ses séminaires.

Depuis la version 15, il est possible d'ajouter des composants utilisateurs dans n'importe quel environnement de développement capable de créer une DLL

Une librairie à liaison dynamique (Dynamic Link Library) (Figure. A.3).

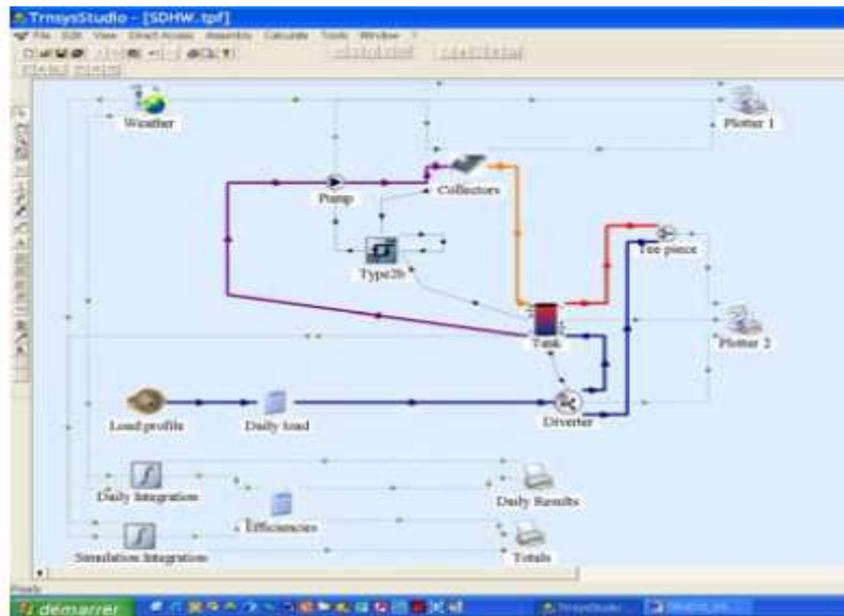


Figure. A.3- Fenêtre de TRNSYS Simulation Studio
Conception modulaire

TRNSYS 16 est capable d'utiliser directement des modèles numériques contenus dans des DLL. L'avantage en terme de flexibilité est énorme : il suffit désormais de copier un nouveau modèle sur son disque dur pour pouvoir l'exécuter ! Cela ne permet pas seulement à un utilisateur d'utiliser des modèles d'un collègue sans même posséder un compilateur. Il est surtout possible de combiner plusieurs extensions en même temps.

TRNSYS 16 se caractérise par :

- Une approche modulaire, il est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de système thermique à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées) ;
- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine ;
- Une documentation vaste sur les sous-programmes y compris explications, usages usuels, équations de base ;
- Une définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation ;
- La version 16 se présente encore plus ouverte en terme de connexions vers d'autres outils et langages de programmations.

A.2. Noyau de TRNSYS

Le noyau de TRNSYS a pour tâche la résolution de l'ensemble des équations dans les conditions de sollicitations déterminées, en particulier la dimension temporelle (instant initial et final et le pas de temps du calcul). A l'instar des autres logiciels, TRNSYS peut gérer automatiquement le changement des heures d'hiver et d'été évitant toute confusion dans l'interprétation des résultats.

A.3. Outils de l'environnement TRNSYS

A.3.1. SIMCAD

SIMCAD est un logiciel orienté objet, conçu pour la description de bâtiments à partir d'un plan papier ou la transcription d'un fichier informatique dxf. La représentation 3D des bâtiments permet de vérifier la cohérence des données saisies. SIMCAD assure le transfert des données vers TRNSYS automatiquement. Un bâtiment peut être composé d'une ou plusieurs zones à étudier et cela sans limitation du nombre de zones. (Figure. A.4).

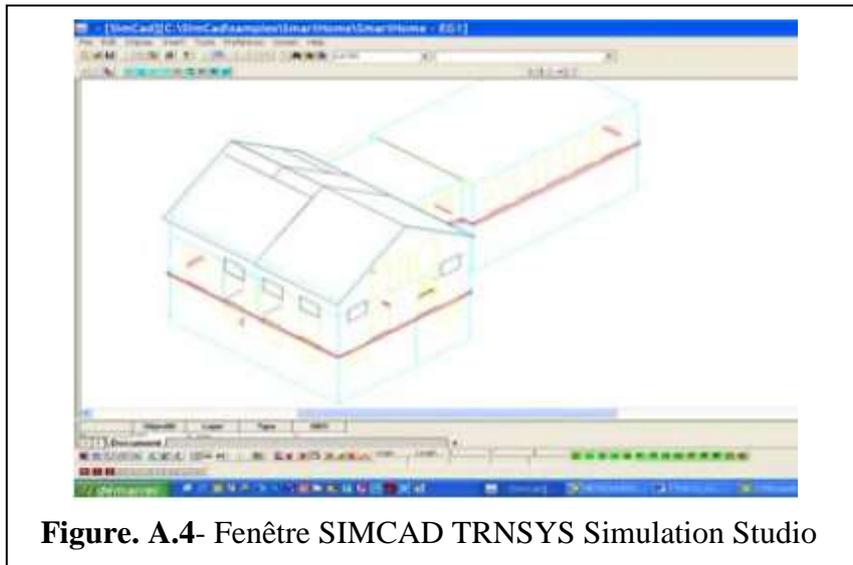
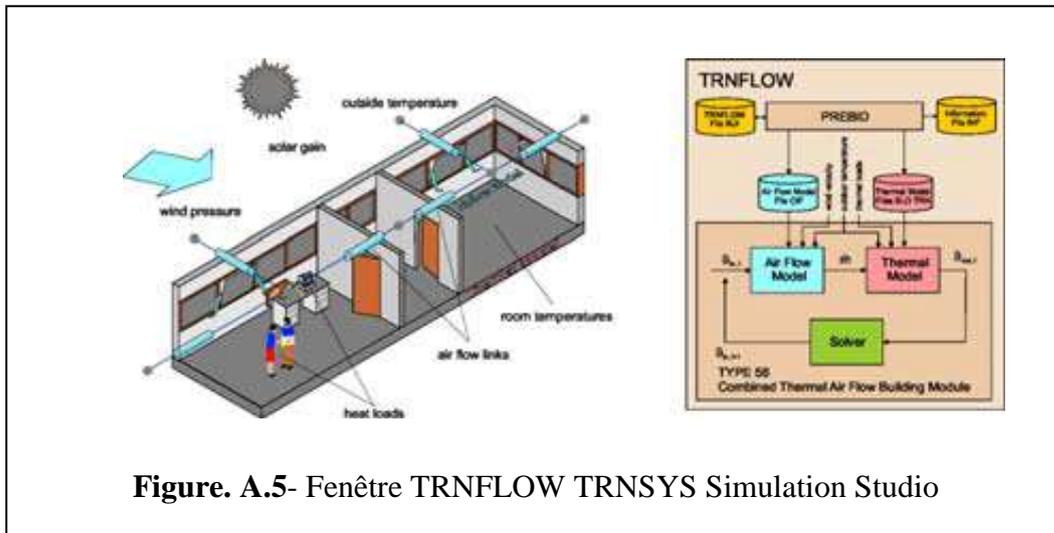


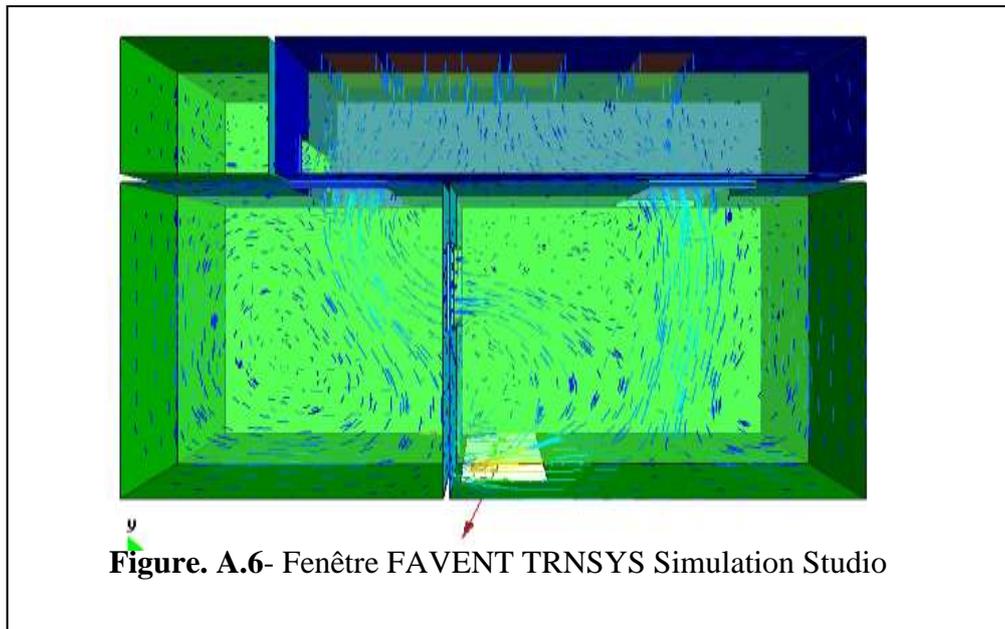
Figure. A.4- Fenêtre SIMCAD TRNSYS Simulation Studio

A.3.2. TRNFOW

TRNFOW, issu du logiciel COMIS, TRNFLOW est un logiciel qui permet de définir et calculer les circulations d'air dans un bâtiment multizones en fonction des conditions extérieures, des conditions intérieures et des équipements aérauliques de chaque zone. COMIS a été développé en collaboration Internationale dans d'un projet de l'Agence Internationale de l'Energie (Figure. A.5).



A.3.3. FAVENT Le logiciel FAVENT, couplé à TRNSYS, calcule la distribution des températures et des flux d'air dans les pièces d'un bâtiment en utilisant un code de calcul CFD (Figure. A.6).



A.3.4. METEONORM

METEONORM, permet de disposer pour TRNSYS, de données climatiques fiables et reconnues internationalement pour plus de 100 localisations en France au pas horaire et sur une année moyenne ou extrême. Si on ne dispose pas d'une station météorologique, METENORM peut calculer par interpolation entre différentes stations les conditions climatiques d'un lieu (Figure. A.7).



Figure. A.7- Fenêtre METEONORM TRNSYS Simulation Studio

A.3.5. TRNSED

L'utilitaire TRNSED permet de passer des simulations TRNSYS, sans achat de licence TRNSYS, à un tiers et de créer des applications WINDOWS complètes.

L'utilisateur renseigne et paramètre la simulation qu'il souhaite réaliser par un questionnaire à menu déroulant.

NOMBRES ADIMENSIONNELS

En mécanique des fluides, ou en transfert de chaleur, on est souvent amené à manipuler des groupes de variables sans dimension, appelés « nombre adimensionnel » ou « rapport de similitude ». Ces groupes sont construits en faisant des rapports entre des termes apparaissant dans les équations du mouvement ou de transfert, ce qui permet de les interpréter physiquement. On distingue ainsi :

B.1. NOMBRE DE GAY-LUSSAC

Le nombre de Gay-Lussac est un nombre sans dimension utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il indique la sensibilité de l'augmentation de pression selon l'augmentation de la température dans un dispositif isochore. Ce nombre porte le nom de **Louis Joseph Gay-Lussac**, un chimiste et physicien français.

$$Gc = \frac{1}{\beta \Delta T} \quad (\text{B.1})$$

Avec :

- ΔT : différence de température
- β : coefficient d'augmentation de pression isochore

B.2. NOMBRE DE RICHARDSON

Le nombre de Richardson est un nombre sans dimension utilisé surtout en thermodynamique. Ce nombre est en fait le rapport entre l'énergie potentielle gravitationnelle d'une parcelle du fluide et son énergie cinétique. Il est calculé pour caractériser un milieu naturel turbulent, l'utilisation du nombre de Reynolds n'est pas satisfaisante, car il est impossible de considérer la densité du fluide comme constante. Ce nombre porte le nom de **Lewis Fry Richardson**, un physicien et mathématicien anglais. Il est défini comme suit :

$$Ri = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_c}{v^2} = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{1}{Fr^2} \quad (\text{B.2})$$

Avec :

- g : accélération de la pesanteur [$m \cdot s^{-2}$]
- β : coefficient d'expansion thermique [$1/K$]
- L_c : longueur caractéristique [m]
- ΔT : Différence de température au sein de Δz [K]
- v : vitesse du fluide [m/s]
- G_r : nombre de Grashof
- R_e : nombre de Reynolds
- F_r : Nombre de Froude

B.3. NOMBRE DE REYNOLDS

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par **Osborne Reynolds**. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent). Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, en adimensionnant les équations de Navier-Stokes, qui sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui sont censées décrire le mouvement des fluides « newtoniens ». Le fluide newtonien (relatif à Isaac Newton) est un fluide dont la loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire^{1,2,3}. La constante de proportionnalité est appelée viscosité. On définit le nombre de Reynolds de la manière suivante :

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (\text{B.3})$$

Avec :

- V : vitesse caractéristique du fluide [m/s]
- L : dimension caractéristique [m]
- ν : viscosité cinématique du fluide [m²/s]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{B.4})$$

Avec :

- ρ : masse volumique du fluide [kg/m³]
- μ : viscosité dynamique du fluide [Pa·s ou kg/m·s]

B.4. NOMBRE DE FROUDE

Le nombre de Froude, de l'hydrodynamicien anglais William Froude, est un nombre sans dimension qui caractérise dans un fluide l'importance relative de l'énergie cinétique de ses particules par rapport à leur énergie potentielle gravitationnelle. Ce nombre apparaît essentiellement dans les phénomènes à surface libre, en particulier dans les études de cours d'eau, de barrages, En dynamique des fluides il fait partie des trois nombres sans dimension les plus utilisés : il caractérise l'importance de la pesanteur alors que le nombre de Reynolds prend en compte la viscosité et le nombre de Mach la compressibilité.

$$Fr_I = \frac{v}{C} = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (\text{B.5})$$

Avec :

- v : vitesse de l'écoulement
- g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)
- h : hauteur d'eau

B.5. NOMBRE DE MACH

Le nombre de Mach est un nombre sans dimension, noté « Ma », qui exprime le rapport de la vitesse locale d'un fluide à la vitesse du son dans ce même fluide. La vitesse du son dans un gaz variant avec sa nature et sa température, le nombre de Mach ne correspond pas à une vitesse fixe, il dépend des conditions locales. Il est nommé en l'honneur du physicien et philosophe autrichien Ernst Mach. Le nombre de Mach mesure le rapport entre les forces liées au mouvement et la compressibilité du fluide.

$$Ma = \frac{U}{a} \quad (\text{B.6})$$

Où :

- Ma : est le nombre de Mach
- U : est la vitesse de l'objet (par rapport à son environnement)
- a : est la vitesse de propagation ou célérité du son dans l'environnement considéré. Elle représente la vitesse de propagation de tout ébranlement produit dans le milieu.

B.6. NOMBRE DE PRANDTL

Le nombre de Prandtl (Pr) est un nombre sans dimension. Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement ν (ou viscosité cinématique) et la diffusivité thermique. Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un Prandtl faible (exemple : métaux liquides) indique que la conduction thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. Ce nombre porte le nom de **Ludwig Prandtl**, un physicien allemand. Il est défini de la manière suivante

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} = \frac{\mu}{\frac{\lambda}{C_p}} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{\lambda}{\rho C_p}} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{B.7})$$

Avec :

- ν : la viscosité cinématique en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- ρ : la masse volumique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- α : la diffusivité thermique en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- μ : la viscosité dynamique en $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
- C_p : la chaleur massique en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- λ : la conductivité thermique $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

B.7. NOMBRE DE FOURIER

Le nombre de Fourier est un nombre sans dimension utilisé fréquemment en transfert

thermique. Il est désigné par la lettre grecque τ , ou par Fo . Le nombre de Fourier est utilisé au cours de problèmes où on souhaite étudier un corps positionné dans un milieu de température différente. Il caractérise la part du flux de chaleur qui est transmise au corps à un instant donné (t) comparé à la chaleur stockée par ce corps. Physiquement, plus le nombre de Fourier est grand, plus la chaleur pénètre profondément à l'intérieur du corps en un temps donné. Son expression est :

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (\text{B.8})$$

Avec

- t : Temps auquel on veut calculer le nombre de Fourier (en secondes)
- L : Longueur caractéristique, calculée de la manière suivante.

$$L = \frac{V}{S} \quad (\text{B.9})$$

Avec :

- V : Volume du corps étudié (m^3)
- S : Surface d'échange (en m^2)
- α : Diffusivité thermique (en m^2/s) qui est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). Donc elle détermine l'inertie thermique d'un solide. La diffusivité thermique est fréquemment désignée par les lettres a , D ou la lettre grecque α . Se calcule comme suit :

$$D = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{B.10})$$

Où

- λ : est la conductivité thermique du matériau, en $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
- ρ : est la masse volumique du matériau, en $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
- c : est la capacité thermique massique du matériau, en $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

B.8. NOMBRE DE GUKHMAN

Le nombre de Gukhman (Gu) est un nombre sans dimension utilisé dans les opérations de transfert thermique combinées avec un transfert de masse telles les opérations de séchage. Il est défini comme étant un critère pour un transfert thermique convectif par évaporation à pression constante. Ce nombre porte le nom de **Aleksandr Adolfovich Gukhman**, un ingénieur chimiste russe. Il est défini suit :

$$Gu = \frac{T - T_m}{T} \quad (\text{B.11})$$

Avec :

- T : température du gaz se déplaçant au-dessus de la surface mouillée.
- T_m : température de la surface mouillée.

B.9. NOMBRE DE PECKET

Le nombre de Péclet est un nombre sans dimension utilisé en transfert thermique et en transfert massique. Il représente le rapport de deux temps caractéristiques : celui du transfert par convection et celui du transfert par conduction (ou par diffusion pour les transferts massiques). Ce nombre porte le nom d'Eugène Péclet, physicien français. Il est utilisé avec deux versions, thermique et massique.

B.9.1. PECKET THERMIQUE

Le nombre de Péclet thermique est équivalent au produit du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl dans le cas de transfert thermique. Il représente le rapport du transfert par convection sur le transfert par conduction. Définit comme suit :

$$Pe_{\text{ther}} = \frac{L_c v}{\alpha} = \frac{L_c v c_p \rho}{\lambda} = \frac{L_c^2 c_p \rho}{\lambda t} = Re \cdot Pr \quad (\text{B.12})$$

Avec :

- α : diffusivité thermique
- λ : conductivité thermique
- ρ : densité
- c_p : capacité calorifique
- L_c : longueur caractéristique du système
- t : temps caractéristique
- v : vitesse
- Re : nombre de Reynolds
- Pr : nombre de Prandtl

B.9.2. PECKET MASSIQUE

Le nombre de Péclet massique est équivalent au produit du nombre de Reynolds avec le nombre de Schmidt dans le cas de transfert massique. Il représente le rapport du transfert par convection sur le transfert par diffusion. Il est défini de la manière suivante :

$$Pe_M = \frac{L_c v}{D} = Re \cdot Sc \quad (\text{B.13})$$

Avec :

- L_c :longueur caractéristique
- ν : vitesse
- D : coefficient de diffusion
- Re : nombre de Reynolds
- Sc : nombre de Schmidt

B.10. LE NOMBRE SCHMIDT

Le nombre de Schmidt est un nombre sans dimension qui représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement ν (ou viscosité cinématique) et la diffusivité massique. Il est utilisé pour caractériser les écoulements de fluides dans lesquels interviennent simultanément viscosité et transfert de matière. Ce nombre porte le nom de **Ernst Heinrich Wilhelm Schmidt**, ingénieur allemand. Il est défini comme suit:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (\text{B.14})$$

Avec :

- ν : viscosité cinématique en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D : coefficient de diffusion massique en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

B.11. NOMBRE DE RAYLEIGH

Le nombre de Rayleigh est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide : inférieur à une valeur critique de 2 000, le transfert s'opère essentiellement par conduction, tandis qu'au-delà de cette valeur c'est la convection libre ou naturelle qui devient importante. Il est défini comme étant le produit du nombre de Grashof, reliant les effets de la force gravifique à la viscosité du fluide, et du nombre de Prandtl. Ce nombre porte le nom de **Lord Rayleigh**, physicien anglais. Il est défini comme suit :

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha}(T_s - T_\infty)L_c^3 = Gr \cdot Pr \quad (\text{B.15})$$

Avec :

- Gr : nombre de Grashof
- Pr : nombre de Prandtl
- g : accélération de la pesanteur
- L_c : longueur caractéristique
- T_s : température de la paroi
- T_∞ : température du fluide loin de la paroi
- ν : viscosité cinématique
- α : Diffusivité thermique
- β : coefficient de dilatation thermique volumétrique

Le nombre de Péclet possède la même définition que le nombre de Rayleigh, mais le rapport concerne le transfert thermique par conduction/convection forcée. Dans la plupart des cas, le nombre de Rayleigh est grand, de 10^6 à 10^8 .

En géophysique le nombre de Rayleigh a une importance capitale : aux échelles de temps géologiques, le manteau terrestre (correspond à la partie du globe terrestre située entre la croûte et le noyau) est un fluide dont la valeur critique (Ra) est : $10^6 < Ra < 10^8$, bien supérieure à la valeur critique du nombre de Rayleigh, ce qui indique que ce manteau est parcouru de mouvements de convection : la convection mantellique.

B.12. NOMBRE DE NUSSOLT

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique total et le transfert par conduction : c'est le cas d'un transfert entre deux solides parfaits. Si la conduction est le principal mode de transfert, alors le nombre de Nusselt sera de l'ordre de l'unité. En cas de présence de convection (due par exemple au déplacement d'un fluide en régime turbulent), le transfert thermique s'effectuera principalement par déplacement du fluide et aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers $+\infty$. Il est défini comme suit :

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (\text{B.16})$$

Avec :

- h : coefficient de transfert thermique
- L_c : longueur caractéristique
- k : conductivité thermique du fluide

La longueur caractéristique dépend de la géométrie en présence. Dans le cas d'un écoulement dans une conduite, on prendra le diamètre de la canalisation, ou le diamètre hydraulique si la conduite n'a pas une section circulaire. Dans le cas d'une plaque plane, on prendra la longueur de la plaque, ou l'abscisse à compter du bord d'attaque de la plaque.

Comme tout nombre sans dimension, la valeur du nombre de Nusselt dépend fortement des grandeurs de référence que l'on choisit, et de la signification physique que l'on entend lui donner (locale ou globale par exemple). Il est notamment important de savoir, lors de l'utilisation d'une corrélation, si le coefficient de convection h a été défini par rapport à une température de référence fixe, ou à une température de mélange locale.

RESOLUTION DES SYSTEMES DES EQUATIONS LINEAIRES PAR LES METHODES ITERATIVES

C.1. INTRODUCTION

Les méthodes itératives sont généralement préférées pour les systèmes linéaires $[A \times x = b]$ à matrice « A » creuse parce qu'elles ne modifient pas la matrice, et que dans un grand nombre d'applications « A » est creuse et présente une structure particulière (tri-diagonale) ce qui lui permet de ne pas être mémorisée explicitement et d'assurer pratiquement la convergence. Pour résoudre les équations ainsi discrétisées en obtenant leurs solutions approchées, plusieurs méthodes itératives appropriées à ce problème existent. Notre choix est basé sur la méthode de Gauss-Seidel qui est rapide en convergence, et présente une économie de mémoire d'autant plus importante qu'il est souvent inutile de mémoriser explicitement la matrice « A »

C.2. EXPRESSION MATRICIELLE DE LA METHODE DE GAUSS-SEIDEL

L'expression matricielle de l'algorithme suppose que la matrice « A » se décompose comme suit

$$A = L + D + U, \quad \text{C.1}$$

Où, « D » est la partie diagonale de « A », « L » sa partie triangulaire inférieure stricte et « U » sa partie triangulaire supérieure stricte.

Une itération de la méthode de Gauss-Seidel, celle passant de x^k à x^{k+1} , consiste alors à résoudre le système triangulaire inférieur :

$$(L + D)x^{k+1} = b - Ux^k, \quad \text{C.2}$$

de « haut en bas », c'est-à-dire en déterminant successivement :

$$x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_n^{k+1}. \quad \text{C.3}$$

C.3. PRINCIPE

Soit :

$$Ax = b$$

C.4

le système linéaire à résoudre, que l'on suppose écrit sous forme matricielle avec « $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ » et « $b \in \mathbb{R}^n$ », ce qui signifie que l'on cherche « $x \in \mathbb{R}^n$ » tel que le produit matriciel « Ax » soit égal à « b ».

On note « a_{ij} » les éléments de « A » et « b_i » ceux de « b » :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}.$$

La méthode de Gauss-Seidel résout le système linéaire [$Ax = b$] de manière itérative, ce qui veut dire qu'elle génère une suite de vecteurs « $x^k \in \mathbb{R}^n$ », pour « $k = 0, 1, 2, \dots$ ». On interrompt le calcul de la suite lorsque l'itéré courant, disons « x^k », est jugé suffisamment proche d'une solution, par exemple parce que le résidu « $Ax^k - b$ » est petit.

Soit

$$x^k = (x_1^k, \dots, x_n^k) \in \mathbb{R}^n, \quad \text{l'itéré courant, l'itéré suivant}$$

$$x^{k+1} = (x_1^{k+1}, \dots, x_n^{k+1}) \in \mathbb{R}^n \quad \text{se calcule en } n \text{ étapes, comme suit :}$$

Étape 1. Si l'on suppose que « $a_{11} \neq 0$ » et connaissant « (x_2^k, \dots, x_n^k) », on peut calculer « x_1^{k+1} » au moyen de la première équation du système linéaire

« $Ax = b$ ». De manière plus précise « x_1^{k+1} » est pris comme solution de

$$a_{11}x_1^{k+1} + a_{12}x_2^k + \cdots + a_{1n}x_n^k = b_1,$$

ce qui est possible si « $a_{11} \neq 0$ ».

Étape 2. Si l'on suppose que « $a_{22} \neq 0$ » et connaissant $(x_1^{k+1}, x_3^k, \dots, x_n^k)$, on peut calculer « x_2^{k+1} » au moyen de la deuxième équation du système linéaire

« $Ax = b$ ». De manière plus précise, « x_2^{k+1} » est pris comme solution de

$$a_{21}x_1^{k+1} + a_{22}x_2^{k+1} + a_{23}x_3^k + \dots + a_{2n}x_n^k = b_2,$$

ce qui est possible si « $a_{22} \neq 0$ ».

Étape i. avec « $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ » (cas général). Si l'on suppose que « $a_{ii} \neq 0$ » et connaissant $(x_1^{k+1}, \dots, x_{i-1}^{k+1}, x_{i+1}^k, \dots, x_n^k)$, on peut calculer x_i^{k+1} au moyen de la i -ième équation du système linéaire. De manière plus précise, x_i^{k+1} est pris comme solution de [$Ax = b$]

$$a_{i1}x_1^{k+1} + \dots + a_{i,i-1}x_{i-1}^{k+1} + a_{ii}x_i^{k+1} + a_{i,i+1}x_{i+1}^k + \dots + a_{in}x_n^k = b_i,$$

ce qui est possible si : « $a_{ii} \neq 0$ ».

En résumé, pourvu que les éléments diagonaux de A soient non nuls, on calcule les composantes « x_i^{k+1} » de « x^{k+1} » de manière séquentielle pour « $i = 1, \dots, n$ » par :

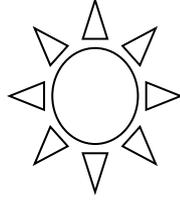
$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{k+1} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}x_j^k \right). \quad \text{C.5}$$

La formule fait intervenir les éléments :

$$x_j^{k+1} \quad (j = 1, \dots, i-1), \text{ calculés dans les étapes précédentes.}$$

C.4. CONDITION DE CONVERGENCE

$$|x^{k+1} - x^k| < \varepsilon \quad \text{C.6}$$



Résumé,
Abstract,
ملخص

Three horizontal dashed lines within a triangular frame, indicating a space for writing the summary.

RESUME

Dans le but d'améliorer le rendement du distillateur solaire simple à effet de serre, plusieurs travaux expérimentaux ont été réalisés, plus particulièrement, le distillateur actif qui n'est qu'un distillateur simple couplé à un capteur solaire où la saumure à distiller est préchauffée. En vue d'augmenter la quantité d'eau distillée nous avons étudié un distillateur actif modifié avec un ballon de stockage de chaleur sensible. Notre prototype consiste en un distillateur solaire simple constitué d'une couverture métallique qui joue le rôle de condenseur. Un échangeur de chaleur type « tube » est installé à l'intérieur du bassin afin de chauffer la saumure à distiller, une bonne isolation a été prévue au niveau de la partie postérieure du distillateur. Comme le rendement de celui-ci est fortement influencé par l'écart de température entre la saumure et la couverture du distillateur, des ailettes de refroidissement étant placées sur la face extérieure de la couverture. Suite à notre étude nous constatons une amélioration significative de la production journalière. Notre présent travail a pour objectif d'enrichir les données déjà disponibles par la modélisation mathématique de notre prototype basée sur les bilans thermiques et l'utilisation de coefficients de chaleur et de masse appropriés, moyennant certaines hypothèses simplificatrices. Le but de la simulation numérique est l'optimisation des paramètres qui influent sur la production d'eau distillée, en donnant un ordre de grandeur de ce que le stockage thermique peut apporter au bon fonctionnement d'un distillateur solaire à simple effet.

Mots clés : stockage thermique, énergie solaire, eau saumâtre, distillation solaire, ailettes, écart de température

Abstract

To improve the efficiency of simple solar still greenhouse, several experimental work has been made, specifically, active solar still which is a simple solar still coupled with a solar collector where the brine distillation is preheated. To increase the amount of distilled water we studied an active solar still modified with a sensible heat storage tank. Our prototype consists of a simple solar still consisting of a metallic cover which acts as the condenser. A type 'tube' heat exchanger is installed inside the still to heat the brine, a good insulation has been planned at the level of the posterior part of the solar still. As the performance of it is strongly influenced by the temperature difference between brine and coverage of the solar still, with cooling fins are placed on the outside of the cover. Our study we are seeing a significant improvement in the daily production. Our present work is aimed to enrich existing data by mathematical modeling of our prototype based on appropriate heat balances and the use of heat and mass coefficients, with some simplifying assumptions. The purpose of numerical simulation is the optimization of the parameters that affect the production of distilled water, giving an order of magnitude of what thermal storage can make to the proper functioning of a simple solar still

Keywords: thermal storage, solar energy, brackish water, Solar distillation, fins, temperature difference.

ملخص

من اجل تحسين مردود دية المقطر الشمسي عدة قد أجريت خاصة على المقطر الشمسي الفعال و الذي عبارة عن ربط المقطر الشمسي باللاقط الشمسي حيث إن الماء المالح يسخن قبل دخوله إلى المقطر الشمسي

لزيادة كمية الماء المقطر قمنا بدراسة نظرية على المقطر الشمسي الفعال و معدل مع خزان الماء الساخن

إن نموذج الدراسة متكون من مقطر شمسي يحتوي على غطاء معدني و أنبوب حراري بسيط يقوم بنقل الحرارة الى الماء المالح الموجود في المقطر الشمسي. حيث إن الجهة الخلفية للمقطر الشمسي معزولة تماما حراريا

لزيادة فارق درجة الحرارة بين سطح التكاثف و سطح التبخر قمنا بتركيب زعانف تبريد على الجهة الخارجية للغطاء لان فعالية المقطر الشمسي تتعلق بالقيمة القصوى لهذا الفارق

من خلال دراستنا لهذا النموذج اتضح لنا تحسن كبير في كمية الماء المقطر خلال اليوم الواحد

بناء على بعض الفرضيات المبسطة و اعتمادا على المعطيات الموجودة سابقا استعملنا نموذج رياضي مؤسس على معادلات التوازن الحراري من اجل الحصول على العوامل المثلى التي تؤثر على مرد ودية المقطر الشمسي بتقييم

للمخزن الحراري ودوره من اجل تحسين عملية التقطير الشمسي

كلمات مفتاحية

تخزين حراري . طاقة شمسية. مياه مالحة . تقطير شمسي. زعانف . فارق درجة الحرارة

