



**REPUBLIQUE ALGERIENNE
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique**

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Energétique

Thème

**Etude et Réalisation d'un distillateur
solier avec stockage d'énergie**

Proposé et dirigé par:

Pr MAKHLOUF Said

Réalisé par:

M^{elle} FLISSI Yasmine

M^{elle} MEZIANI Souad

Promotion : 2018/2019

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions DIEU, notre Créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à «Mr MAKHLOUF Saïd», Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour le sujet qu'il nous a proposé et lui exprimer notre profonde reconnaissance pour toute son aide, sa disponibilité, ses conseils, et L'attention toute particulière accordée à la lecture et à la correction de ce Mémoire.

Nous tenons à notifier un remerciement spécial à tous nos enseignants du département de Génie Mécanique qui ont contribué à notre formation de Master

Nous tenons également à remercier tout le personnel du laboratoire MCI (Moteur à Combustion Interne) de la faculté de Génie de la Construction pour leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Nous remercions également les membres du Jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*A la mémoire de mes parents **AREZKI** et **DRIFA***

*Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et
le respect que j'ai toujours pour vous*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon
éducation et mon bien-être*

*Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour
mon éducation et ma formation.*

Vous êtes toujours dans ma mémoire.

A mes grand-mères Tassadit et Dahbia

A mes frères AKLI, Amar et Said

A mes sœurs Rabiha, Rachida, Sabrina et kamila

*A mon cher mari Farhat, ainsi à toute ma petite famille, Marwa et
Yusra en particulier*

*A mes neveux et ma nièce Rayan, Axil, Benyamine, Massil, et ma petite
adorable Sarah*

A tous mes chers oncles et tantes

A toute la famille; cousins et cousines

A mon cher binôme et amie Yasmine

A tous les ami(e)s

A tous ceux qui connaissent Souad de près ou de loin

Souad

DÉDICACES

JE DÉDIE CE TRAVAIL À CELLE QUI M'A DONNÉ LA VIE QUI S'EST SACRIFIÉE POUR
MON BONHEUR ET MA RÉUSSITE : MA MÈRE « HOURIA »

À MON PÈRE « SAÏD », QUI A ÉTÉ MON OMBRE DURANT TOUTES LES ANNÉES
D'ÉTUDES, QUI A VEILLÉ À ME DONNER AIDE ET SOUTIEN, À M'ENCOURAGER ET À
ME PROTÉGER .

JE VOUS AIME .

À MES CHÈRES SŒURS « KAHINA, SIHEM, AMIRA ET NASSIMA » QUI M'ONT
TOUJOURS SOUTENUE ET ENCOURAGÉE .

À MES FRÈRES ET MA BELLE SŒUR

À MES BEAUX FRÈRES, À MON ONCLE ET MES TANTES

À MES COUSINS ET COUSINES

MES NEVEUX ET NIÈCES « ASSIA, YACINE, MICIPSA, MERIÈM, WAFAA, ISRAA,
HAMZA, WASSIM , MAZIGHE, KENZA, ISLAM »

À MES COPINES D'APPARTEMENT

À UNE PERSONNE TRÈS CHÈRE À MON CŒUR « BVB09 »

À MON CHER BINOME « SOUAD »

MES TRÈS CHÈRES AMIES « LYNDA, SOUAD. A, SOUHILA ,DIHYA, HAYET, LOLA ,
SAIDA »

EN TÉMOIGNAGE DE L'AMITIÉ SINCÈRE QUI NOUS A LIÉE ET DES BONS MOMENTS
PASSÉS ENSEMBLE, JE VOUS DÉDIE CE TRAVAIL.

À TOUS LES GENS QUI ONT CRU EN MOI ET QUI ME DONNENT L'ENVIE D'ALLER DE
L'AVANT

JE VOUS REMERCIE TOUS, POUR VOTRE SOUTIEN ET VOS ENCOURAGEMENTS.

YASMINE

Résumé

Le dessalement est aujourd'hui pratiqué avec succès dans de nombreux pays car l'approvisionnement en eau potable est un problème sans cesse croissant pour la plupart des régions du monde. Algérie a adopté en général deux procédés de dessalement (les procédés membranaires et les procédés à distillation (qui nécessitent un changement de phase, évaporation /condensation) ; ce dernier fait l'objet de notre étude.

Dans ce mémoire nous avons présenté une étude expérimentale d'un distillateur solaire avec stockage d'énergie. Ce distillateur a été testé sous l'ensoleillement naturel au Campus de Hasnaoua II, au niveau de la faculté du Génie de la Construction (UMMTO), durant les journées du 25-09 et 09-10-2019, sous un ciel dégagé pour les journées du 15 et 30-10-2019, sous un ciel partiellement dégagé.

L'objectif principal de ce travail est basé sur une étude purement expérimentale afin d'obtenir de l'eau distillée. D'après les résultats obtenus on peut dire que la saison de l'été est la meilleure période de la distillation, l'utilisation d'un réflecteur (miroir) et d'un absorbeur métallique noir a amélioré la productivité du distillateur,

Mots clé : distillateur solaire avec stockage d'énergie, réflecteur, absorbeur, productivité, eau distillée.

Summary

Desalination is now practiced successfully in many countries because the supply of drinking water is a growing problem for most regions of the world. Algeria has generally adopted two desalination processes (membrane processes and distillation processes (which require phase change, evaporation / condensation) the latter is the subject of our study. In this thesis we presented an experimental study of a solar still with energy storage. This still was tested under natural sunlight at the Hasnaoua II Campus, at the Faculty of Construction Engineering (UMMTO). During the days of 25-09 and during 09-10-2019 under a clear sky and the days of 15 and 30-10-2019 under a partially clear sky. The main objective of this work is based on a purely experimental study in order to obtain distilled water. From the results obtained it can be said that the summer season is the best time for distillation, the use of a reflector (mirror) and a black metallic absorber has improved the productivity of the distiller.

Keywords: solar still with energy storage, reflector, absorber, productivity, distilled water.

ملخص

تمارس تحليه المياه الآن بنجاح في العديد من البلدان لأن إمدادات مياه الشرب مشكلة متنامية في معظم مناطق العالم.

تعتمد الجزائر عموما على عمليتين لتحليه المياه؛ عمليات الغشاء وعمليات التقطير والأخيرة هو موضوع دراستنا.

في هذه الرسالة قدمنا دراسة تجريبية لألة التقطير مع تخزين الطاقة، تمت الدراسة تحت أشعة الشمس الطبيعية في الحرم الجامعي حسناوة الثاني، في كلية هندسة البناء التابعة لجامعة مولود معمري تيزي وزو. هذا خلال أيام 09/25 و 2019/10/09 تحت سماء صافية و أيام 15-2019/10/30 تحت سماء صافية جزئيا.

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو دراسة تجريبية بحتة من أجل الحصول على الماء المقطر، و من النتائج التي تم الحصول عليها يمكن القول أن موسم الصيف هو الموسم الأفضل للقيام بعمليات التقطير، استخدامنا للعاكس (المرآة) والمعدن الأسود قد حسن من إنتاجية جهاز التقطير.

الكلمات الرئيسية: جهاز التقطير الشمسي مع تخزين الطاقة، العاكس، المعدن الأسود، الإنتاجية، الماء المقطر.

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Gisement solaire

I.1. Introduction	2
I.2. Généralités sur le soleil	2
I.3. Le mouvement de la terre.....	4
I.4. La sphère céleste	5
I.5. Les coordonnées célestes	5
I.5.1. Les coordonnées horizontales (également appelé système local ou système de coordonnées alt-azimutales)	5
➤ La hauteur (h)	5
➤ L'azimut (α)	5
I.5.2. Les coordonnées géographiques terrestres.....	6
➤ La longitude (λ)	6
➤ La latitude (Φ)	6
I.5.3. Les coordonnées horaires.....	7
➤ L'angle horaire (ω)	7
➤ La déclinaison (δ)	7
I.6. Les temps solaires.....	8
I.6.1. Le temps solaire vrai (TSV)	8
I.6.2. Le temps solaire moyen (TSM)	8
I.6.3. Le temps universel (TU)	8
I.6.4. Le temps légal (TL).....	8
I.7. Durée du jour	9
I.8. La constante solaire	9
I.9. Le potentiel solaire.....	9
I.10. L'ensoleillement	10
I.11. le rayonnement solaire	10
I.11.1. Le rayonnement direct	11
I.11.2. Le rayonnement diffus	11
I.11.3. Le rayonnement réfléchi	11
I.11.4. L'albédo	11
I.11.5. Le rayonnement global.....	12
I.12. Rayonnement solaire en Algérie	13
I.13. Effet de serre	14
I.14. Principe de réflexion	14
I.14.1. Réflexion sur une surface plane	14
I.14.2. Réflexion sur une surface courbée	15
I.15. Conclusion	16

Chapitre II : Généralités sur le dessalement

II.1. Introduction	17
II.2. Historique	17
II.3. L'eau	18
II.3.1. Propriétés de l'eau	18
• La chaleur spécifique.....	18

Sommaire

• La chaleur de vaporisation ou chaleur latente	18
• Quelques propriétés de l'eau en fonction de la température	19
II.3.2. Classification des eaux selon la salinité.....	20
II.3.3. L'eau potable	20
II.4. Techniques de dessalement d'eau.....	21
II.4.1 Les procédés membranaires	22
II.4.1.1 L'électrodialyse	22
II.4.1.2 L'osmose inverse	23
II.4.2. Les procédés thermiques	23
II.4.2.1 Procédé de congélation	23
a. La congélation directe.....	24
b. La congélation indirecte	24
II.4.2.2 Le procédé de la distillation	24
II.4.2.2.1 La distillation simple effet	24
II.4.2.2.2 La distillation à multiples effets MED	25
II.4.2.2.3 La distillation à détente étagés MSF	26
II.4.2.2.4 La distillation par compression de vapeur	27
II.5. Distillateur solaire.....	28
II.5.1. Introduction.....	28
II.5.2. Les différents types de distillation solaire	28
II.5.2.1. Les distillateurs statiques	28
II.5.2.1.1. Le distillateur solaire plan	28
II.5.2.1.2. Le distillateur à cascade	29
II.5.2.1.3. Le distillateur sphérique.....	30
II.5.2.1.4. Le distillateur solaire terre-eau/eau-eau.....	30
II.5.2.2. Le distillateur à ruissellement	31
II.5.2.2.1. Le distillateur solaire à mèche	31
II.5.2.2.2. Le distillateur vertical	32
II.5.2.2.3. Le distillateur solaire à film capillaire	32
II.5.2.3. Le système couplé distillateur plan-capteur.....	33
II.5.2.3.1. Description du système couplé distillateur plan-capteur	33
II.5.2.3.2. Description du système couplé distillateur hot box –capteur	34
II.5.2.3.3. Le distillateur solaire à étages multiples avec récupération de chaleur	34
II.5.2.4. Les système de distillation par concentration	35
• Le capteur cylindro-parabolique	35
• Le concentrateur parabolique	35
• Le distillateur sphérique	36
II.5.3. Les avantages et les inconvénients des distillateurs solaires	36
II.5.3.1 Les avantage.....	36
II.5.3.2. Les inconvénients	37
II.6. Les paramètres influents sur un distillateur solaire	37
II.6.1. Les paramètres internes	37
II.6.1.1. Les paramètres de position.....	37
II.6.1.2. Les paramètres géométriques (construction)	38
II.6.1.3. Les paramètres optiques.....	40
II.6.1.4. Les paramètres thermo-physiques	40

Sommaire

II.6.2. Les paramètres externes.....	40
II.6.2.1. Les paramètres météorologiques	40
II.6.2.2. Les paramètres géographiques	40
II.6.3. Les caractéristiques et performances des distillateurs	41
• La production et le taux conversion	41
• L'efficacité globale	41
• L'efficacité interne	41
• La performance.....	42
• Le rendement.....	42
II.7. Les facteurs réduisant l'optimisation de l'activité du distillateur solaire	42
II.7. 1. La rechute des gouttelettes	42
II.7. 2. La concentration en sel	42
II.7. 3. L'épaisseur de la solution	42
II.7. 4. La formation d'algues et de matières organiques	43
II.8. Conclusion	43

CHAPITRE III : Etude théorique et expérimentale d'un distillateur

III.1. Introduction	44
III.2. Les phénomènes d'échanges énergétiques.....	44
III.2.1. La conduction	44
III.2.2. La convection	45
• La convection naturelle	47
• La convection forcée	47
III.2.3. Le rayonnement	48
III.2.4. L'évaporation	49
• Transfert de chaleur sensible	49
• Transfert de masse	49
III.2.5. La condensation	49
III.2.5.1. La condensation en gouttes	49
III.2.5.2. La croissance des gouttes	50
III.2.5.2.1. La condensation	50
III.2.5.2.2. La coalescence	50
III.3. Les échange de chaleur au sein de distillateur	50
• Les échanges de chaleur entre l'absorbeur et la marmite	50
• Les échanges de chaleur entre la marmite et le vase	50
• Les échanges de chaleur entre la vitre et l'ambiant	50
III.4. Les hypothèses simplificatrices	50
III.5. Le bilan énergétique d'un distillateur.....	51
III.5.1. Le bilan thermique au niveau de l'unité de distillation	51
III.5.2. Le bilan thermique en régime permanent	52
III.5.2.1. Bilan énergétique de la vitre extérieure	53
III.5.2.2. Bilan énergétique de la vitre intérieure	53
III.5.2.3. Bilan énergétique de la marmite	54
III.5.2.4. Bilan énergétique de l'eau	54
III.5.2.5. Bilan énergétique de l'absorbeur	54
III.5.2.6. Bilan énergétique de réflecteur	55
III.5.2.7. Le flux perdu à travers les murs	55
III.5.3. Bilan thermique en régime transitoire	55

Sommaire

III.5.3.1. Bilan du vitrage.....	56
▪ A la face extérieure	56
▪ A la face intérieure	56
III.5.3.2. Bilan de l'eau	56
III.5.3.3. Bilan du bassin intérieur	56
III.5.3.4. Bilan de l'isolant	57
▪ Au niveau de la face intérieure	57
▪ Au niveau de la face extérieure.....	57
III.5.5. Le débit du condensât.....	57
III.5.6. Coefficients d'échanges thermiques.....	57
• Par rayonnement eau-vitre.....	57
• Par convection eau-vitre	58
• Par vaporisation	58
• Par rayonnement vitre – milieu ambiant	58
• Par convection vitre – milieu ambiant.....	59
• Par convection bassin – eau.....	59
• Par plane horizontale	59
• Par conduction Isolant-bassin.....	60
• Par conduction à travers l'isolant	60
• Par conduction à travers l'isolant	60
• Par conduction à travers l'isolant	60
III.6.description du distillateur solaire	61
III.7. les éléments essentiels de distillateur	61
III.7.1.. Le boîtier.	61
III.7.2. La couverture de la marmite.....	62
III.7.2.1. La composition du verre.	63
III.7.2.2. Quelques propriétés physiques et mécaniques du vitrage.	63
III.7.3. L'absorbeur.....	64
III.7.4.L'isolation.....	65
III.7.5. Le stockeur d'énergie.	65
III.7.5.1. Le composite MCP	65
III.7.5.2. Critère de choix d'un MCP.....	65
• Les propriétés thermodynamiques et thermiques	66
• Les propriétés cinétiques	66
• Les propriétés chimiques	66
III.7.6. La marmite.....	66
III.7.7. Le réflecteur.	67
III.7.8. La gouttière.....	68
III.7.9. la tuyauterie	68
III.7.10. Le Bécher gradué	68
III.7.11. Thermocouple	68
III.8. Conclusion.....	68

Sommaire

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

V.1. Introduction	71
IV.2. Discussions des résultats	71
IV.2.1.Premier essai le (25-9-2019)	71
IV.2.2.Deuxième essai le (09-10-2019)	73
IV.2.3.Troisième essai le (15-10-2019).....	75
IV.2.4.Quatrième essai le (30-10-2019)	78
IV.2.5.Cinquième essai (04-11-2019)	80
Conclusion	84
Conclusion générale	85

Listes des figures

Chapitre I : Gisement solaire

Figure I.1 : La structure du soleil	2
Figure I.2 : Mouvement du globe terrestre.....	4
Figure I.3 : La sphère céleste.....	5
Figure I.4 : Les coordonnées célestes horizontales	6
Figure I.5 : Les coordonnées géographiques terrestre.....	6
Figure I.6: Les coordonnées horaires	7
Figure I.7 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	10
Figure I.8 : Composantes du rayonnement solaire reçu au niveau du sol terrestre.....	11
Figure I.9 : Schéma descriptive.....	12
Figure I.10 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre	12
Figure I.11 : Irradiation globale journalière reçues sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet.....	13
Figure I.12 : L'effet de serre	14
Figure I.13 : La réflexion d'un rayon lumineux sur une plaque plane.....	15
Figure I.14 : Réflexion sur une paroi courbée.....	15

Chapitre II : Généralités sur le dessalement

Figure II.1: Les différentes dispositions des molécules d'eau dans ses trois états.....	18
Figure II.2 : Schéma représentatif des différents procédés de dessalement de l'eau de mer	21
Figure I.3 : Unité électrodialyse	22
Figure I.4: Principe de l'osmose inverse	23
Figure I.5 : Principe de distillation à simple effet	25
Figure II.6 : Le principe de distillation à effets multiples (MED)	26
Figure II.7 : Distillateur à Multi stage flash	26
Figure II.8: Distillateur à compression de la vapeur	27
Figure II.9 : Distillateur solaire	28
Figure II.10 : Distillateur solaire plan à simple pente	29
Figure II.11 : Distillateur solaire plan à double pente.....	29
Figure II.12 : Distillateur solaire incliné à cascade	30
Figure II.13 : Distillateur solaire sphérique	30

Listes des figures

Figure II.14 : Distillateur solaire terre-eau et eau-eau.....	31
Figure II.15 : Schéma d'un distillateur solaire à mèche.....	31
Figure II.16 : Schéma d'un distillateur solaire vertical.....	32
Figure II.17 : Distillateur solaire à film capillaire.....	33
Figure II.18: Distillateur plan capteur.....	34
Figure II.19. Distillateur hot box –capteur.....	34
Figure II.20 : Distillateur solaire à étages multiples.....	35
Figure II.21 : Schéma représentant un distillateur cylindro parabolique.....	35
Figure II.22: Distillateur paraboliques.....	36
Figure II.23: Distillateur sphérique.....	36

Chapitre III : Etude théorique et expérimentale d'un distillateur

Figure III.1 : La transmission de chaleur par conduction.....	45
Figure III.2 : La transmission de chaleur par convection.....	47
Figure III.3 : La transmission de chaleur par rayonnement.....	49
Figure III.4 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire.....	51
Figure III.5 : Le boîtier avant isolation.....	61
Figure III.6: La couverture en verre.....	62
Figure III.7 : Support de la couverture.....	62
Figure III.8 : L'absorbeur teinté en noir et son emplacement.....	64
Figure III.9: La marmite.....	66
Figure III.10 : Le réflecteur (le miroir).....	67
Figure III.11. Bêcher gradué.....	68
Figure III.12 : Thermocouple de type K.....	68
Figure III.12 : Pico Technology Enregistreur de données, Température.....	69

Chapitre IV: Résultats et discussions

Figure IV.1 : Rayonnement solaire global incident par la ville de Tizi-Ouzouen 1 ^{er} essai.	70
Figure IV.2 : Variation de la température de l'eau à distiller en fonction du temps. (1 ^{er} test) ..	71
Figure IV.3 : Rayonnement solaire global incident par la ville de Tizi-Ouzou en 2 ^{eme} essai. ...	72
Figure IV.4: Variation de la température de l'eau à distiller en fonction du temps. (2 ^{eme} test) ..	73
Figure IV.5: La formation des gouttes. (2 ^{eme} test).....	74

Listes des figures

Figure IV.6: Rayonnement solaire global incident par la ville de Tizi-Ouzou en 3 ^{eme} essai.	74
Figure IV.7: Variation de la température de l'eau à distiller en fonction du temps (3 ^{eme} test)....	75
Figure IV.8: Apparition des premières gouttes. (3 ^{eme} test).....	76
Figure IV.9: Glissement des gouttelettes. (3 ^{eme} test).....	76
Figure IV.10: Rayonnement solaire global incident par la ville de Tizi-Ouzou en 4 ^{eme} essai ...	77
Figure IV.11: Variation de la température de l'eau à distiller en fonction du temps (4 ^{eme} test)..	78
Figure IV.12 : Les premières gouttes. (4 ^{eme} test).....	78
Figure IV.13 : Glissement des gouttelettes. (4 ^{eme} test)	79
Figure IV.14: Rayonnement solaire global incident par la ville de Tizi-Ouzou en 5 ^{eme} essai ...	79
Figure IV.15 : Mise en place des thermocouples	80
Figure IV.16 : Variation de la température en fonction du temps (5 ^{eme} test)	82

Liste des tableaux

Chapitre I : Gisement solaire

Tableau I.1 : Caractéristiques de soleil	3
Tableau I.2 : Le potentiel solaire en Algérie	10

Chapitre II : Généralités sur le dessalement

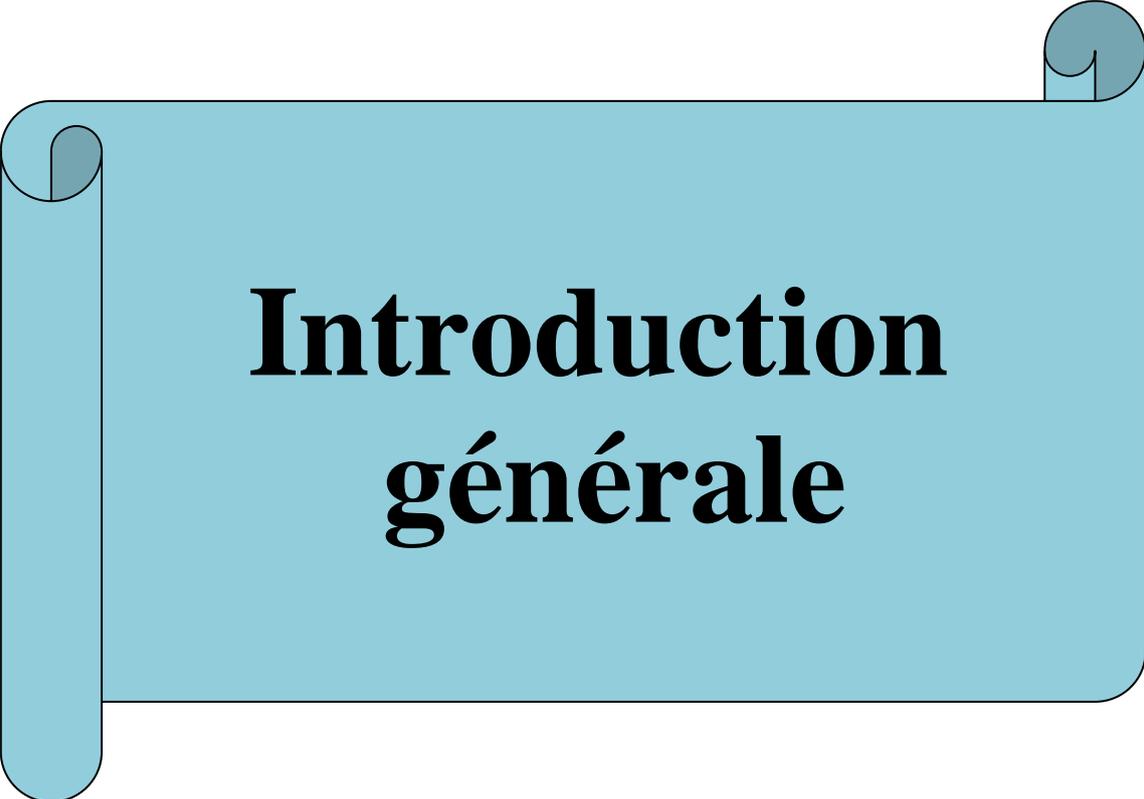
Tableau II.1 : Les propriétés de l'eau en fonction de la température	19
Tableau II.2 : Classification des eaux selon la salinité	20

Chapitre III : Etude théorique et expérimentale d'un distillateur

Tableau III.1: Analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques.....	55
Tableau III.2: Caractéristiques de boîtier	61
Tableau III.3: Caractéristiques de la vitre transparente.....	63
Tableau III.3: Caractéristiques de l'isolation	64
Tableau III.4: Caractéristiques de MCP	65
Tableau III.5: Caractéristiques de la marmite	66
Tableau III.6: Caractéristiques de réflecteur	67

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : Les températures de l'eau à distillée mesurées en 1 ^{er} essai.....	71
Tableau IV.2 : Les températures de l'eau à distillée mesurées en 2 ^{eme} essai	73
Tableau IV.3 : Les températures de l'eau à distillée mesurées en 3 ^{eme} essai	75
Tableau IV.4 : Les températures de l'eau à distillée mesurées en 4 ^{eme} essai	77
Tableau IV.5 : Les différentes températures mesurées en 5 ^{eme} essai	81



Introduction générale

Les besoins en eau potable dans le monde augmentent d'une manière continue alors que les réserves souterraines se trouvent constamment diminuées. Les réserves d'eau saumâtres ont des teneurs en sel dépassant les normes exigées pour une eau potable.

Une des solutions qui peut contribuer à l'augmentation des potentialités en eau dans le monde est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Le dessalement de ces eaux par des unités classiques de traitement nécessite beaucoup d'énergie électrique et/ou calorifique.

La distillation solaire est devenue un phénomène très courant tant au niveau domestique qu'industriel. Chaque année des milliers de distillateurs sont conçus dans les quatre coins du monde pour différents objectifs, soit pour une utilisation personnelle ou dans des laboratoires de recherche pour les études académiques.

L'objectif essentiel de ce travail concerne l'étude expérimentale d'un distillateur solaire.

Notre mémoire a été organisé en quatre chapitres :

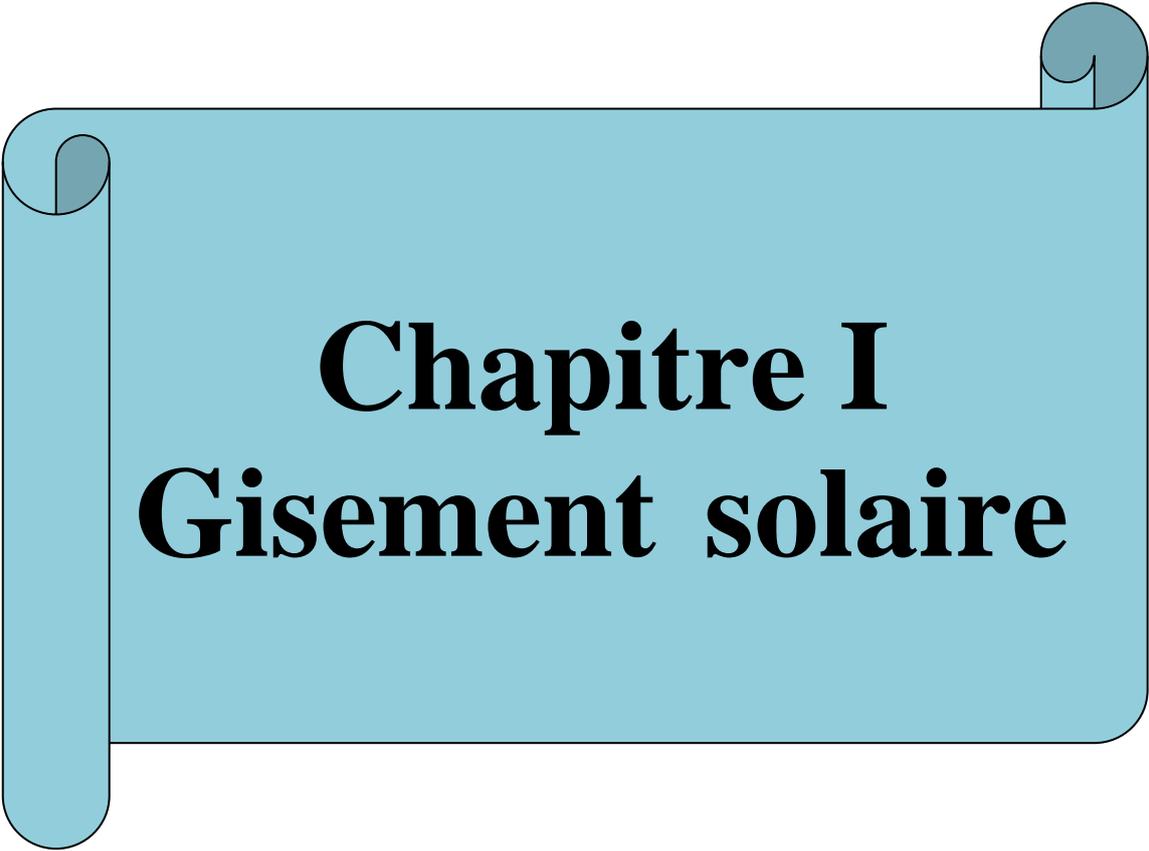
Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur le gisement solaire.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des connaissances générales sur les techniques de dessalement et à une recherche bibliographique concernant les différents types de distillateurs.

Le troisième chapitre présente une étude théorique (les phénomènes d'échanges énergétiques, les échanges de chaleur au sein du distillateur et le bilan énergétique d'un distillateur) ainsi qu'une étude expérimentale (la réalisation et la description du distillateur solaire).

Le quatrième chapitre est consacré à une présentation des résultats obtenus dans l'étude expérimentale sous forme de graphes suivis de leurs interprétations.

La dernière partie de ce travail concerne les conclusions retenues de cette étude ainsi que les différentes recommandations pour de futurs travaux dans ce domaine.



Chapitre I

Gisement solaire

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables, comme leur nom l'indique, ce sont des sources inépuisables d'énergie offerts par la nature elle-même et dont la maîtrise garantirait largement l'autonomie de la planète en énergie.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme.

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie et dans toutes les applications énergétiques ... [1].

Le soleil envoie sur la terre une puissance de 90 000 terawatts (TW), à comparer aux 14 TW consommés par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années encore. Cependant, en raison de son caractère intermittent et de sa faible densité, il est capital de pouvoir stocker et concentrer cette énergie solaire [2].

I.2. Généralités sur le Soleil

Le Soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de $1,39.10^6$ km (soit 100 fois celui de la terre) et est à une distance moyenne de 15010^5 km de la terre, sa masse est de l'ordre de 210^{27} tonnes. Toute l'énergie du soleil provient de réactions « thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque second 564106 tonnes d'hydrogène en 560106 tonnes d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une puissance totale de 36.10^{22} kW.

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (1 kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible [3].

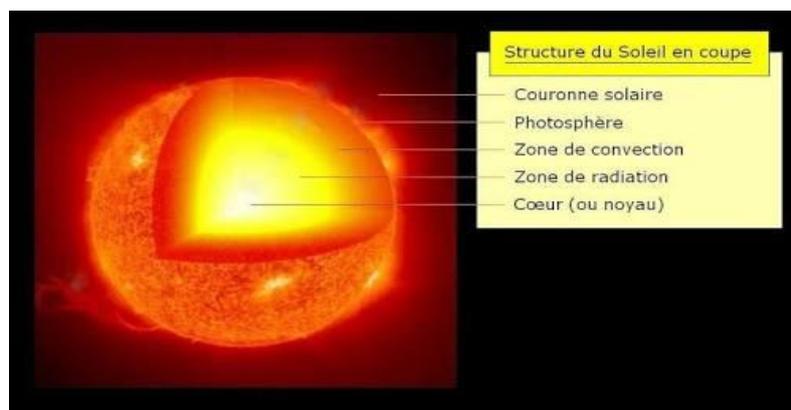


Figure I.1 : La structure du soleil [3]

Le soleil peut-être découpé en plusieurs couches concentriques. On distingue quatre zones particulières : le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [4].

Les réactions nucléaires de fusion se produisent dans le noyau du soleil en libérant ainsi une énergie très considérable. Les réactions sont assurées grâce aux caractéristiques importantes du noyau : sa densité très élevée ($\approx 10 \text{ kg/m}^3$), sa température énorme de 15 millions de degrés Celsius ainsi que sa pression de 210^{11} bars. Sa densité diminue avec l'éloignement à un quart du rayon solaire, soit 17500 km environ [5].

L'énergie produite se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

Tableau I.1 : Caractéristiques du soleil [5]

Le Soleil	
Caractéristiques orbitales	
Période galactique	2.2610 ⁸ années
Vitesse	217 km/s
Caractéristiques physiques	
Diamètre moyen	1.3910 ⁶ km
Aplatissement aux pôles	910 ⁻⁶
Surface	6.0910 ¹² km ²
Volume	1.4110 ¹⁸ km ³
Masse	1.989110 ³⁰ kg
Masse volumique	
Moyenne	1408 kg/m ³
Au centre	150000 kg/m ³
Gravité à la surface	217.95 km/s ²
Température	
Au centre	15.1 MK
A la surface	5750 K
Couronne	5MK
Flux énergétique	3.826 × 10 ²⁶ W
Rotation	
Inclinaison de l'axe écliptique	7.25°
Inclinaison de l'axe plan Galaxie	67.26°
Vitesse, latitude 0°	7008.17 km/h
Période de rotation	
Latitude 0°	24j
Latitude 30°	28j
Latitude 60°	30.5j
Latitude 75°	31.5j
Moyenne	27.28j

I.3. Le mouvement de la terre :

La terre tourne autour de son axe dans une période de 24h et en tournant autour du soleil durant une période d'une année (365 jours 6 heures et 9 minutes et 4 secondes) avec une vitesse moyenne de 106000 km, qui n'est pas constante car la terre va plus vite quand elle est près du soleil, ceci étant démontré par la 3^{ème} loi de Kepler.

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers, le plan de cette ellipse est appelé **l'écliptique**. L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance terre/soleil ne varie que $\pm 17\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 150 millions kilomètres.

La terre tourne sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé **l'équateur** [6].

Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont schématisés sur la figure ci-dessous:

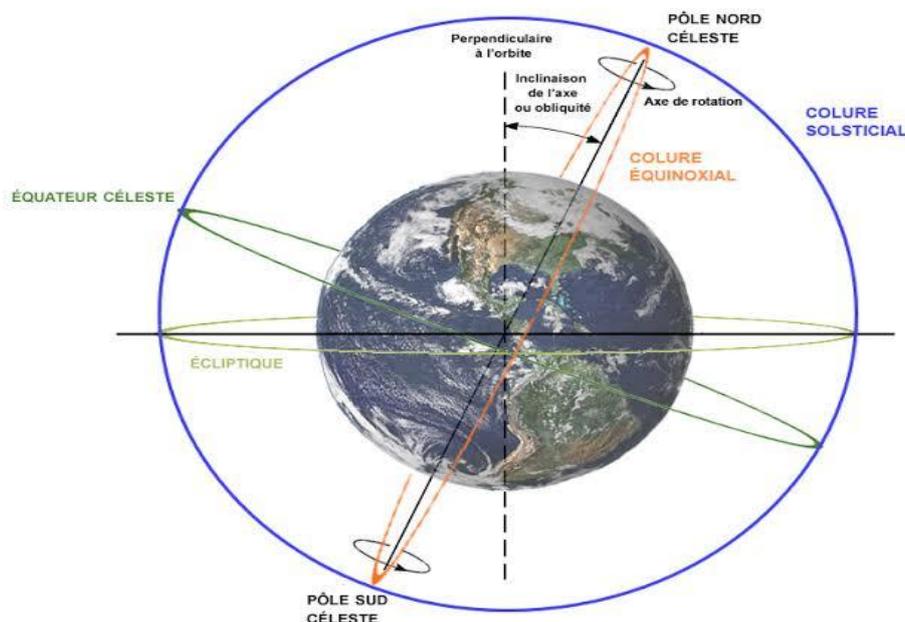


Figure I.2 : Mouvement du globe terrestre [6]

I.4. La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère fictive d'un rayon indéterminé, qui a pour centre le centre de la terre et sur laquelle les astres sont considérés comme projetés [7].

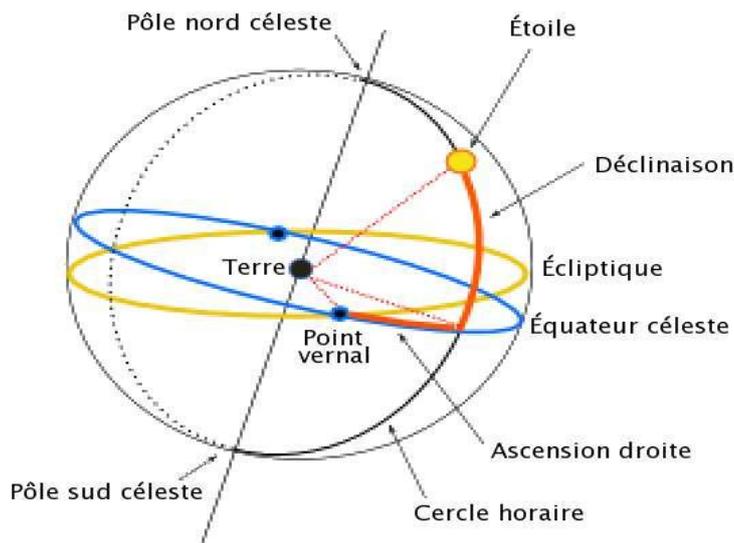


Figure I.3 : La sphère céleste [7]

I.5. Les coordonnées célestes :

La direction des objets peut-être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes [8]

I.5.1. Les coordonnées horizontales (également appelé système local ou système de coordonnées alt-azimutales)

Est un système utilisé en astronomie par un observateur au sol. Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- **La hauteur (h):** (l'angle d'élévation) c'est l'angle vertical entre le plan horizontal et l'objet visé. Il est compté de 0° à 90° vers le Zénith et de 0° à -90° vers le Nadir.

Parfois, au lieu de la hauteur à l'aide de distance zénithale (Z), qui est la distance angulaire de l'étoile à partir du zénith de l'observateur et qui varie de 0° à 180°. L'angle z est donc l'angle complémentaire de h, en fait : $z+h=90^\circ$

$$\sin(h) = \sin(\Phi) \sin(\delta) + \cos(\Phi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad \text{I.1}$$

- **L'azimut (a) :** c'est l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence. Il est compté de 0° à 360° d'Ouest en Est ou de 0° à 180° à partir du Sud vers l'Ouest. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \sin(\gamma) \sin(\lambda) / \cos(h) \quad \text{I.2}$$

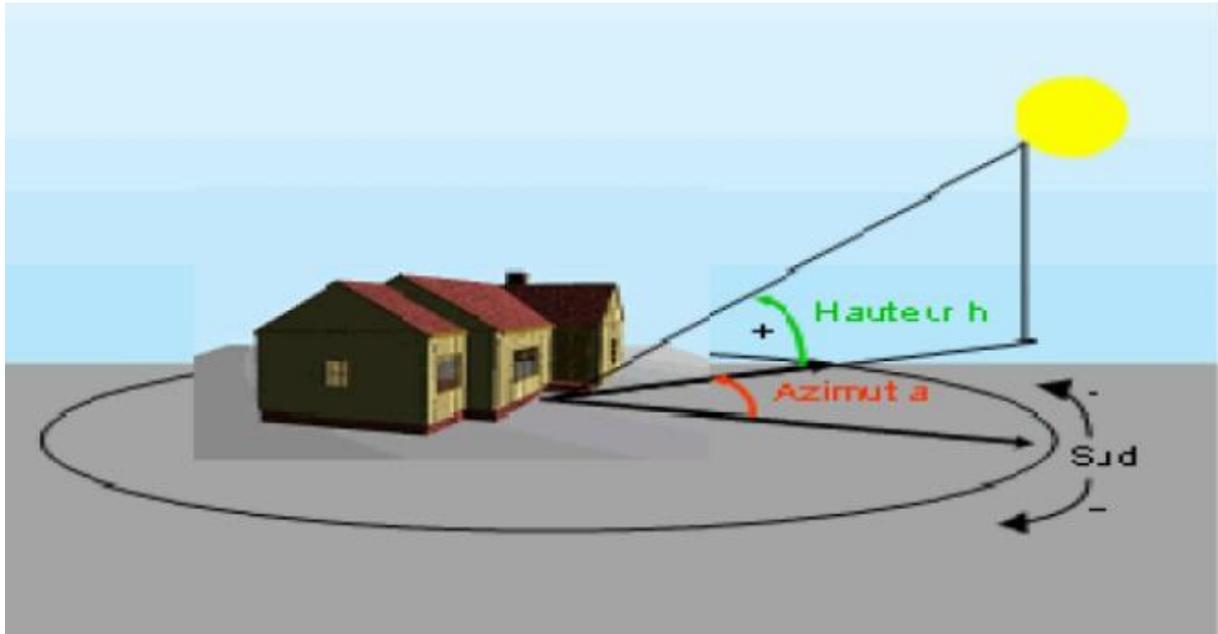


Figure I.4 : Les coordonnées célestes horizontales [8]

I.5.2. Les coordonnées géographiques terrestres

Les coordonnées géographiques d'un point de la surface terrestre sont sa longitude et sa latitude, qui permettent de le définir exactement.

- **La longitude (L)** : la longitude d'un point est l'angle formé par le plan méridien contenant ce point avec un plan méridien pris comme origine. Sa valeur est positive à l'Ouest et négative à l'Est du méridien.
- **La latitude (Φ)** : est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la normale de la terre passant ce point.

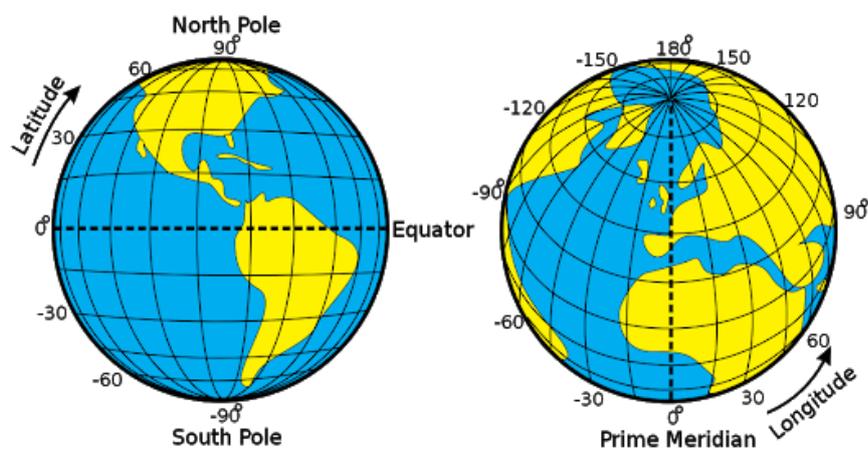


Figure I.5 : Les coordonnées géographiques terrestres [8]

I.5.3. Les coordonnées horaires

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation et n'ont aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence, le plan de l'équateur.

Les coordonnées horaires sont au nombre de deux :

- **L'angle horaire (ω)** : est l'angle formé entre la projection du soleil (cercle horaire) sur le plan équatorial à un moment donnée et la projection du soleil sur ce même plan au midi vrai.

Avec :

$\Omega > 0$ vers l'Ouest (compté positivement l'après-midi)

$\Omega < 0$ vers l'Est et $\omega = 0$ à midi solaire vrai (le soleil est dans le plan méridien du lieu)

- **La déclinaison (δ)** : le plan équatorial fait de son plan écliptique un angle constant. Appelé obliquité et noté δ . Dans l'hémisphère nord de notre planète, elle est positive au printemps et en été, négative le reste du temps, elle varie entre $+23^\circ 27'$ au solstice d'été (le 21 juin) et $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver (21 décembre).

$$\delta = 23.25 \sin \left[\frac{360(284+J)}{365} \right] \text{ En [Degré].} \quad \text{I.3}$$

Où J est le numéro du jour dans l'année, compté à partir du 1^{er} Janvier.

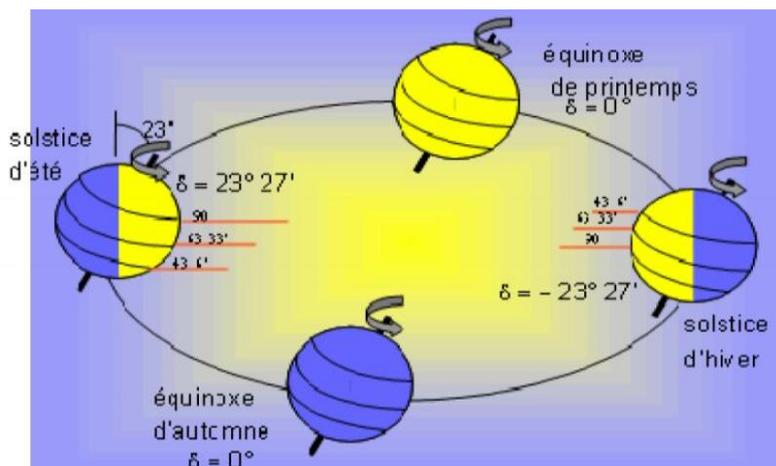


Figure I.6: Les coordonnées horaires [4]

I.6. Les temps solaires : [9]**I.6.1. Le temps solaire vrai (TSV)**

Il est défini par l'angle horaire ω entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré.

$$\text{TSV} = 12 + \frac{W}{15} \quad \text{I.4}$$

I.6.2. Le temps solaire moyen (TSM)

$$\text{Et} = \text{TSV} - \text{TSM} \quad \text{I.5}$$

Avec :

Et, l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM.

$$\text{Et} = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad \text{en [min]} \quad \text{I.6}$$

Où ;

$$N' = \frac{(N-81)360}{365} \quad \text{N est le nombre du jour dans l'année.}$$

I.6.3. Le temps universel (TU)

Est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) :

$$\text{TU} = \text{TSM} - \frac{\lambda}{15} \quad \text{I.7}$$

Où λ est la longitude.

$\lambda > 0$ pour les villes situées à l'Est de Greenwich ;

$\lambda < 0$ pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich ;

$\lambda = 0$ pour le méridien de Greenwich ;

I.6.4. Le temps légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état ; il est donné par :

$$\text{TL} = \text{TU} + \Delta H \quad \text{I.8}$$

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et le lieu considéré.

ΔH : 1 heure pour l'Algérie.

I.7. Durée du jour

Pour que l'on puisse déterminer la durée du jour, il faut connaître deux instants de la journée, qui sont le lever et le coucher du soleil. Ces deux instants ont lieu quand les rayons solaires sont confondus avec l'horizontale, c'est-à-dire $\sin h = 0$ [9]

$$\text{Sachant que : } w_l = -w_c = -\arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad \text{I.9}$$

La durée du jour solaire est donnée par la formule suivante :

$$DJ = \frac{1}{15} (w_c - w_l) = 2 \frac{w_l}{15} \quad \text{I.10}$$

Avec ;

DJ: En heures.

Les indices l et c désignent respectivement le lever et le coucher du soleil.

Φ est la latitude du lieu.

δ : est la déclinaison.

I.8. La constante solaire

La constante solaire hors atmosphère vaut en moyenne $m_0 = 1367 \text{ W/m}^2$. Des expériences fournies par la NASA donneraient 1353 W/m^2 . Cette constante, qui dépend de la distance Terre/soleil, varie de $\pm 3.5\%$ autour de sa valeur moyenne à laquelle correspond une irradiation énergétique de $500 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{h}$, soit 33.3 kWh/m^2 par jour de 24 heures, à incidence normale. A partir de là, on peut calculer l'éclairement énergétique extra-terrestre, dû au rayonnement solaire incident, à toute époque de l'année, et en tout point du globe sur une surface d'orientation quelconques [5].

I.9. Le potentiel solaire

L'Algérie est considérée comme l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. En effet, de part sa position géographique, ce pays dispose d'un potentiel qui dépasse les cinq milliard GWh/an, avec plus de 2500 heures d'ensoleillement en moyenne par an sur une partie très importante de son territoire. Cette durée peut dépasser 3800 heures d'ensoleillement dans les hauts-plateaux et le Sahara.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 kW/h sur la majeure partie du territoire national, ce potentiel est décomposé comme suit :

- au Nord, près de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$.
- au Sud, $2262 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ [10].

Le tableau suivant représente le potentiel solaire en Algérie :

Tableau I.2 : le potentiel solaire en Algérie [6]

Régions	Zone Côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie (kWh/m ² .an	1700	1900	2650

I.10. L'ensoleillement:

La durée d'insolation est définie habituellement comme la période pendant laquelle le rayonnement direct est supérieur à une valeur donnée (105 W/m²).

On peut mesurer la durée d'insolation (en heures) pendant un mois ou une année et présenter des résultats moyennés sur plusieurs années.

On utilise également :

- **La fraction d'insolation horaire** : c'est la durée d'insolation pendant une heure donnée rapportée à une heure.
- **La fraction d'insolation journalière** : définie pour une journée par une durée effective d'insolation/durée maximale d'insolation [11].

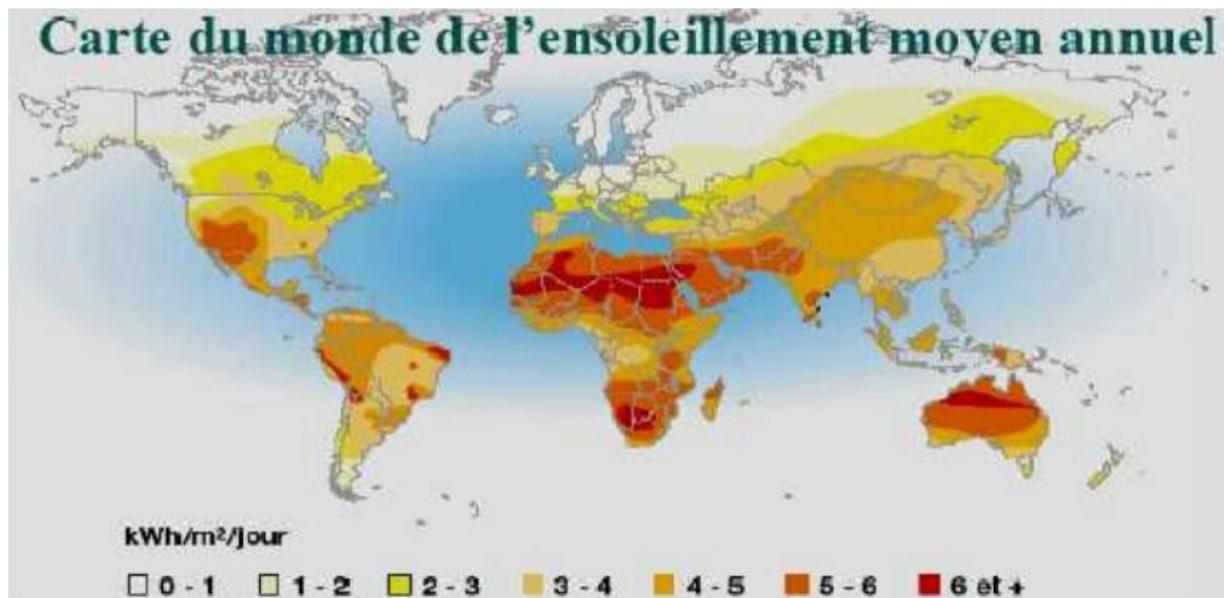


Figure I.7 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [11]

I.11. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. L'atmosphère terrestre perturbe grandement et par des processus variés le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, on peut distinguer plusieurs composantes :

I.11.1. Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère [12].

I.11.2. Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée [12].

I.11.3. Le rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion. Cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur [12].

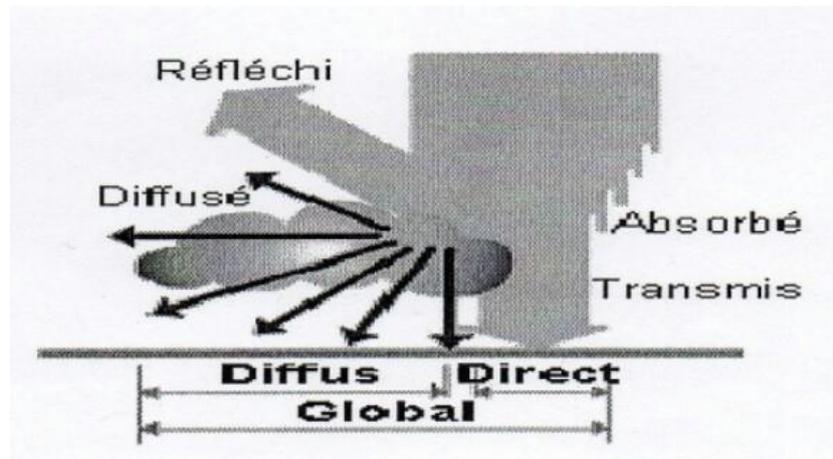


Figure I.8 : Composantes du rayonnement solaire reçu au niveau du sol terrestre [12]

I.11.4. L'albédo

Le rayonnement n'est pas entièrement absorbé par le sol dont les différentes couleurs indiquent des réflexions sélectives et diffuses.

On appelle albédo la fraction de l'énergie incidente diffusée par un corps lumineux. Ainsi pour le corps noir parfait l'albédo est nul alors qu'il vaut 0.90 pour la neige fraîche, 0.60 pour la neige tassée, 0.15 à 0.25 pour un sol nu, 0.05 pour la mer en été, alors qu'en hiver il est le double [2].

$$Alb = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie reçue}}$$

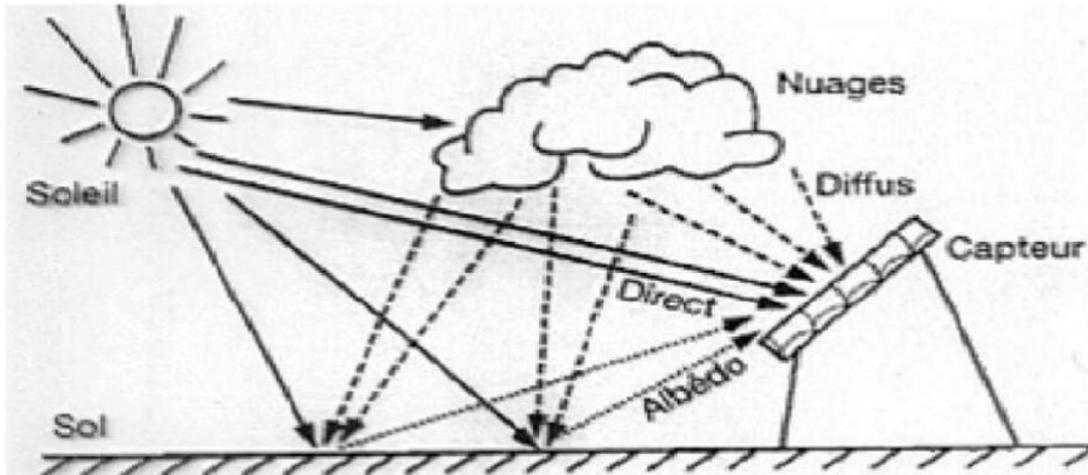


Figure I.9 : Schéma descriptive [2]

I.11.5. Le rayonnement global

C'est le rayonnement, reçu sur une surface horizontale, provenant du soleil et de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La figure ci-dessous illustre les différentes composantes du rayonnement solaire au niveau du sol [13].

Le rayonnement solaire global est composé de rayonnement de différentes longueurs d'ondes et intensités.

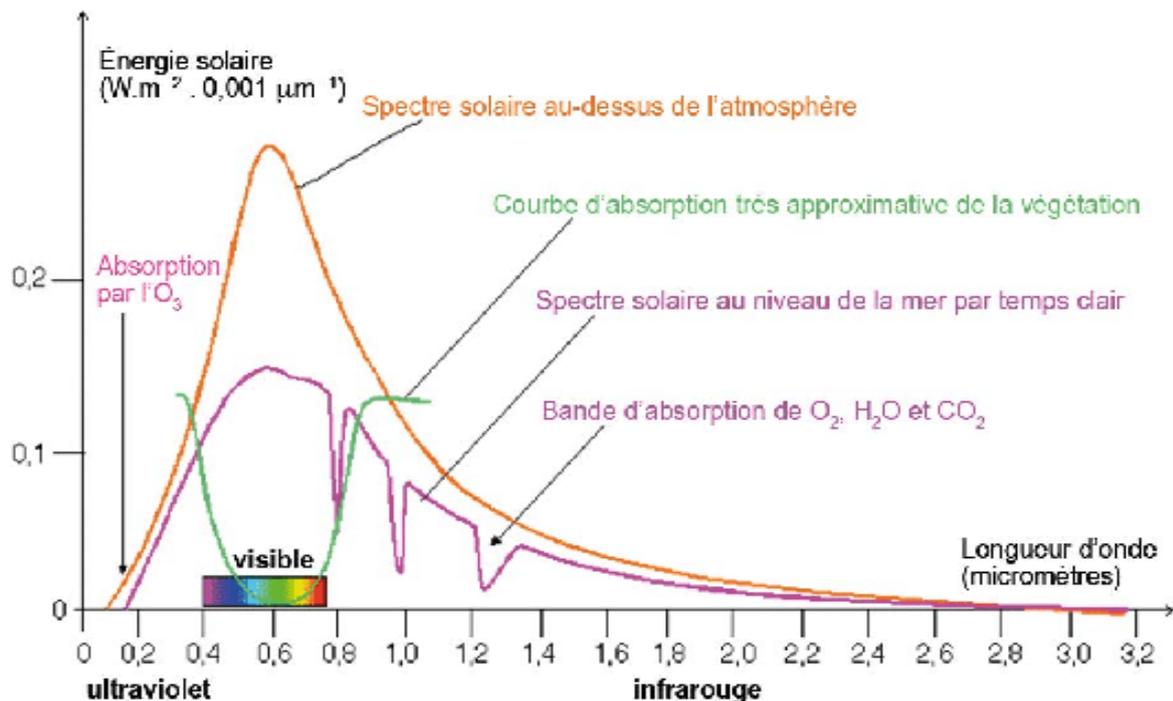


Figure I.10 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol [13]

Le maximum d'intensité a lieu dans le rayonnement visible, soit pour une longueur d'onde de $0.5\mu\text{m}$.

L'énergie totale est pratiquement émise pour des longueurs d'ondes situées entre 0.2 et $3.0\mu\text{m}$. La surface située sous la courbe représente la constante solaire.

Cette énergie émise est échangée avec la terre ou avec tout corps au sol terrestre et se traduit par une sensation de chaleur. L'échange de chaleur attribué à l'émission d'ondes électromagnétiques de longueurs d'ondes comprises entre 0.1 et $100\mu\text{m}$, par la matière du fait de sa température, est appelé rayonnement thermique. Il ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire matériel et obéit aux lois du rayonnement thermique.

I.12. Rayonnement solaire en Algérie

L'Algérie est un pays qui possède un gisement solaire important encore inexploité, cette forme d'énergie présente beaucoup d'avantages en conversion thermique pour le chauffage et la production d'électricité principalement, ainsi pour son climat, la puissance maximale en tout point dans le pays est d'environ 1 kW/m^2 .

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair au mois de Juillet) dépasse les $6\text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ et l'énergie annuelle maximale moyenne en Algérie est de l'ordre $2500\text{ kWh/m}^2.\text{an}$ [13].

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques en Algérie :

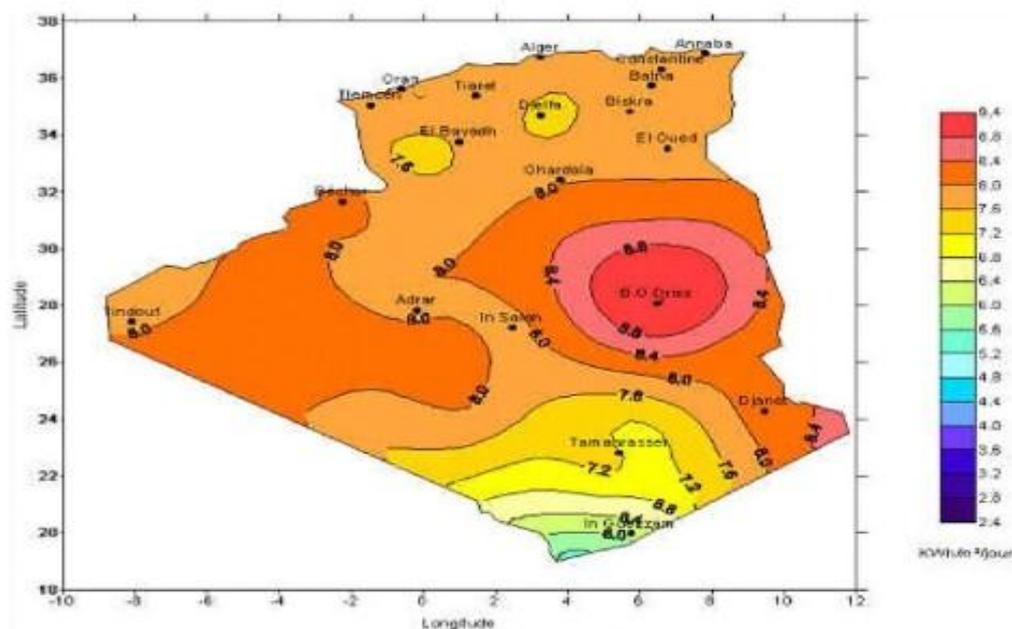


Figure I.11 : Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire algérien au mois de Juillet [13]

I.13. Effet de serre :

La couverture verrière transparente transmet le maximum de rayonnement solaire et elle est opaque aux infrarouges émis par la surface absorbante. Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire. La chaleur est donc bloquée dans la marmite. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre.

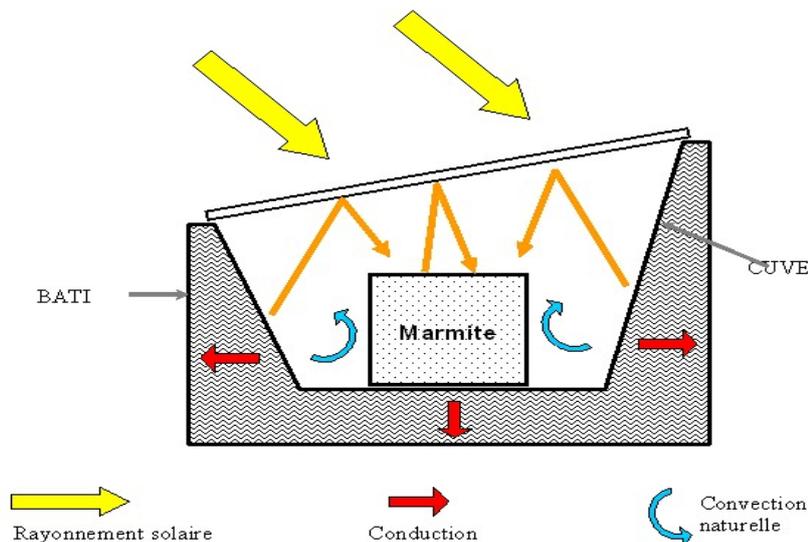


Figure I.12 : l'effet de serre au sein d'un distillateur [4]

I.14. Principe de réflexion.

La réflexion est le changement de direction subi par un rayonnement ou une onde sonore frappant une surface, sans changement de milieu.

On parle de réflexion lorsqu'un rayon lumineux change brutalement de direction tout en restant dans le même lieu de propagation. [11, 12].

I.14.1. Réflexion sur une surface plane

On considère le cas de réflexion quand un rayon donne sur une surface plane. Deux lois permettent de décrire géométriquement (sans tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière) ce que devient un rayon après réflexion sur une surface plane :

- ❖ **1^{ère} loi** : le rayon réfléchi appartient au plan d'incidence défini par le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante.
- ❖ **2^{ème} loi** : l'angle de réflexion, défini par l'angle entre le rayon réfléchi et la normale à la surface réfléchissante.

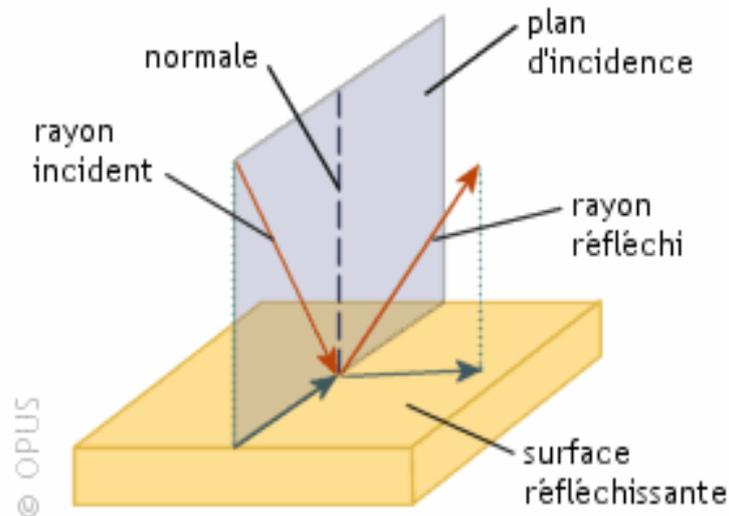


Figure I.13 : la réflexion d'un rayon lumineux sur une plaque plane [12]

I.14.2. Réflexion sur une surface courbée

Si la surface réfléchissante est une courbe, celle-ci peut être décomposée en une multitude de plans infiniment petits. Ainsi, au point d'impact du rayon incident sur la surface réfléchissante, il faut considérer le plan tangent en ce point. On obtient ainsi la normale du plan tangent au point, et les deux lois de la réflexion sont alors d'application pour déterminer le rayon réfléchi.

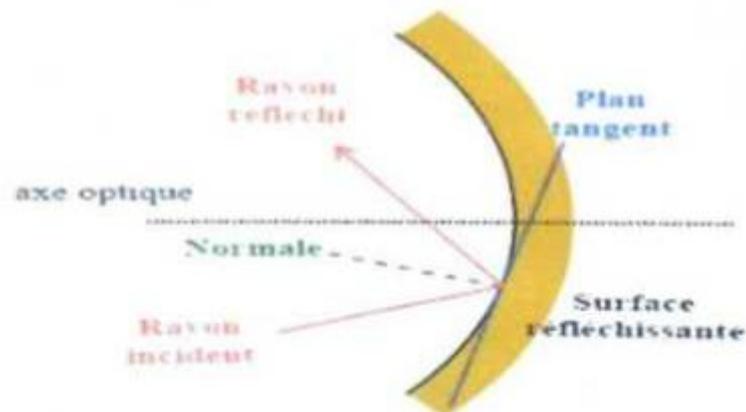
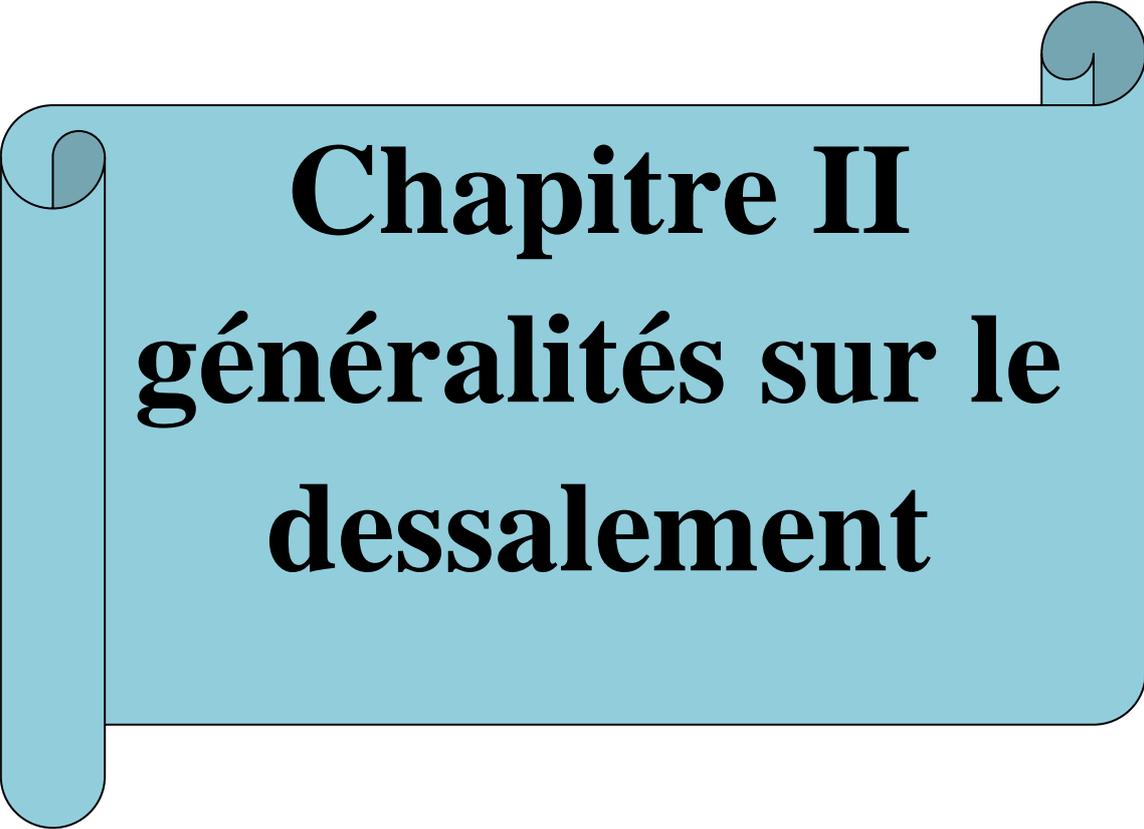


Figure I.14. Réflexion sur une paroi courbée [12]

I.15. Conclusion :

L'énergie solaire apparaît comme une bonne alternative aux autres énergies. C'est une énergie durable et disponible.

Dans ce chapitre, on a étudié le gisement solaire car cette étude est très importante pour déterminer la position de soleil au cours d'une journée ou d'une année, et nous avons présenté les différents types de rayonnement.



Chapitre II
généralités sur le
dessalement

II.1. Introduction

Le dessalement des eaux de mer et saumâtre est une technique pour produire de l'eau potable. En effet, ces dernières années les coûts de production d'eau potable par m³ des usines de dessalement n'ont cessé de diminuer, ce qui a donné la possibilité à beaucoup de pays pas seulement les pays riches d'utiliser ce procédé.

II.2. Historique

L'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau a été envisagée dès 1872 dans le nord du Chili, par l'ingénieur **suédois Carlos Wilson [13]**; Il permettait de fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer [13]. Ce système ne fonctionna que jusqu'en 1910 à cause de l'accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur. La distillation solaire connut une période creuse entre 1880 et la première guerre mondiale. En 1920, **Kaush** utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires; il en résulta l'apparition de nouveaux appareils (types toit, couverture en V, plateau incliné...etc.) [13].

Une installation due à **Ginis** tous groupant 30 appareils de 1 m² fut réalisée et exploitée à Bengardane en Tunisie en 1929. Au début des années 30, **Trifinov** proposa un distillateur incliné; en 1938 **Abbot** utilisa des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire, le tout est acheminé dans des tubes contenant de l'eau [13].

Maria Telks inventa en 1945 un nouveau type de distillateur solaire de forme sphérique, qui fut utilisé par la marine américaine; un grand nombre de ce modèle, environ 2000 a été utilisé pendant la 2^{ème} guerre mondiale. En 1969, **Cooper** proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur solaire type serre. Depuis les années 70, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, parmi lesquels, nous pouvons, sans être exhaustifs citer :

- Le distillateur à effet multiple (Oltra, 1972; Bartali, 1976) [14].
- Le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné (Howa, 1961 Akhtamov et al, 1978) [14].
- Le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches (Frick et Sommerfeld) 1973 Soda et al. 1980 ; Moustafa 1979).
- Combinaison du distillateur solaire à effet de serre (Salcuk, 1970, 1971; Sodha et al, 1980).
- Distillateur solaire chauffe indirectement (Soliman 1976; Malik et al. 1973, 1978, Sodha et al 1981).

II.3.L'eau :

L'eau est un liquide inodore, incolore et sans saveur, recèle des propriétés physiques et chimiques qui lui confèrent un rôle essentiel pour les écosystèmes et vital pour les êtres vivants.

La terre est recouverte d'eau à 71%. Cependant 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée pour être potable ou même ne serait-ce que pour être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie. Les besoins en eau sont principalement répartis entre 4 types de consommation :

- 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage, hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géométrique, etc....).
- 18% est consommée par les particuliers.
- 15% est utilisée par l'agriculture.
- 12% est consacrée par un usage industriel [15].

L'eau peut se trouver sous trois états : liquide, vapeur ou solide.

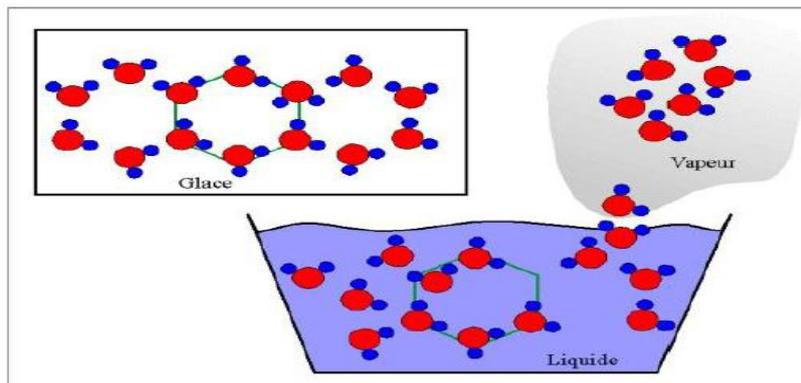


Figure II.1: Les différentes dispositions des molécules d'eau dans ses trois états [15].

II.3.1. Propriétés de l'eau :

▪ La chaleur spécifique

C'est l'énergie nécessaire pour élever de 1°C la température d'un gramme d'une substance. La chaleur spécifique de l'eau est élevée ($C_p = 4,2 \text{ J/g}^\circ\text{C}$), ce qui a pour conséquence la stabilité de la température et le maintien des conditions favorables au développement de la vie (ex : océans, corps humain, ...etc). La raison de ce phénomène est la multiplicité des liaisons hydrogène qui doivent être rompues pour que l'énergie cinétique des molécules puisse augmenter [16].

▪ La chaleur de vaporisation ou chaleur latente

C'est la quantité de chaleur que doit absorber 1g de liquide à température constante pour passer de l'état liquide à l'état gazeux. La chaleur de vaporisation de l'eau est aussi très élevée ($L_v = 2,26 \text{ kJ/g}$), ce qui nécessite une grande énergie à rompre les liaisons hydrogène pour que les molécules de l'eau se dissocient et changent d'état (Exemple d'application : l'évaporation d'une eau salée lors de la distillation solaire) [16].

▪ Pouvoir de cohésion, adhérence et tension superficielle

Les liaisons hydrogène ont une durée de vie de 10 à 12 secondes dans l'eau, mais elles ne cessent de s'en former, ce qui donne une force qui maintient les molécules d'eau entre elles : C'est **la cohésion**. L'attraction mutuelle entre les molécules de substances différentes eau-paroi (ex : gouttelettes d'eau-vitre en verre dans le cas de la distillation solaire) s'appelle **l'adhérence**. Par contre **la tension superficielle** résulte de la cohésion et restreint le nombre de molécules à la surface d'un liquide. Les gouttes ainsi formées ont un rapport surface/volume minimale qui permettent la formation d'un maximum de liaisons hydrogène. L'avantage de cette propriété est la possibilité qu'on certaines surfaces à pouvoir retenir un plus grand volume d'eau. On peut observer ce phénomène lors de la condensation de la vapeur d'eau sur la vitre en verre d'un distillateur solaire [16].

▪ L'eau qui est très fluide

Les molécules d'eau peuvent facilement glisser les unes sur les autres. L'eau est un très bon solvant. En effet, l'eau dissout un grand nombre de corps ioniques, comme les sels par exemple du fait du caractère polaire de ses molécules [16].

▪ L'eau ne peut se comprimer, ni augmenter de volume

La disponibilité de l'eau (surtout l'eau douce) et les propriétés extraordinaires qu'elle recèle lui confèrent un rôle primordial pour la survie de l'humanité. En effet, un pays qui manque d'eau est un pays qui ne peut ni nourrir sa population, ni se développer. D'ailleurs, la consommation en eau par habitant est considérée comme un indicateur du développement économique d'un pays. Pour cela, on va essayer de donner un aperçu général de la disponibilité de l'eau douce dans le monde [16].

▪ Quelques propriétés de l'eau en fonction de la température

Temps. (°C)	Masse volumique (g/cm ³)	Chaleur massique (J/g·K)	Viscosité (μPa·s)	Pression saturante (bar)	Enthalpie de vaporisation (kJ/kg)
0	0,99984	4,2176	1793	0,00611	2500,5
10	0,99970	4,1921	1307	0,01228	2467,9
20	0,99821	4,1818	1002	0,02338	2453,4
30	0,99565	4,1784	797,7	0,04245	2429,6
40	0,99222	4,1785	653,2	0,07382	2405,9
50	0,98803	4,1806	547,0	0,12346	2309,9
60	0,98320	4,1843	466,5	0,19936	2357,7
70	0,97778	4,1895	404,0	0,31181	2333,1
80	0,97182	4,1963	354,4	0,47379	2308,2
90	0,96535	4,2050	314,5	0,70123	2282,7
100	0,95840	4,2159	281,8	1,01325	2256,6

Tableau II.1 : Les propriétés de l'eau en fonction de la température.

III.3.2. Classification des eaux selon la salinité

Type d'eau	Salinité (mg/L)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1 000 – 5 000
Eau modérément saumâtre	5 000 – 15 000
Eau très saumâtre	15 000 – 35 000
Eau de mer	35 000 – 42 000

Tableau II.2 : Classification des eaux selon la salinité.**II.3.3. L'eau potable**

D'après l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) une eau est considérée comme potable si sa salinité est comprise entre 100 et 1000 mg/l, soit 0.1 et 1g/l. La norme de la salinité de l'eau produite pour la consommation se situe en général autour de 400 mg/l.

Pour une utilisation industrielle en revanche, une eau de salinité de 20 à 50 g/l peut-être acceptée [17].

Le risque d'une pénurie mondiale existe bel et bien. Donc, pour faire face à cette pénurie et tenter d'inverser cette tendance, diverses solutions existent ou peuvent être développées :

- L'amélioration des techniques d'irrigation ;
- La rénovation des structures de production et de distribution d'eau potable;
- La préservation des réserves ;
- La lutte contre la pollution ;
- Le recyclage de l'eau ;
- La construction de barrages ;
- Le dessalement et la distillation des eaux de mers et des eaux usées.

II.4. Techniques de dessalement d'eau :

Le dessalement de l'eau est un processus qui permet de supprimer les sels contenus dans l'eau de mer et l'eau saumâtre.

Il existe essentiellement deux familles de technologie de dessalement utilisées dans le monde d'aujourd'hui. Il s'agit notamment de technologies thermiques et à membrane.

Parmi les techniques précitées, la distillation et l'osmose inverse sont les technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement de l'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés sur le marché mondial. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine, à cause des problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'important investissement qu'ils requièrent. Quel que soit le procédé de séparation envisagé, toutes les installations de dessalement comportent quatre étapes :

- Le pompage de l'eau de mer avec une filtration grossière.
- Un prétraitement consistant une filtration plus fine avec l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte.
- Le procédé de dessalement lui-même.
- Le post-traitement avec une éventuelle déminéralisation de l'eau produite.

A l'issue de ces quatre étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement [18].

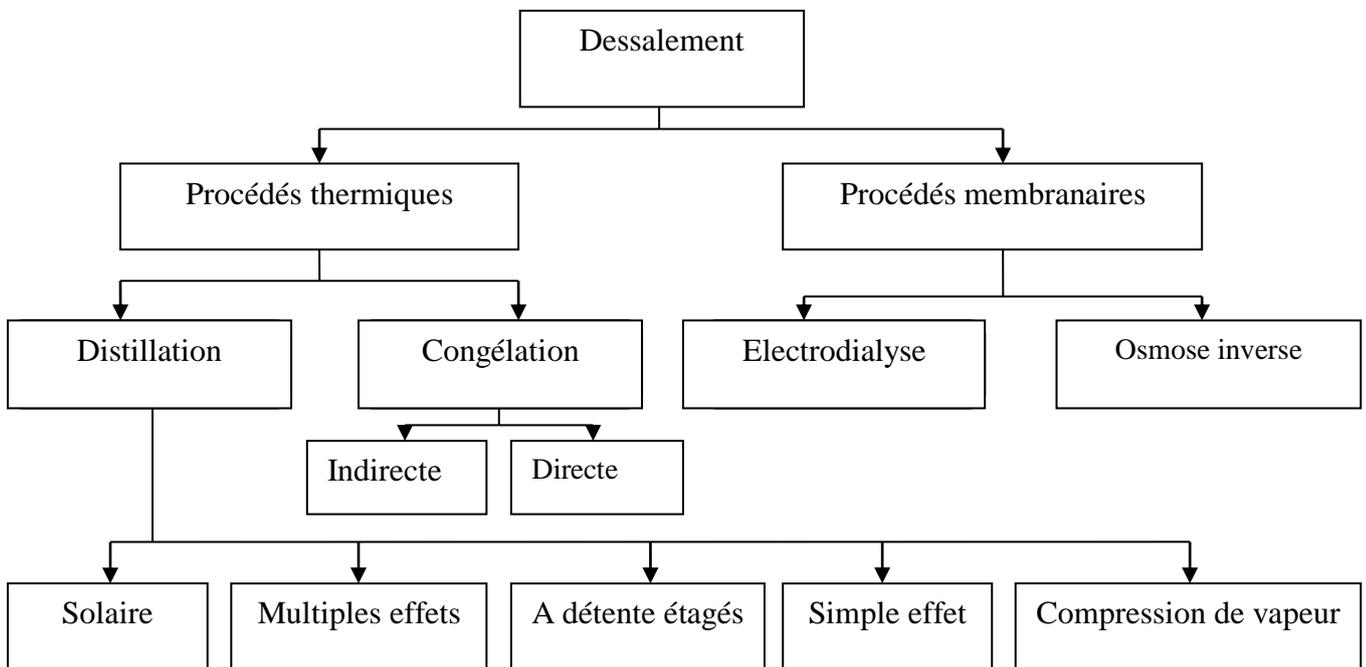


Figure II.2 : Schéma représentatif des différents procédés de dessalement de l'eau de mer.

II.4.1. Les procédés membranaires

Les principaux procédés à membrane utilisés dans le domaine du dessalement sont : l'électrodialyse et l'osmose inverse.

II.4.1.1. L'électrodialyse

C'est un procédé chimique qui permet de séparer les ions Na^+ et les ions Cl^- contenus dans une solution salée afin de ne conserver que les molécules d'eau.

L'électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'une électrolyte soumise à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, dans une cellule d'électrodialyse dans laquelle circule une solution saline la cathode attire les cations (Na^+) et l'anode attire les anions (Cl^-) ce qui permet d'obtenir de l'eau douce.

Les membranes sélectives sont placées entre la cathode et l'anode, il y aurait donc une concentration et une combinaison dans certains compartiments ou la solution s'enrichit en sels (compartiments de concentration), alors que dans d'autres la concentration saline diminuera [19].

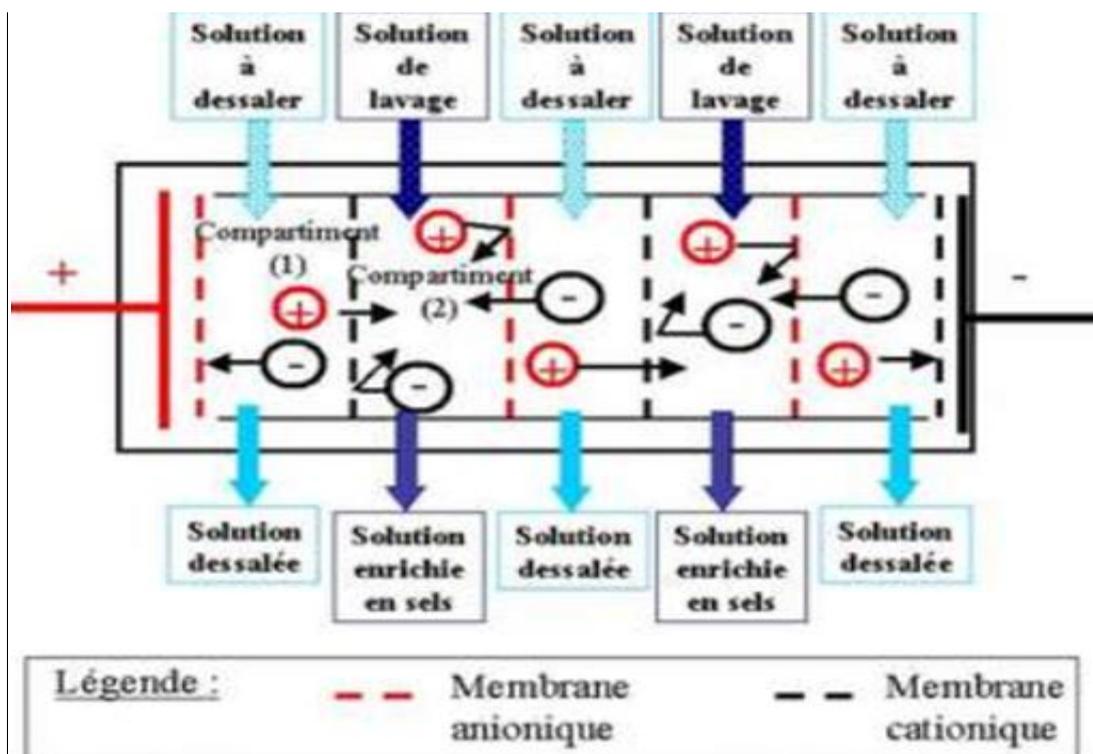


Figure I.3 : Unité électrodialyse [19].

II.4.1.2. L'osmose inverse

C'est une technique de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous une pression de l'ordre de 54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer (plus la concentration en sel de l'eau est élevée, plus la pression est autant plus forte). Les membranes polymères semi-perméable, laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous et les molécules inorganiques de 10^{-7} m de taille. La figure I.4 montre le principe de l'osmose et de l'osmose inverse [20].

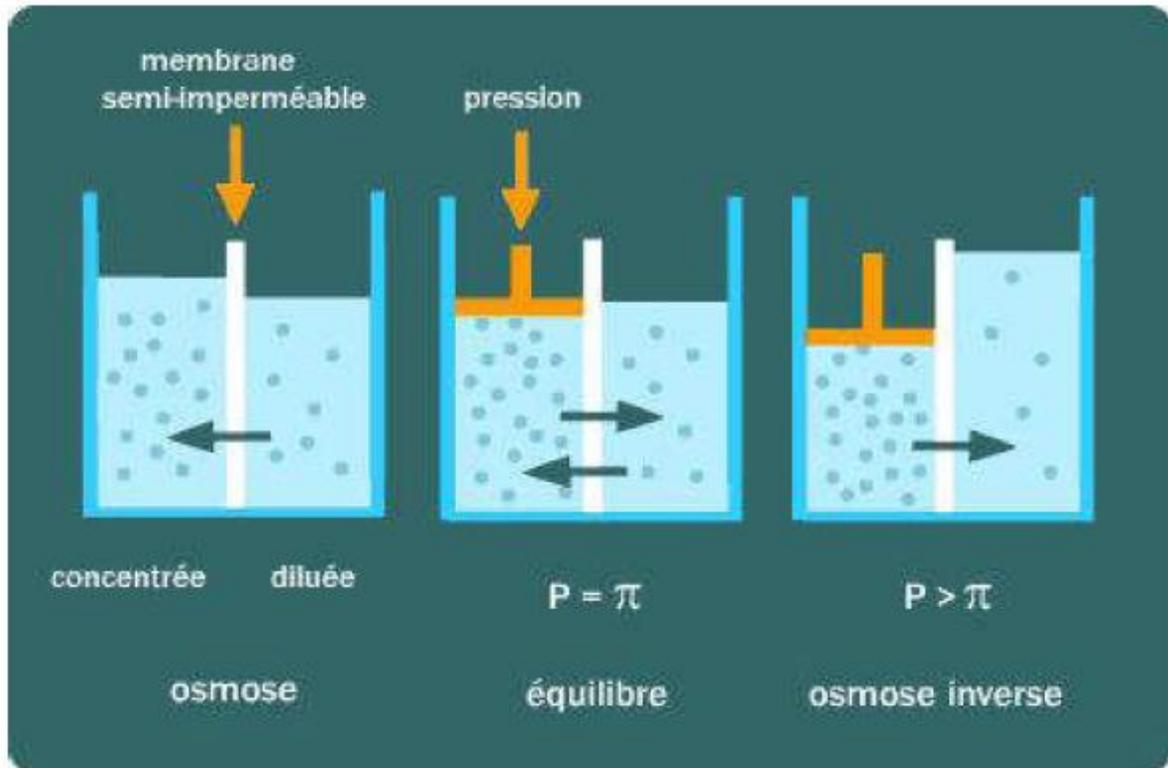


Figure I.4: principe de l'osmose inverse [20].

II.4.2. Les procédés thermiques :

Ces procédés font intervenir un changement de phases, le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée pour produire de la vapeur d'eau qui est à son tour condensée pour donner de l'eau douce, mais l'autre processus basé sur la diminution de température pour produire l'eau douce [21].

II.4.2.1 Procédé de congélation :

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Lorsqu'on congèle une solution aqueuse (eau de mer), les cristaux de glace formés sont constitués d'eau pure, le soluté ou polluant restant dans la phase liquide aqueuse. On distingue deux types de procédés par congélation, cette dernière pouvant être « **directe** » ou « **indirecte** » [22].

$$\Delta T = K \cdot m/M$$

M : masse molaire du soluté (kg/mol)

m : molalité du soluté (mol/kg)

K : constante de congélation de l'eau (K. (kg/mol)²)

a. Congélation directe

Le principe de la congélation directe repose sur la formation de cristaux de glace par contact direct entre un réfrigérant et l'eau de mer, ce réfrigérant peut-être l'eau de mer elle-même, la chaleur est soustraite à la saumure par une évaporation flash sous pression réduite. Ce procédé est appelé VFVC (Vacuum Freezing Vapeur Compression) dans la littérature anglo-saxonne, la congélation directe peut également être assurée par un réfrigérant se conduisant à 0 ; le refroidissement est obtenu par la vaporisation de butane liquide et froid injecté sous pression directement dans la saumure, le procédé est alors appelé SRF (Secondary Réfrigérant Freeze)[23].

b. Congélation indirecte

Dans le cas de la congélation indirecte le refroidissement est assuré par un échangeur de chaleur et une couche de glace est déposée sur les parois froides de l'échangeur dans le procédé par congélation directe, l'eau produite peut toute fois être polluée par des traces de réfrigérant, ce problème ne se pose plus si l'on travaille par congélation indirecte mais dans ce cas l'eau peut encore être polluée par de la saumure piégée entre les cristaux de glace et les conditions opératoires doivent être parfaitement maîtrisées [23].

II.4.2.2 Procédé de La distillation :

La distillation est un procédé de séparation selon lequel un composé volatil d'une solution est évaporée et ensuite condensé. Cette technologie est la plus ancienne utilisée pour dessaler l'eau de mer.

On distingue deux principaux procédés utilisant la distillation : la distillation à multiple effet et la distillation à détente étagées.

II.4.2.2.1 Distillation simple effet

Le distillateur simple effet reste un dispositif très présent dans la littérature, malgré son très mauvais rendement énergétique, donc sa quasi-disparition dans le domaine industriel, cela parce que, c'est un dispositif, dont le principe est très facile à comprendre. C'est un puissant moyen pédagogique. Les premières unités industrielles de distillation d'eau de mer sont apparues à bord des navires. C'étaient dans la plupart des cas des bouilleurs simple effet à faisceau noyé.

➤ Principe :

Un faisceau tubulaire, alimenté par un fluide chauffant est plongé dans l'eau de mer à la partie basse d'une enceinte étanche et sous vide. Le fluide chauffant provoque alors une évaporation de l'eau de mer. La vapeur montante produite se condense sur un autre faisceau tubulaire placé dans la partie haute de l'enceinte, parcouru cette fois-ci par de l'eau de mer froide. La vapeur qui se condense est alors recueillie dans un réceptacle, La température d'ébullition de l'eau peut être abaissée dans la mesure où l'on réduit la pression dans la chambre d'évaporation [24].

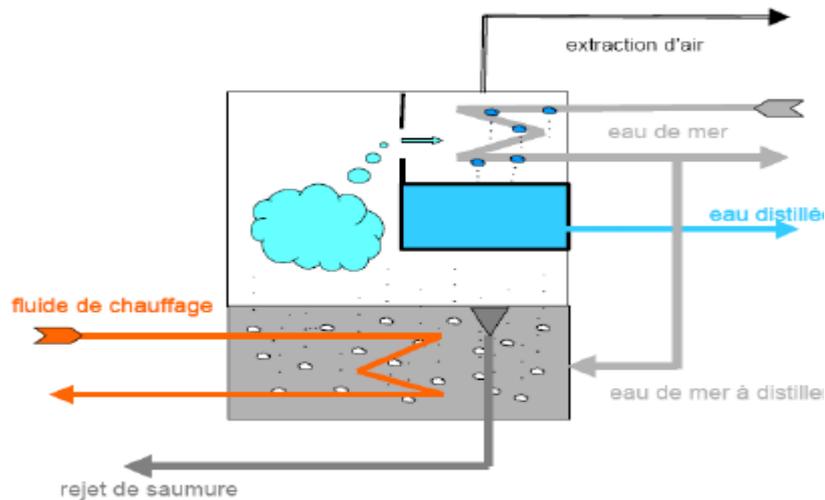


Figure I.5 : Principe de distillation à simple effet [24].

II.4.2.2.2 La distillation à multiples effets MED :

Ce procédé permet d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur à simple effet afin d'en augmenter le rendement en récupérant la chaleur d'apport pour une nouvelle distillation et le processus s'effectue comme suit :

- Dans la première cellule de distillation, l'eau de mer ruisselle sur un serpentin de tubes chauffés ou sur des plaques, grâce à la chaudière. Elle se transforme ainsi en vapeur à seulement 70°C, grâce à une pression inférieure à la pression atmosphérique. Cela évite l'entartrage des tuyaux
- L'eau de mer non transformée en vapeur s'accumule au fond de la cellule.

Elle se concentre davantage de sels car celui-ci n'est pas vaporisable

- L'eau est pompée, puis envoyée dans la cellule 2
- La vapeur entre dans la deuxième cellule, puis se condense dans le serpentin.

Ce passage à l'état liquide dégage assez d'énergie pour en céder à l'eau de mer. Celle-ci ruisselle sur les tubes ainsi chauffés et se vaporise

Le même processus se répète dans la troisième cellule. En pratique, on peut placer en série jusqu'à 6 ou 7 cellules de distillation

- Le dernier serpentin est refroidi par l'eau de mer. La vapeur condensée dans les serpentins donne de l'eau douce. Il faut 2 à 4 litres d'eau salée pour obtenir 1 litre d'eau douce [25].

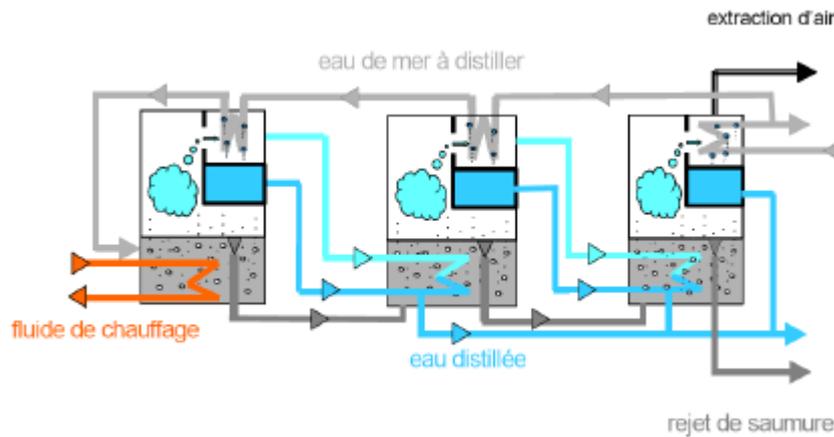


Figure II.6 : le principe de distillation à effets multiples (MED) [25].

II.4.2.2.3 La distillation à détente étagés MSF :

Cette technique consiste à maintenir l'eau salée sous pression pendant toute la durée du chauffage. L'eau salée qui est introduite dans une enceinte (étage) où règne une pression réduite, va s'évaporer instantanément dès que sa température atteint les 120°C. Cette vaporisation instantanée par détente est dite flash. L'eau évaporée, va se condenser sur des tubes condenseurs placés en haut de la chambre. Le condensat ainsi produit est une eau liquide qu'on récupère dans des réceptacles en dessous des tubes. L'ébullition de l'eau salée qui se refroidit, va s'arrêter dès que sa température atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans le premier étage. Le même principe est reproduit dans le deuxième étage où il y'a une pression plus faible. L'évaporation de l'eau salée est ainsi réalisée par détente successive dans une série de n étages où règnent des pressions de plus en plus réduites [20].

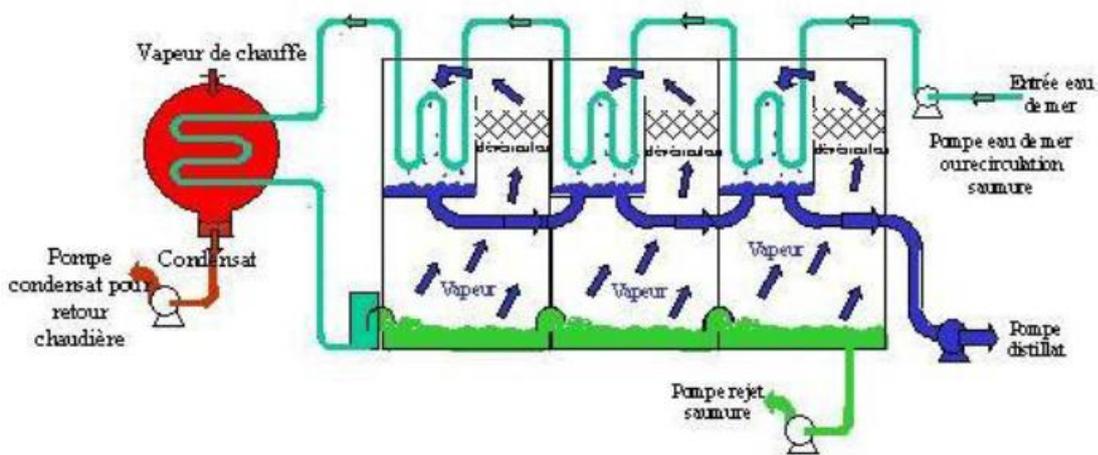


Figure II.7 : distillateur à Multi stage flash [20].

II.4.2.2.4 La distillation par compression de vapeur :

Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur ; ou l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur, sa pression ayant été élevée grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner, la vapeur condensée de l'eau douce est extraite ainsi que la saumure concentrée contenant du sel.

A cause de problème de corrosion et d'entartrage des composants un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60°C (l'eau salée bout sous vide partiel) avec un facteur de concentration égal à deux ; 1 m³ d'eau salée (35g/l de sel) donnera 500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer, ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowatt heures électriques [26].

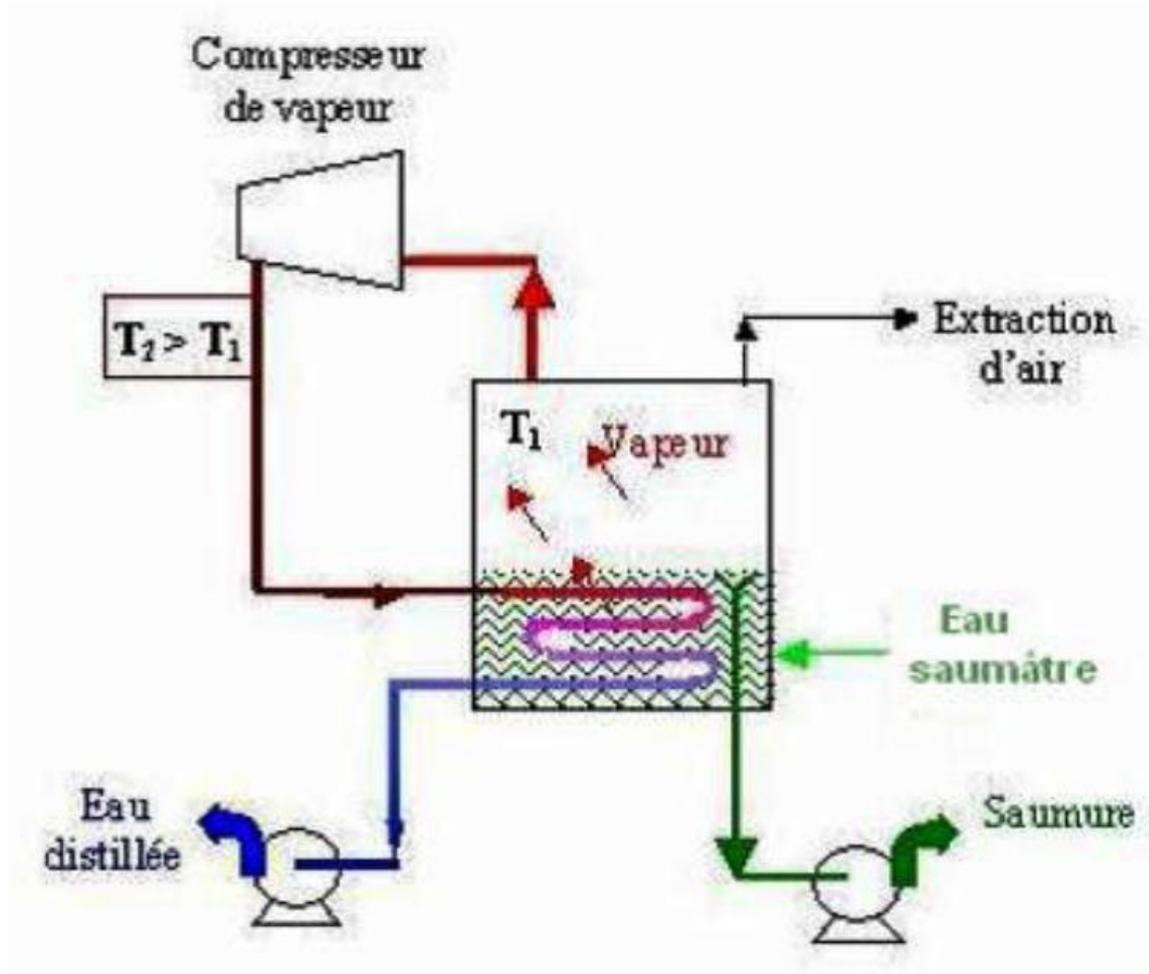


Figure II.8: distillateur à compression de la vapeur [26].

II.5. Distillateur solaire

II.5.1. Introduction

La distillation (ou dessalement) par énergie solaire des eaux salées ou usées est utilisée pour produire et approvisionner en eau potable de petites communautés dans des régions isolées et ensoleillées où l'eau douce est insuffisante et/ou de mauvaise qualité.

L'approche élémentaire de la distillation solaire est l'analogie faite avec le cycle hydrologique naturel. En effet, l'homme a reproduit en un petit modèle ce cycle naturel qu'on appelle le distillateur solaire [16].

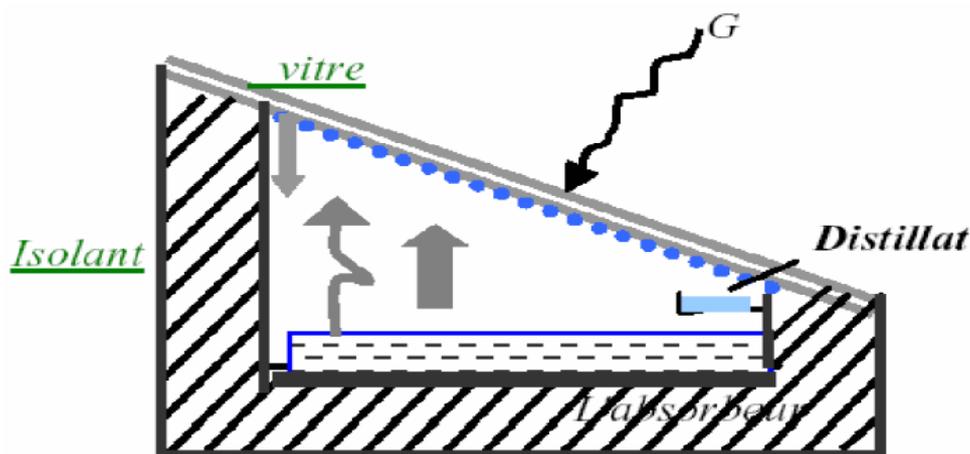


Figure II.9 : distillateur solaire [16].

➤ Qu'est ce qu'un distillateur solaire

C'est un procédé qui consiste à chauffer l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensat dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien.

II.5.2. Les différents types de distillation solaire :

On distingue deux types de distillateurs solaires à effet de serre : distillateurs statiques et distillateurs à ruissellement.

II.5.2.1. Les distillateurs statiques :

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est immobile. Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

II.5.2.1.1. Distillateur solaire plan :

Ce système de distillateur solaire plan à simple pente, est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau

(eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action de flux solaire, transmis par la couverture transparente, l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore.

La vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensât est récupéré par un récepteur. Un appoint d'eau compense le débit de distillât [27].

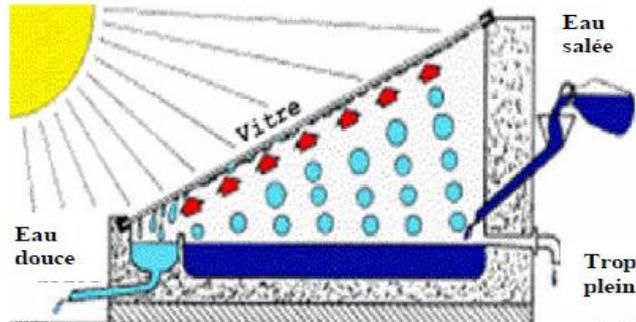


Figure II.10 : distillateur solaire plan à simple pente [27].

La Figure ci-dessous représente un autre type de distillateur plan mais à doubles pentes. Il a le même principe que le distillateur à simple pente. Il a deux côtés l'un est exposé au soleil et l'autre côté joue le rôle de condenseur qui donne l'avantage d'accélérer la condensation.

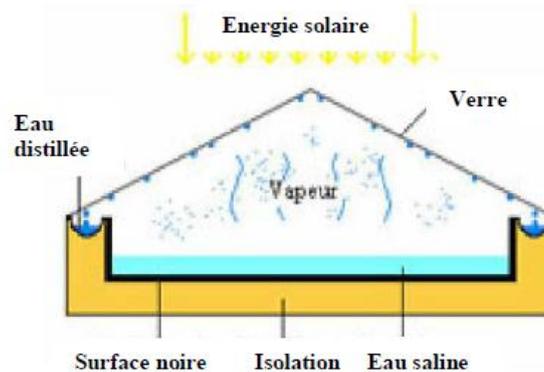


Figure II.11 : distillateur solaire plan à double pente [27].

II.5.2.1.2. Distillateur à cascade

Un distillateur solaire à cascades est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre (figure II.12), le même principe appliqué dans un distillateur plan, sauf que l'absorbeur a une forme en cascade. L'eau salée versée dans le distillateur se répartie sur plusieurs petits bassins, on remarque que si la masse d'eau est faible, l'eau s'échauffe plus rapidement et s'évapore [25].

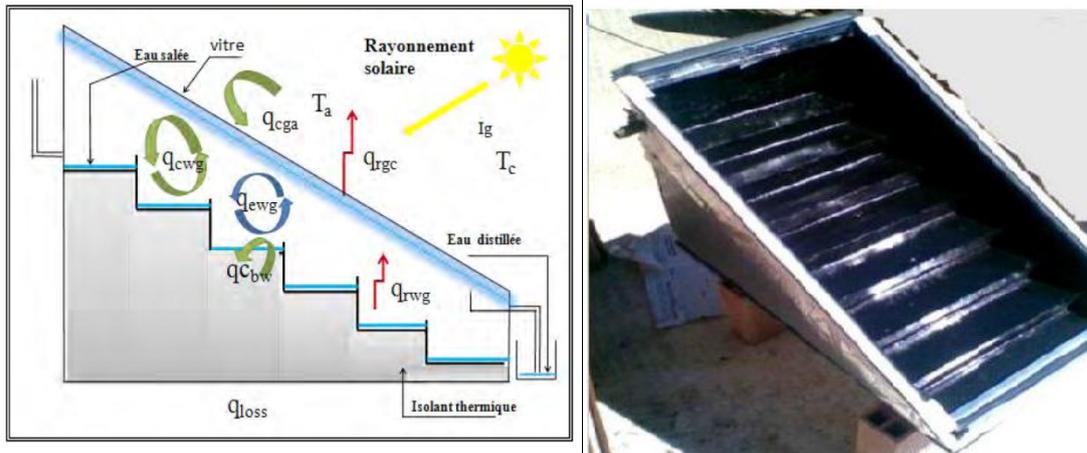


Figure II.12 : distillateur solaire incliné à cascade [25].

II.5.2.1.3. Le distillateur sphérique :

C'est un distillateur en plexiglas figure II.13, composé de trois parties principales; une demi-sphère supérieure qui transmet le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui récupère le distillât et un bac horizontal en métal noirci contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian.

Un essuie-glace entraîné par moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du distillateur plan [29].

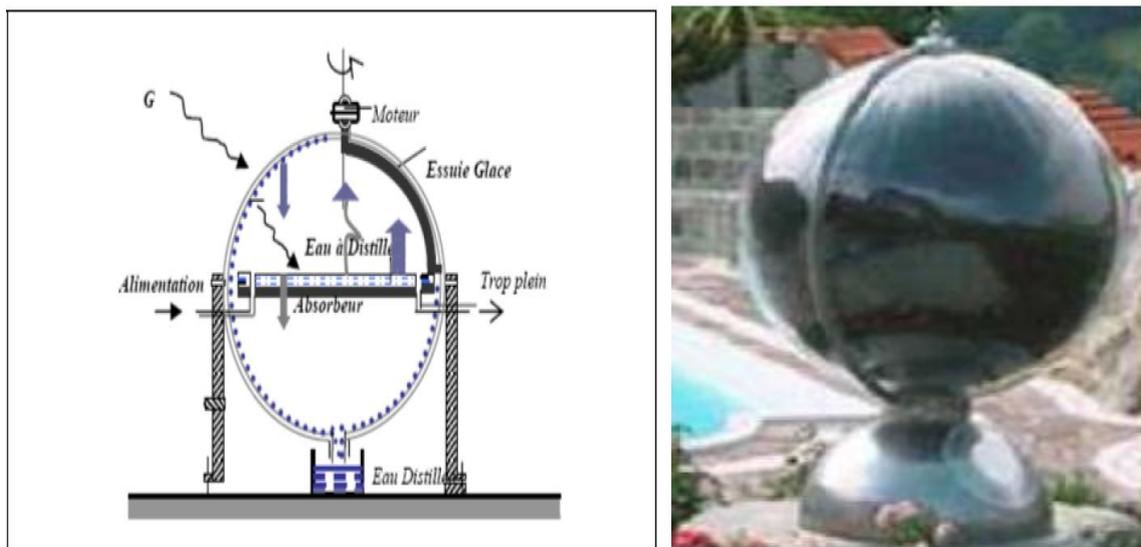


Figure II.13 : distillateur solaire sphérique [29].

II.5.2.1.4. Distillateur solaire terre-eau/eau-eau

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, de même dans les zones arides. Pour exploiter cette hydrologie naturelle, on utilise le distillateur solaire terre-eau ou eau-eau. Il est similaire à celui de l'effet de serre, sauf que le sol remplace le bassin noir [30].

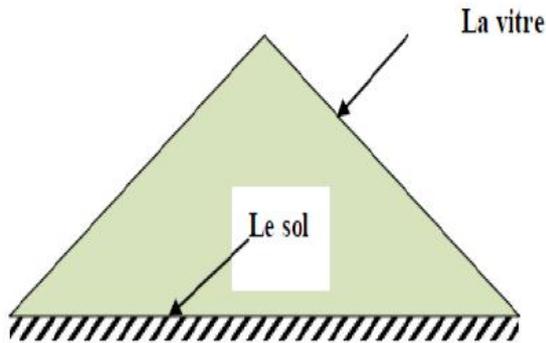


Figure II.14 : Distillateur solaire terre-eau et eau-eau [30].

II.5.2.2. Distillateur à ruissellement

Ce sont des distillateurs dont l'eau à distiller est en mouvement. Les différentes géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

II.5.2.2.1. Distillateur solaire à mèche :

Dans un distillateur à mèche, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture poreuse, absorbant les rayonnements (mèche). Deux avantages sont revendiqués sur les distillateurs de bassin. D'abord, la mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (réduisant la réflexion et présentant une grande surface efficace). En second lieu, moins d'eau d'alimentation est dans le distillateur à tout moment donc l'eau est chauffée plus rapidement et à une température élevée [30].

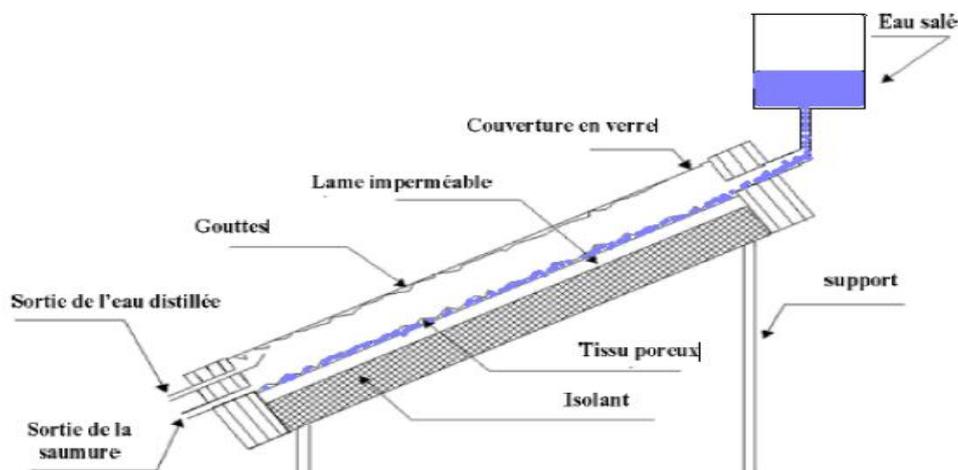


Figure II.15 : Schéma d'un distillateur solaire à mèche [30].

II.5.2.2.2. Distillateur vertical

Le distillateur est alimenté par de l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau à l'entrée du distillateur est régulé à l'aide d'une vanne (3). La position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant.

Un distributeur d'eau (4), muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5), l'eau ruisselle sur le tissu, et la saumure est évacuée en bas (6). L'eau qui s'écoule derrière l'absorbeur (7), s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule naturellement à travers des deux ouvertures (8) réalisées dans la cloison isolée vers le compartiment de condensation (9), et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de l'eau se produit dans une gouttière (10,11) fabriquée en dessous de la plaque de condensation [31].

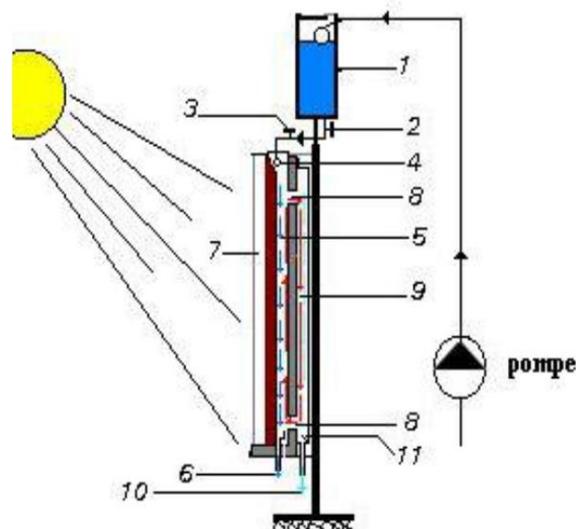


Figure II.16: Schéma d'un distillateur solaire vertical [31].

II.5.2.2.3. Distillateur solaire à film capillaire

D'une très mince couche de textile à mailles fines, imbibée d'eau qui se maintient d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur. Les forces de tension interfaciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air.

Ce distillateur est composé des éléments suivants : le capteur – évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi [32].

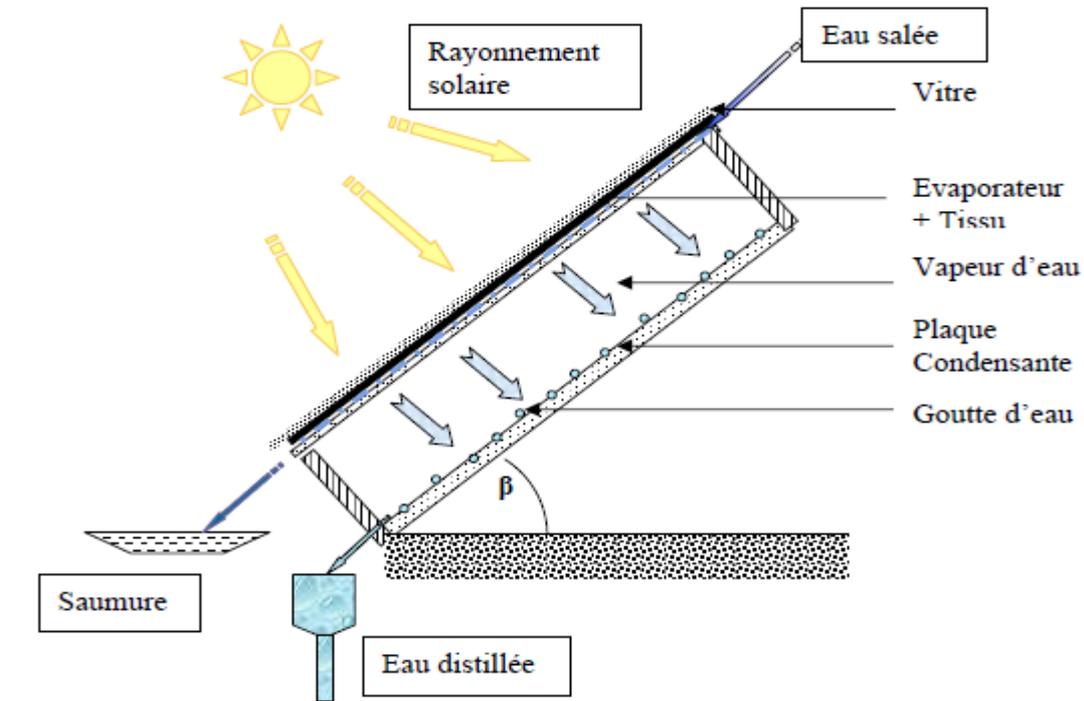


Figure II.17: Distillateur solaire à film capillaire [32].

II.5.2.3. Le système couplé distillateur plan-capteur

II.5.2.3.1. Description du système couplé distillateur plan –capteur

Dans cette installation (figure II.18), le distillateur plan est essentiellement constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre ou eau de mer). Sous l'action du flux solaire G , transmis par la couverture transparente, l'eau s'échauffe et une partie de celle-ci s'évapore. La vapeur produite se condense sur la face intérieure de la vitre et le condensat est récupéré par un récepteur. Un appoint d'eau compense le débit de distillat. Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et inférieures sont isolées. Le distillateur est raccordé par des tubes au capteur solaire plan à circulation de liquide caloporteur (eau) constitué d'un absorbeur avec un tube en cuivre en forme de serpentin, une couverture transparente en verre trempé et un coffre isolé par de la laine de verre ; le système fonctionne en thermosiphon [33].

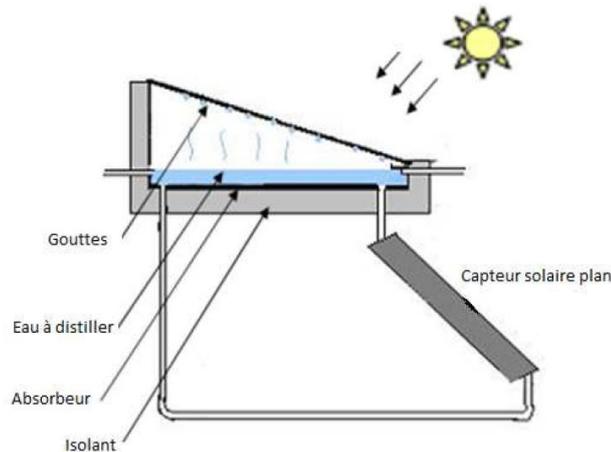


Figure II .18 : Distillateur plan capteur [33].

II.5.2.3.2. Description du système couple distillateur hot box –capteur

Le distillateur plan est remplacé par un distillateur hot box. Ce type de distillateur est constitué d'un bac en fibre de verre, la partie supérieure du bac est surmontée par deux vitres ordinaires formant un toit en V inverse, inclinées par rapport à l'horizontale et fixées aux rebords du bac par de la mastic silicone, qui assure l'étanchéité extérieure et intérieure du distillateur. Le capteur a été étudié précédemment notre intérêt portera dans cette partie uniquement sur le distillateur hot box [34].

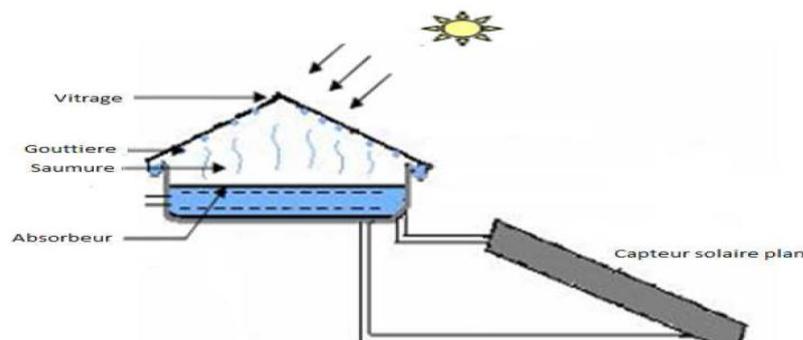


Figure II.19 : Distillateur hot box –capteur[34].

II.5.2.3.3. Distillateur solaire à étages multiples avec récupération de chaleur

Seul, le bassin inférieur est alimenté en énergie thermique (figure II.20). Lorsque l'eau de ce bassin est réchauffée, elle s'évapore et se condense la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus. Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière qui les conduit au stockage. À la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi l'enthalpie d'évaporation, est libérée. Cette énergie réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense, la surface inférieure de l'étage suivant et ainsi de suite. De cette manière, l'énergie, prévue pour réchauffer l'eau du bassin inférieur, est récupérée, du moins en grande partie, pour être plusieurs fois utilisée.

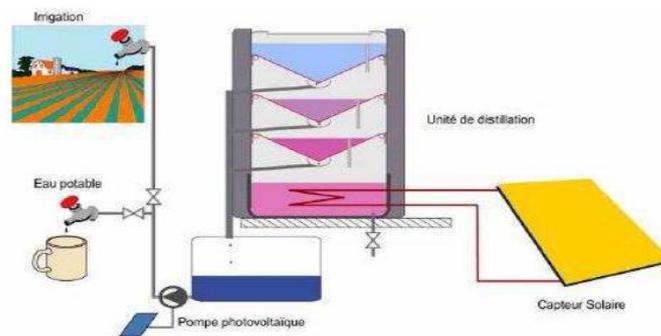


Figure II.20: Distillateur solaire à étages multiples [34].

II.5.2.4. Système de distillation par concentration

Les distillateurs solaires à concentration fonctionnent selon le principe de la concentration et la réflexion des rayons solaires. Ils utilisent une surface réfléchissante dont la forme permet de concentrer en un même point la réverbération de l'énergie.

- **Cylindro-parabolique :**

Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques concentrent la lumière sur un absorbeur linéaire, avec un système de poursuite du soleil selon une seule direction.



Figure II.21 : Schéma représentant un distillateur cylindro parabolique [35].

- **Concentrateurs paraboliques**

Les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole. Le système doit être orienté à tout instant vers le soleil, ce qui implique une motorisation précise selon deux axes. Le facteur de concentration moyen dépasse le millier, ce qui permet de porter le fluide à très haute température.



Figure II.22: Distillateur paraboliques [34].

- **Distillateur sphérique**

Le réflecteur sphérique concentre le rayonnement solaire sur un foyer linéaire mobile porté par un rayon de la sphère orienté en direction du soleil.



Figure II.23: Distillateur sphérique [34].

II.5.3. Les avantages et les inconvénients des distillateurs solaires :

II.5.3.1. Les avantages :

- Une technique facile, à petite échelle, et rentable pour fournir l'eau potable dans les maisons ou dans les petites communautés.
- La production d'eau distillée.
- La simplicité dans la conception.
- Aucune pièce mobile (pompes, moteurs, etc.) sont tenus de faire fonctionner l'unité en mode passif de l'opération.
- Pas de sources conventionnelles d'énergie sont nécessaires, qui contribue à réduire la pollution de l'environnement car elle nécessite uniquement l'énergie solaire, qui est renouvelable et non polluante.
- Aucun opérateur qualifié n'est nécessaire pour le fonctionnement et l'entretien.
- Fabrication locale / réparation est possible.
- Purification de l'eau très salée (même l'eau de mer).
- L'élimination efficace des agents pathogènes et de produits chimiques réduit les risques de problèmes de santé associés aux maladies d'origine hydrique.

II.5.3.2. Les inconvénients :

Toutefois, un distillateur solaire a quelques inconvénients, qui limitent parfois l'utilisation de cette technique à grande échelle de production ; à savoir :

- La vulnérabilité aux dommages dus aux conditions météorologiques.
- Faible rendement.
- Une technologie moins demandée aux marchés.
- Le faible taux d'intérêt des fabricants.
- La surface d'absorption est en permanence horizontale au lieu de continuellement face aux rayons du soleil pour la récolte optimale.
- La surface de condensation est également celle à travers laquelle les rayons du soleil incidents passer. Cette surface est plus ou moins chaude, car il absorbe le rayonnement solaire.
- Une faible efficacité.

Un moyen efficace de surmonter ces deux dernières inconvénients consiste à séparer la chambre de condensation à la chambre d'évaporation, la zone d'évaporation peut être agrandie pour augmenter le rendement de distillation. La productivité de ce type de distillateur solaire est augmentée par rapport à l'autre distillateur.

II.6. Les paramètres influents sur un distillateur solaire :

Pour un bon fonctionnement d'un distillateur solaire, il faut respecter les paramètres suivants :

II.6.1. Paramètres internes

II.6.1.1. Paramètres de position

- L'emplacement du distillateur

Endroit où il doit être placé de façon à éviter les obstacles « effet de masque », qui empêcherait le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.

- L'orientation

Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant la journée. On distingue suivant le moment de la journée :

- ✓ Fonctionnement pendant la matinée → orientation Est ;
- ✓ Fonctionnement pendant l'après-midi → orientation ouest ;
- ✓ Fonctionnement durant toute la journée → orientation Sud.

- L'inclinaison

Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année :

- ✓ Fonctionnement estival → $\beta = \Phi - 10^\circ$;
- ✓ Fonctionnement hivernal → $\beta = \Phi + 20^\circ$;
- ✓ Fonctionnement annuel → $\beta = \Phi + 10^\circ$ [18].

Où: β est l'inclinaison du plan considéré.

Φ est la latitude.

II.6.1.2. Paramètres géométriques (construction) :

Parmi les paramètres géométriques importants, on cite :

➤ L'inclinaison de la vitre sur le plan horizontale

Si l'inclinaison de la vitre augmente, la partie ombragée du plan d'eau augmente en générale. Donc il y a intérêt à choisir une inclinaison minimale, sans décollement des gouttes d'eau évidemment, une valeur courante est 15° .

➤ Les paramètres de la saumure

Ces paramètres sont :

- **L'épaisseur de la nappe d'eau** : plus cette dernière est importante, moins sa température fluctue au cours de la production L'inertie thermique augmente avec l'épaisseur de la nappe d'eau, et la durée de fonctionnement nocturne croit également avec l'épaisseur de la saumure. Cependant, la production moyenne pendant 24 heures diminue lorsque l'épaisseur augmente. Des expériences ont montré que cette production suit la loi suivante [19] :

$$y = \frac{a}{x-b} + c \quad \text{II.1}$$

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.

- **La température de la saumure:** Lorsque la température de la saumure augmente, un dépôt blanc sur la surface libre de l'eau due à la formation de carbonates insolubles dans la saumure est observé. Ceci empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface absorbante, entraînant ainsi une baisse dans la production.
- **La concentration du sel:** La production du distillateur se trouve diminuée quand la concentration augmente.

➤ La distance qui sépare la surface libre de la saumure au vitrage

La distance qui sépare la surface libre de la saumure au toit influe directement sur la pression à l'intérieur du distillateur. L'augmentation de l'enceinte provoque une diminution de la pression, donc influe sur les échanges thermiques et cela entraîne une diminution des températures des composants du distillateur. Ce paramètre détermine aussi l'intensité des pertes thermiques latérales par convection, et la grandeur de la couche tampon qui freine l'échange entre la surface d'évaporation et la surface de condensation. Une étude menée a montré qu'une réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut.

➤ La transparence du vitrage

Le nombre de couverts transparents utilisés dans un distillateur solaire ne pas augmenter la production, car elle augmente la température du couvercle interne (surface de condensation), mais elle a aussi maintient le dispositif étanche à l'air, grâce à une double couverture en verre une réduction de 25-35% de la production a été remarqué. Utilise également un couvercle en verre à double augmente le coût initial de distillateur.

➤ L'absorbeur (récepteur)

Le récepteur doit absorber autant de flux solaire concentré possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée dans un fluide d'un certain type (liquide, gaz). La surface de récepteur doit avoir une bonne conductivité et diffusion thermique ; une bonne inertie thermique ; un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité et une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide utilisé.

Il est important que le récepteur soit métallique car seul les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 360 W/m.k, aluminium : 200 W/m.k, acier : 60 W/m.k).

➤ Le réflecteur

Le réflecteur est un miroir de surface plane, possédant une propriété réfléchive grâce à un dépôt métallique.

Retenons une propriété importante de ces miroirs : quand un faisceau lumineux arrive sur la surface réfléchissante, tous les rayons réfléchis convergent vers le récepteur.

On a choisi l'aluminium comme réflecteur car il a un coefficient de réflexion important. Ce métal n'est pas trop cher, contrairement à l'or ou à l'argent.

➤ **L'isolation des faces latérales du distillateur**

L'isolation des faces latérales a pour but d'éliminer les pertes (transfert de chaleur avec le milieu extérieur).

II.6.1.3. Paramètres optiques

Ce sont l'émissivité, l'absorptivité et la transmissivité de la surface absorbante et de la couverture.

II.6.1.4. Paramètres thermo-physiques :

Les paramètres thermo-physiques du mélange air – vapeur, de la surface absorbante et de la saumure tels que, la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité cinématique, la viscosité dynamique et le coefficient de dilatation thermique du mélange, doivent être pris en compte.

II.6.2. Les paramètres externes

II.6.2.1. Paramètres météorologiques :

➤ **L'intensité du rayonnement solaire**

C'est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0.17 à 4 μm). Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47 μm dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante et égale à 1.35KW/m². Cependant, l'énergie qui atteint la surface terrestre est atténuée par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère. Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0.7 et 0.9.

➤ **Température ambiante**

L'effet de variations de température ambiante sur la productivité d'un distillateur solaire est examiné par plusieurs chercheurs. Les résultats numériques ont montré qu'une légère augmentation de 3% de la productivité distillateur solaire est obtenue par augmentation de la température ambiante par 5 °C.

➤ **La vitesse du vent**

La vitesse du vent a peu d'effet sur la productivité, mais les vitesses de vent faibles augmentent les taux de production par rapport aux conditions de vent nul. L'augmentation de la vitesse du vent augmente la perte de chaleur par convection à partir de la couverture à la température ambiante. Cela provoque une diminution de la température de surface de condensation et augmente en conséquence le rendement d'un distillateur.

D'autre part les calculs numériques montrent que lorsque la vitesse du vent passe de 1 à 9m / s, la productivité diminue de 13%.

II.6.2.2. Les paramètres géographiques :

On cite les paramètres d'ensoleillement :

- Eclairage énergétique dû au rayonnement global.
- Position du soleil et durée d'insolation.
- L'heure de la journée et la saison.

II.6.3. Caractéristiques et performances des distillateurs

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser un distillateur solaire. On distingue : la production du distillat, le taux de conversion, l'efficacité, le rendement et la performance.

• La production et le taux conversion

Le débit massique de l'eau distillée est donné par la relation suivante :

$$\dot{m}_d = \frac{Q_{evp}}{L_v} \quad \text{II.2}$$

La production du distillat d'un distillateur solaire, représente la quantité d'eau distillée produite, par mètre carré de surface d'évaporation et par jour, il est calculer par l'intégration de la relation précédente dans un intervalle du temps.

Nous pouvons aussi définir une grandeur très important, c'est le taux de conversion qui représente le rapport entre la quantité d'eau distillée et la quantité d'eau saumâtre entrante dans le distillateur soit

$$Q = - \frac{\dot{m}_d}{\int_{t_{cs}}^{t_{ts}} \dot{m} dt} \quad \text{II.3}$$

• L'efficacité globale

L'efficacité globale journalière est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par la quantité d'énergie globale incidente, qui peut être calculée par la formule suivante :

$$\eta_g = \frac{Q_{evp}}{G.S} = \frac{\dot{m}_d}{G.S} L_v \quad \text{II.4}$$

• L'efficacité interne

L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure par unité de temps, elle se calcule par la formule suivante :

$$\eta_i = \frac{Q_{evp}}{Q_{eau}} = \frac{\dot{m}_d}{\alpha_t G.S} L_v \quad \text{II.5}$$

Pour une intensité globale G, l'expression Q_{eau} devient

$$Q_{eau} = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f).G.S \quad \text{II.6}$$

Q_{eau} : Flux thermique effectivement reçu par la masse d'eau

Si en pose que :

$$\alpha_t = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f) \quad \text{II.7}$$

Donc ;

$$\eta_i = \frac{\eta_g}{\alpha_t} \quad \text{II.8}$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre ;

τ_e : Coefficient de transmission de l'eau ;

α_e : Coefficient d'absorption de l'eau ;

α_f : Coefficient d'absorption du fond du distillateur ;

α_t : Coefficient d'absorption fictif du distillateur ;

Le coefficient α_t dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre.

- **Performance :**

Dans le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue, nous avons été amenés à définir les facteurs de performance brute (F.P.B) et horaire (F.P.H):

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au out d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}}$$

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 heures}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 heures}}$$

A un instant donné de la journée, le facteur de performance FP est donné par la relation :

$$PF = \dot{m}_d / (\alpha_t G \cdot S) \quad \text{II.9}$$

- **Le rendement**

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour.

L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur. Le rendement d'un distillateur simple est :

$$\eta = \frac{\dot{m}_d}{G} h_{evp} \quad \text{II.10}$$

II.7. Facteurs réduisant l'optimisation de l'activité du distillateur solaire

II.7. 1. La rechute des gouttelettes

Un des problèmes rencontrés dans la distillation solaire est la rechute des gouttelettes du condensat de la couverture vers la solution. Pour remédier à ce problème, il faut traiter chimiquement la surface interne de la couverture pour une meilleure humidification.

II.7. 2. La concentration en sel

Les résultats des expériences passées, ont montré que le rendement du distillateur solaire décroît quand la concentration en sel de la solution augmente. En effet, ceci peut provoquer des dommages sur certains composants du distillateur à cause de la corrosion. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire d'utiliser des matériaux inoxydables.

II.7. 3. L'épaisseur de la solution

Pour une petite épaisseur de la solution, on a une plus grande production journalière en eau (capacité thermique élevée de l'eau). Mais pour avoir une telle épaisseur, il faut bien niveler la surface de l'absorbeur pour qu'il ne cause pas un assèchement de certaines parties de sa surface. Cet assèchement va diminuer la surface de contact entre la solution et l'absorbeur et à la longue, il peut le détériorer.

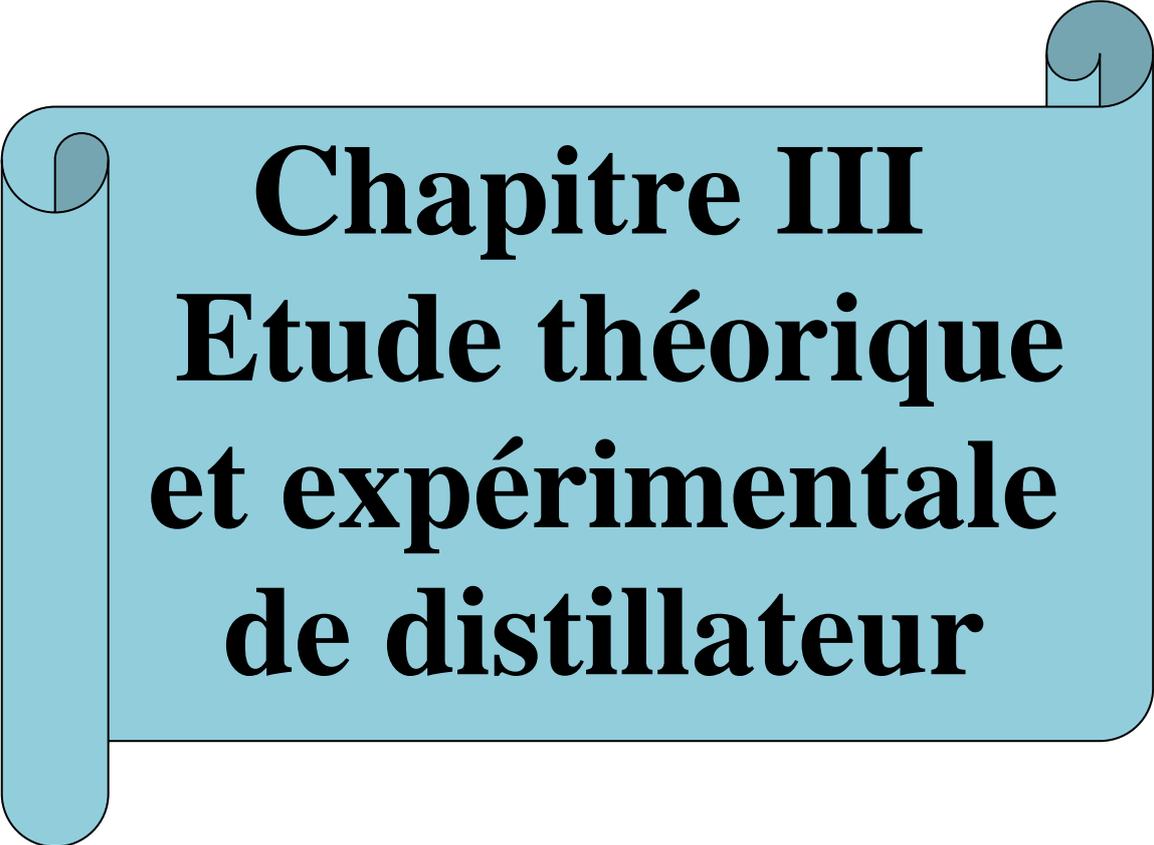
II.7. 4. La formation d'algues et de matières organiques

Il a été constaté qu'il y'a formation d'algues et de matières organiques sur la surface du distillateur, surtout à effet de serre. Ces algues réduisent la quantité de radiation solaire absorbée ce qui fait diminuer le rendement du distillateur. Pour régler ce problème, il faut laver le bassin régulièrement.

II.8. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre une brève étude bibliographique sur les techniques de dessalement. D'après les travaux des chercheurs ont remarqué la diversité des méthodes et les techniques utilisées pour améliorer le phénomène de la distillation, et aussi les différents types de distillateurs solaires et leurs principes de fonctionnement.

Enfin, nous avons étudié les différents paramètres influents sur un distillateur solaire ainsi que les facteurs réduisant l'optimisation de son activité.



Chapitre III
Etude théorique
et expérimentale
de distillateur

III.1.Introduction

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu, (même le vide), qui les sépare. De ce fait, les transferts thermiques ont, aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel. Ce rôle devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, utilisation de l'énergie solaire,...) [35].

L'opération d'un distillateur solaire est régie par divers modes de transferts thermiques, il s'ensuit qu'une compréhension appropriée est cruciale en concevant un distillateur. La convection et le rayonnement sont les modes prédominants de transfert de chaleur dans un distillateur solaire.

Il est plus commode d'étudier les modes de transfert thermique dans le distillateur (transfert interne) et entre le distillateur et l'environnement (transfert externe) séparément.

La convection thermique est le processus par lequel le transfert thermique a lieu entre une surface et un fluide (liquide ou gazeux). Le taux de transfert est décrit par l'équation :

$$q = h. A. \Delta T \quad (\text{III.1})$$

Cependant, la complexité du problème se situe en évaluant le coefficient h de transfert thermique, qui est fonction de la géométrie de la surface, des caractéristiques d'écoulement, et des propriétés physiques du fluide.

Dans la plupart des cas pratiques les coefficients de transfert thermique sont évalués à partir des équations empiriques obtenues par corrélation en utilisant des méthodes d'analyse dimensionnelle.

Le transfert de chaleur par convection est commodément considéré en termes de quatre paramètres sans dimensions, à savoir, les nombres de Nusselt, de Grashof, de Reynolds et de Prandtl [13].

III.2. Les phénomènes d'échange énergétique

Le distillateur conventionnel est un système qui échange de la chaleur avec le milieu ambiant.

Le transfert de chaleur entre le distillateur et l'extérieur se fait au niveau de la vitre par rayonnement et par convection.

Au niveau de l'eau, le rayonnement incident transmis sert à chauffer l'eau. Celle-ci s'évapore et échange de la chaleur avec l'eau par convection, rayonnement et évaporation.

L'échange intérieur-extérieur se fait par conduction à travers la vitre.

III.2.1. La conduction

C'est un échange d'énergie qui se produit au sein d'un milieu opaque sans déplacement de matière, ce qui veut dire que la conduction a lieu dans un corps ou bien entre deux corps qui sont en contact. Il apparaît sous l'influence d'un gradient de température. C'est un mode qui est spécifié pour les solides et une faible transmission dans les gaz.

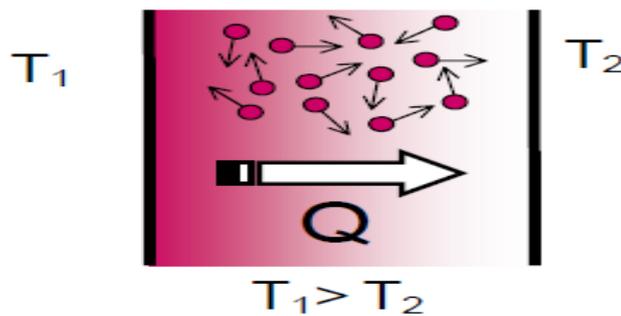


Figure III.1 : La transmission de chaleur par conduction.

Il correspond à une propagation de la chaleur de proche en proche au sein de la matière, le passage de la chaleur de faisant par contact entre particules (atomes ou molécules) voisines. La matière se comporte véritablement comme un conducteur de la chaleur.

La conduction est définie par la relation de loi de FOURIER (1822)

L'expression de la densité de chaleur q pendant le temps dt pour un cas unidirectionnel s'écrit sous la forme suivante :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.2})$$

L'expression de flux échangé est donné par :

$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.3})$$

III.2.2. La convection

La convection est un mode de transfert de chaleur dans la matière avec mouvement macroscopique de la matière.

Ce type de transfert n'intervient que pour les liquides et les gaz (c'est le fluide en mouvement qui transporte de la chaleur).

Le flux échangé est donné par la loi de NEWTON :

$$\phi = hS(T_s - T_f) \quad (\text{III.4})$$

ϕ : Le flux échangé par convection [W].

h : coefficient de convection [$W/m^2.K$].

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide [m^2].

T_s : Température de la paroi solide [K].

T_f : température du fluide [K].

Il suffit de connaître le coefficient d'échange par convection pour pouvoir déterminer le flux thermique échangé par convection.

$$h = \frac{Nu \lambda}{L} \quad (\text{III.5})$$

Nu : Nombre de Nusselt

L : Longueur caractéristique [m]

λ : Conductivité thermique du fluide [W/m.K]

Ce coefficient d'échange par convection sera déterminé par une formule de corrélation faisant intervenir des nombres caractéristiques sans dimension suivent :

Nombre de Reynolds :

Représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad (\text{III.6})$$

V : vitesse moyenne du fluide en [m/s]

L : Longueur caractéristique en [m]

ν : viscosité cinématique en [m²/s]

Nombre de Prandtl :

Exprime le rapport de la diffusivité de la quantité de mouvement du fluide sur la diffusivité thermique

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{III.8})$$

a : Diffusivité thermique [m²/s]

λ : Conductivité thermique du fluide [W/m.K]

c : Capacité calorifique massique du fluide [J/kg.K]

ρ : Masse volumique du fluide [kg/m³]

Nombre de Grashof :

Exprime le rapport entre la poussée d'Archimède et les forces de viscosité.

$$Gr = \frac{\beta.g.L^3\Delta T}{\nu^2} \quad (\text{III.9})$$

β : Coefficient de dilatation thermique du fluide [K⁻¹]

g : Accélération de la pesanteur [m/s²]

L : Longueur caractéristique [m]

ΔT : Écart de température [K]

ν : viscosité cinématique en [m²/s]

Nombre de Nusselt :

Exprime le rapport entre l'échange par conduction à la paroi sur l'échange par convection dans la couche limite.

$$Nu = \frac{h.L}{\lambda} \quad (\text{III.10})$$

h : coefficient de convection [W/m².K]

L : Longueur caractéristique en [m]

λ : Conductivité thermique du fluide en [W/m.K]

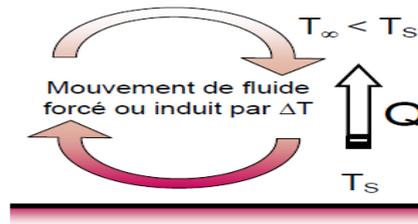


Figure III.2 : La transmission de chaleur par convection.

On distingue deux types de convection :

- **La convection naturelle :**

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet la différence de masse volumique résultant de la différence de température aux frontières. La distribution de température engendre son propre mouvement en créant des forces d'Archimède rotationnelles, et un champ de force extérieur (la pesanteur).

Compte tenue du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement (turbulent ou laminaire).

La quantité de chaleur $\delta\Phi$ qui traverse une surface pendant un intervalle de temps dt , peut s'écrire :

$$\delta\Phi = h(T_p - T_\infty) dS dt \quad (\text{III.11})$$

Quelque soit le type de convection et le régime d'écoulement du fluide, cette relation est dite relation de Newton. Dans tout cas de résolution d'un problème de convection le coefficient convectif (**h**) reste à déterminer, il dépend de nombreux paramètres: caractéristiques du fluide, nature de l'écoulement, la température et la forme de la surface d'échange.

Dans le cas de la convection forcée on a :

$$h = \frac{\lambda \cdot Nu}{L} \quad (\text{III.12})$$

$$Nu = a(Ra)^n \quad (\text{III.13})$$

La convection naturelle est négligeable si: $Gr/Pr^2 > 100$

$$Nu = a(Gr \cdot Pr)^n \quad (\text{III.14})$$

Avec : $Gr = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2}$ et $Gr = \frac{\beta g \Delta T L^3}{\nu^2} = \left(\frac{U_0 L}{\nu} \right)$ (Nombre de Grashof)

Si la convection est laminaire $Gr Pr < 10^9$ et donc $n = 1/4$

Si la convection est turbulente $Gr Pr > 10^9$ et donc $n = 1/3$

La convection est laminaire :

$$Nu = 0.53(GrPr)^{1/4} \quad (III.15)$$

La convection est turbulente :

$$Nu = 0.104(GrPr)^{1/3} \quad (III.16)$$

- **La convection forcée :**

Le processus de cette convection est le même que celui de la convection naturelle. La différence est que le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante du gradient de température (pompe, ventilateur, compresseur... etc.).

$$Nu = \frac{2}{3} Re^{0.5} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (III.17)$$

III.2.3. Le rayonnement

La transmission de chaleur par rayonnement correspond au transport d'énergie thermique sous forme d'ondes électromagnétiques analogues à celles de la lumière. En effet, tout corps, même placé dans le vide, émet de l'énergie thermique sous forme d'un rayonnement qui est véhiculé sans support matériel. Cette émission est d'autant plus importante que la température du corps émetteur est élevée. Elle n'est cependant notable qu'à partir de 700 à 800 °C. Dans le cas du soleil, dont la température superficielle est de l'ordre de 6000°C, l'émission thermique est particulièrement importante.

Parallèlement, tout autre corps placé sur le trajet de ce rayonnement en absorbe une partie et, de ce fait, est un récepteur de chaleur. Dans la pratique des procédés industriels, la mise en œuvre des échanges de chaleur fait appel simultanément aux différents modes de transmission de la chaleur.

La relation de base est celle de STEFAN-BOLTZANN, selon laquelle la puissance M du rayonnement thermique émis par unité de surface d'un corps noir est directement proportionnelle à la puissance quatrième de la température absolue ($M^o = \sigma T^4$)

$$\phi = S. \sigma. \epsilon. T^4 \quad (III.18)$$

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$).

ϵ : Émissivité thermique du matériau.

T: température du corps en [K].

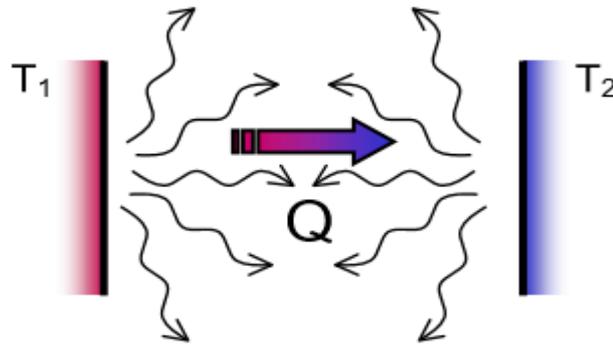


Figure III.3 : La transmission de chaleur par rayonnement.

III.2.4. L'évaporation

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

Pour concrétiser ces échanges, on introduit les relations suivantes.

- **Transfert de chaleur sensible**

$$dq_s = h(T_w - T_0)dS \quad (III.19)$$

- **Transfert de masse**

$$d\dot{m} = h_{cc}(C_w - C_0)dS \quad (III.20)$$

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

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

C_w : Concentration en vapeur d'eau [kg/s].

III.2.5. La condensation

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

III.2.5.1. Condensation en gouttes

Si la tension superficielle du liquide est suffisante pour que le liquide ne mouille pas la paroi, il va y avoir une formation de gouttes qui vont grossir puis se détacher de la paroi, libérant celle-ci pour une nouvelle phase de condensation sans barrière thermique. L'intérêt majeur de la condensation en gouttes réside dans le fait qu'elle permet d'obtenir des coefficients de transfert élevés.

III.3. Les échanges de chaleur au sein de distillateur

- **Echange de chaleur entre l'absorbeur et la marmite**

L'eau reçoit de la marmite un flux de chaleur par convection naturelle et conduction. La marmite elle-même reçoit de l'absorbeur un flux de chaleur.

- **Echange de chaleur entre la marmite et la vitre**

L'eau à l'intérieur de la marmite cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation. Avec l'évaporation, l'eau perd un flux de chaleur. La vapeur condensée sur la vitre est récupérée dans une gouttière puis envoyée directement par une conduite vers le bécher gradué.

- **Echange de chaleur entre la vitre et l'ambiant**

La vitre reçoit un flux solaire dont une partie est cédée un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle au milieu extérieur.

III.4. Hypothèses simplificatrices

Avant toute expérience, une étude théorique est nécessaire pour comprendre les modélisations mathématiques appliquées dans ce domaine et il est aussi nécessaire de prendre en considération les hypothèses ci-dessous :

- La vitesse du vent est constante.
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.
- Le transfert de chaleur est unidimensionnel.
- Flux de chaleur transitoire.
- La masse de vapeur d'eau est négligée.
- La couverture est propre.
- La température de chaque composant est uniforme.
- Le soleil est assimilé à un corps noir.
- La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables.
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques.
- La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- Le bassin est étanche.
- les sels dissouts n'ont aucune influence sur les quantités de chaleur échangées par la saumure.

III.5. Bilan énergétique d'un distillateur

La modélisation mathématique d'un distillateur solaire à simple pente, illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Elle est fondée sur quatre points : le bilan du vitrage, le bilan de l'eau, le bilan de l'isolant et le débit du condensât.

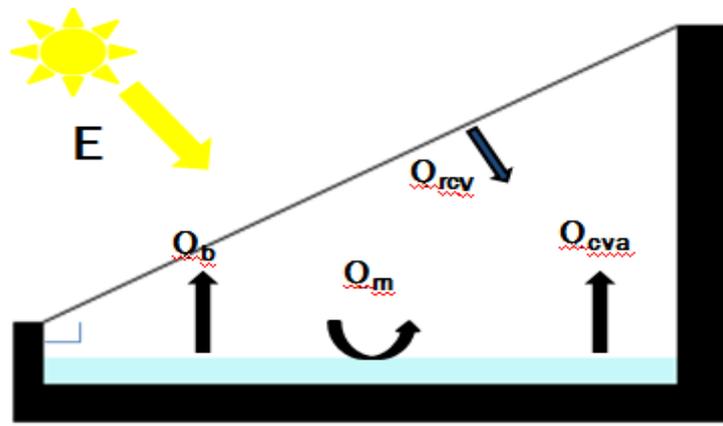
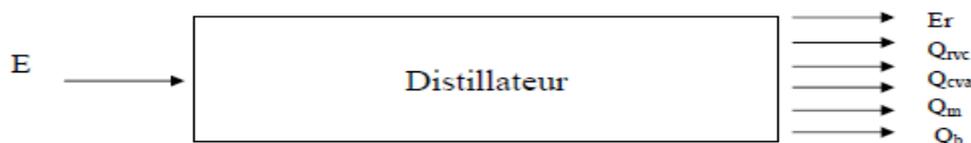


Figure III.4 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire

III.5.1. Le bilan thermique au niveau de l'unité de distillation

$$E = E_r + Q_{rvc} + Q_{cva} + Q_m + Q_b + Q_p \quad (III.22)$$



Avec :

E: Puissance solaire totale reçue par le couvercle sous l'incidence normale.

E_r: Puissance solaire réfléchiée par le couvercle.

Q_{rvc} : Puissance rayonnée par le couvercle.

Q_{cva} : Puissance échangée par convection entre le couvercle et l'air extérieur.

Q_m : Chaleur emportée par le distillat par unité de temps.

Q_b : Puissance perdue par conduction – convection à travers la base.

Q_p : Puissance perdue à travers les faces latérales.

Toutes les puissances précédentes sont en [Watts].

$$\text{Avec : } E_r = r_v \cdot E \quad (III.23)$$

$$Q_{rvc} = h_{rcv} \cdot S_v (T_v - T_c) \quad (III.24)$$

$$Q_{cva} = h_{cav} \cdot S_v (T_v - T_a) \quad (III.25)$$

$$Q_m = \dot{m}_d \cdot C_{p_{eau}} (T_d - T_a) \quad (III.26)$$

$$Q_b = h_g \cdot S_L (T_L - T_a) \quad (III.27)$$

r_v : Coefficient de réflexion de la vitre.

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection [$W/m^2 \cdot ^\circ C$].

Donc on aura ;

$$E = Q_p + r_v \cdot E + h_{rvc} \cdot S_v (T_v - T_c) + h_{cva} (T_v T_a) \cdot S_v + \dot{m}_d \cdot cp_{eau} (T_d - T_a) + h_g S_L (T_L - T_a) \quad (III.28)$$

Q_p : Constitue les différentes pertes suivantes :

- Perte par convection et rayonnement des structures latérales,
- Perte par fuites de vapeur vers l'atmosphère, celles-ci sont minimisées par l'adjonction d'un joint d'étanchéité au niveau du couvercle,
- Perte par fuites de distillat, elles sont minimisées par une étanchéité des gouttières,

Ces pertes étant faibles, nous n'en tiendrons pas compte dans le bilan thermique.

III.5.2. Bilan thermique en régime permanent

Pour effectuer le bilan énergétique de notre système on définit le flux solaire incident sur le vitrage extérieur, en tenant compte du flux réfléchi par les réflecteurs en direction de la vitre :

$$\Phi_{Reçu} = \Phi_{global} + \Phi_{réflété} \quad (III.29)$$

$$\Phi_{global} = \Phi_{directe} + \Phi_{diffus} + \Phi_{réfléchi\ sol} \quad (III.30)$$

$$\Phi_{direct} = S_{directe} \cdot A_{vitre} \quad \text{Ou : } S_{directe} = I \cos \theta \quad (III.31)$$

Où θ représente l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface des vitrages;

$$\Phi_{Réflété} = S_{directe} \cdot A_{ref} \cdot r_{ref} \quad (III.32)$$

III.5.2.1. Bilan énergétique de la vitre extérieure

La variation d'énergie interne est égale à la somme des quantités de chaleur échangées :

$$\Delta U_{v1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (III.33)$$

Avec :

$$\Delta U_{v1} = m_v \cdot cp_v \frac{\partial T_v}{\partial t} \quad (III.34)$$

$$Q_1 = \alpha_{v1} \cdot \Phi_{Reçu} \quad (III.35)$$

$$Q_2 = h_{cext} \cdot A_{v1} \cdot (T_{ext} - T_{v1}) \quad (III.36)$$

$$Q_3 = h_{cv1-v2} \cdot A_{v1} \cdot (T_{ext} - T_{v2}) \quad (III.37)$$

$$Q_4 = h_{rv} \cdot \epsilon_{v2-v1} \cdot A_{v1} \cdot (T_{v2} - T_{v1}) \quad (III.38)$$

$$Q_5 = h_r \cdot \epsilon_{vc-v1} \cdot A_{v1} \cdot (T_{vc} - T_{v1}) \quad (III.39)$$

Q_1 : Puissance solaire absorbée par la vitre extérieure
 Q_2 : Puissance thermique échangée par convection entre la vitre extérieure et le milieu ambiant.
 Q_3 : Puissance thermique échangée par convection entre les deux vitres
 Q_4 : Puissance échangée par rayonnement entre les deux vitres
 Q_5 : Puissance échangée par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste
 $h_{c_{ext}}$: Coefficient d'échange par convection entre la vitre extérieure et le milieu ambiant.
 h_{cv1-v2} : Coefficient d'échange par convection entre les deux vitres
 h_{rv} : Coefficient d'échange par rayonnement entre les deux vitres
 h_r : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste
 A_{v1} : La surface vitre extérieure

III.5.2.2. Bilan énergétique de la vitre intérieure

L'équation résultante du bilan énergétique est :

$$\Delta U_{v2} = Q_6 + \phi_7 + \phi_8 + Q_9 + Q_{10} \quad (\text{III.40})$$

Avec :

$$\Delta U_{v2} = m_v c_p v \frac{\partial T_{v2}}{\partial t} \quad (\text{III.41})$$

$$Q_6 = \tau_{v1} \cdot \alpha_{v2} \cdot \phi_{Reçu} \quad (\text{III.42})$$

$$\phi_7 = h_r \cdot \varepsilon_{v2-ab} \cdot A_{v2} \cdot (T_{ab} - T_{v2}) \quad (\text{III.43})$$

$$\phi_8 = h_r \cdot \varepsilon_{v1-v2} \cdot A_{v2} \cdot (T_{v1} - T_{v2}) \quad (\text{III.44})$$

$$Q_9 = h_{cv2} \cdot A_{v2} \cdot (T_{ab} - T_{v2}) \quad (\text{III.45})$$

$$Q_{10} = h_{c1} \cdot A \cdot (T_{v1} - T_{v2}) \quad (\text{III.46})$$

ΔU_{v2} : Puissance thermique moyenne contribuant à l'échauffement de la vitre intérieure
 Q_6 : Puissance absorbée par la vitre intérieure
 ϕ_7 : Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et l'absorbeur
 ϕ_8 : Flux de rayonnement entre la vitre intérieure et la vitre extérieure
 Q_9 : Puissance due à l'échange convectif entre la vitre intérieure et la lame d'air statique au dessus de l'absorbeur
 Q_{10} : Puissance due à l'échange par convection entre la vitre intérieure et la vitre extérieure
 τ_{v1} : Coefficient de transmission de la vitre extérieure
 ε_{v2-ab} : Emissivité de la vitre vers l'ambiant
 α_{v2} : Coefficient d'absorption de la vitre intérieure

III.5.2.3. Bilan énergétique de la marmite

$$\Delta U_{\text{mar}} = Q_{11} + \phi_{12} \quad (\text{III.47})$$

Avec :

$$\Delta U_{\text{mar}} = m_{\text{mar}} \cdot C_{p_{\text{mar}}} \frac{\partial T_{\text{mar}}}{\partial t} \quad (\text{III.48})$$

$$Q_{11} = \alpha_{\text{mar}} \cdot A_{\text{mar}} \cdot \phi_{\text{Reçu}} \tau_{v1} \tau_{v2} \quad (\text{III.49})$$

$$\phi_{12} = -m_e \cdot C_{p_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} - m_{\text{evap}} \cdot L_v \quad (\text{III.50})$$

ΔU_{mar} : Puissance thermique moyenne contribuant à échauffer la marmite

Q_{11} : Puissance absorbée par la marmite

ϕ_{12} : Flux échangé avec le liquide à évaporer

III.5.2.4. Bilan énergétique de l'eau

$$\Delta U_e = m_e \cdot c_{p_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\dot{m}_{\text{evap}} \cdot L_v + h_{\text{mare}} \cdot A_{\text{mare}} (T_{\text{mar}} - T_e) \quad (\text{III.51})$$

III.5.2.5. Bilan énergétique de l'absorbeur

$$\Delta U_{\text{ab}} = Q_{13} + \phi_{14} + \phi_{15} + \phi_{16} \quad (\text{III.52})$$

Avec

$$\Delta U_{\text{ab}} = m_{\text{ab}} \cdot c_{p_{\text{ab}}} \frac{\partial T_{\text{ab}}}{\partial t} \quad (\text{III.53})$$

$$Q_{13} = \alpha_{\text{ab}} \cdot A_{\text{ab}} \cdot \phi_{\text{Reçu}} \cdot \tau_{v2-v1} \quad (\text{III.54})$$

$$\phi_{14} = -\phi_7 = -h_r \cdot \varepsilon_{v2-ab} \cdot A_{v2} \cdot (T_{\text{ab}} - T_{v2}) \quad (\text{III.55})$$

$$\phi_{15} = h_{c2} \cdot A_{\text{ab}} \cdot (T_{v2} - T_{\text{ab}}) \quad (\text{III.56})$$

$$\phi_{16} = \frac{\lambda_{\text{ab}}}{e_{\text{ab}}} S_{\text{ab-mar}} \cdot (T_{\text{ab}} - T_{\text{mar}}) \quad (\text{III.57})$$

ΔU_{ab} : Puissance thermique moyenne contribuant à échauffer l'absorbeur

Q_{13} : Puissance absorbée par l'absorbeur

ϕ_{14} : Flux échangé par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre intérieure

ϕ_{15} : Flux dû à l'échange convectif entre l'absorbeur et la lame d'air statique

ϕ_{16} : Flux échangé par conduction entre l'absorbeur et la marmite

III.5.2.6. Bilan énergétique de réflecteur

$$\phi_{\text{ref}} = G_r \cdot A_{\text{ref}} \cdot r_{\text{ref}} \quad (\text{III.58})$$

Q_{ref} : Puissance réfléchie sur le récepteur

A_{ref} : Surface d'un réflecteur

G_r : Éclairement global arrivant sur le réflecteur

r_{ref} : Coefficient de réflexion de l'aluminium

III.5.2.7. Le flux perdu à travers les murs

$$\phi = \left(h_i \cdot S \frac{\lambda_{al}}{e_{al}} S_{al} + \frac{\lambda_{boit}}{e_{boit}} S_{boit} + \frac{\lambda_{is}}{e_{is}} S_{is} + h_e \cdot S \right) (T_i - T_e) \quad (\text{III.59})$$

III.5.3. Bilan thermique en régime transitoire

Par analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques (tableau où on peut appliquer les lois d'OHM et de KIRSHOFF). Considérons une section quelconque du système à l'instant t, soit "i" l'un des milieux représentés dans cette section, M_i sa masse, Cp_i sa chaleur spécifique et T_i sa température.

Le bilan au nœud i donne :

$$M_i \times cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n q_{ij} + P_i \quad (\text{III.60})$$

Avec :

P_i : Terme de source ou de puits.

$$M_i \times cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad (\text{III.61})$$

Dans les cas suivants :

- Un distillateur a inertie thermique négligeable (faible masse de ses éléments, ou faible chaleur spécifique).
- Pour un régime permanent.

Tableau III.1: Analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques.

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Température	Potentiel électrique
Flux thermique	Courant électrique
Résistance thermique	Résistance électrique
Capacité thermique	Capacité électrique

III.5.3.1. Bilan du vitrage

La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conductivité à travers celle-ci, soit :

- A la face extérieure

$$\frac{M_v Cp_v}{2.A_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \left(\frac{\lambda_v}{e_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) - \phi_{rve-ciel} - \phi_{cv-a} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III.62})$$

- A la face intérieure

$$\frac{M_v Cp_v}{2.A_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = \left(\frac{\lambda_v}{e_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) + \phi_{revi} + \phi_{cevi} + \phi_{evap} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III.63})$$

ϕ_{revi} : Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

ϕ_{cevi} : Flux thermique par convection entre le film d'eau et le vitrage.

ϕ_{evap} : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

$\phi_{rve-ciel}$: Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

ϕ_{cv-a} : Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur.

λ_v : Conductivité thermique de la vitre.

e_v : Épaisseur de la vitre.

III.5.3.2. Bilan de l'eau

$$\frac{M_e C_{pe} dT_e}{A_e dt} = \phi_{cbe} - \phi_{evap} - \phi_{revi} + P_e \quad (III.64)$$

ϕ_{cbe} : Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

P_e : Puissance absorbée par la nappe d'eau, elle est négligeable pour l'eau de mer

III.5.3.3. Bilan du bassin intérieur

$$\frac{M_b C_{pb} dT_b}{A_b dt} = P_b - \phi_{cbe} - \phi_{cdb_iso} \quad (III.65)$$

ϕ_{cd} : Flux thermique perdu par conduction du bac

III.5.3.4. Bilan de l'isolant

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant thermique. Le côté intérieur du distillateur reçoit la chaleur perdue de l'absorbeur et le côté extérieur cède de la chaleur vers l'extérieur par rayonnement et par convection, d'où l'équation:

- Au niveau de la face intérieure

$$\frac{M_i C_{pi} dT_{iso,i}}{2.A_i dt} = \phi_{cdb_iso,i} - \left(\frac{\lambda_i}{\sigma_i}\right) (T_{iso,i} - T_{isoe}) \quad (III.66)$$

$\phi_{cdb_iso,i}$: Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

- Au niveau de la face extérieure

$$\frac{M_i C_{pi} dT_{iso,e}}{2.A_i dt} = \left(\frac{\lambda_i}{\sigma_i}\right) (T_{iso,i} - T_{isoe}) - \phi_{riso_sol} - \phi_{ciso_a} \quad (III.67)$$

III.5.5. Le débit du condensât

$$\frac{dM_c}{dt} = h_{evap} \frac{T_e - T_v}{L_v} \quad (III.68)$$

M : Masse du condensât.

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

T_e : Température de l'eau.

T_v : Température de la vitre

III.5.6. Coefficients d'échanges thermiques

- Par rayonnement eau-vitre

$$\Phi_{rev} = h_{rev} (T_e - T_{vi}) \quad (III.69)$$

h_{rev} : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre.

$$h_{rev} = \epsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot (T_e^2 - T_{vi}^2)(T_e + T_{vi}) \quad (III.70)$$

ϵ_{eff} : Émissivité effectif.

σ : Constante de Steffan-Boltzman.

$$\epsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\epsilon_e} + \frac{1}{\epsilon_v} - 1 \right]^{-1} \quad (III.71)$$

ϵ_e : Émissivité de l'eau

ϵ_v : Émissivité de la vitre

- Par convection eau-vitre

$$\Phi_{cev} = h_{cev} (T_e - T_v) \quad (III.72)$$

$$h_{cev} = 0.884 \left[T_e - T_v + \frac{(T_e - T_v)(T_e + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - Pe} \right]^{1/3} \quad (III.73)$$

h_{cev} : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage.

- Par vaporisation

$$\Phi_{evp} = h_{evap} (T_e - T_{vi}) \quad (III.74)$$

h_{evap} : Coefficient de transfert de chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage

$$h_{evap} = 16.273 \times 10^3 h_{cev} \frac{(P_e - P_{vi})}{(T_e - T_{vi})} \quad (III.75)$$

La pression de la vapeur d'eau est estimée par la relation suivante :

$$P = 133.32 \exp \left(18.6686 - \frac{4030.1824}{T + 273.15} \right) \quad (III.76)$$

D'autre part [35. 36] propose un polynôme du troisième degré en fonction de la température :

$$P = 0.148 \cdot T - 0.3653 \times 10^{-2} \cdot T^2 + 0.11242 \times 10^{-3} \cdot T^3 \quad (III.77)$$

- Par rayonnement vitre – milieu ambiant

$$\Phi_{rv_ciel} = h_{rv_ciel} (T_{ve} - T_{ciel}) \quad (III.78)$$

$h_{r.v_ciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{rv_ciel} = \epsilon_v \cdot \sigma T_{ve}^2 - T_{ciel}^2 \cdot (T_{v.e} + T_{ciel}) \quad (III.79)$$

T_{ciel} : Température du ciel.

La température du ciel est donnée par deux relations approximatives, l'une par :

$$T_{ciel} = T_a - 6 \quad \text{Ou} \quad T_{ciel} = T_a - 12$$

T_a : Température ambiante

En général, on utilise l'expression :

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (III.80)$$

- Par convection vitre – milieu ambiant

$$\Phi_{cv_a} = h_{cv_a} (T_{ve} - T_a) \quad (III.81)$$

$h_{c.v_a}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par la relation suivante :

$$h_{c.v_a} = 5.7 + 3.8 V \quad (III.82)$$

V : est la vitesse du vent (m/s).

- Par convection bassin – eau

$$\Phi_{cbe} = h_{cbe} (T_b - T_e) \quad (III.83)$$

h_{cbe} : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$$h_{cbe} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} \quad (III.84)$$

λ_f : Conductivité thermique du fluide (eau).

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la forme :

$$Nu = c (Gr Pr)^n \quad (III.85)$$

Avec :

Gr : Nombre de Grashoff

Pr : Nombre de Prandlt.

Où c et n sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

- Par plane horizontale

- Gradient de T vers le haut :

- L'écoulement est toujours laminaire et on a :

$$\text{Si : } Gr < 10^5 \rightarrow Nu = 1$$

L'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction

$$\text{Si } 10^5 < Gr < 2 \cdot 10^7 \Rightarrow Nu = \frac{\lambda_e}{L} 0.54 \cdot (Gr Pr)^{0.25}$$

$$\text{Si } Gr > 2 \cdot 10^7 \Rightarrow Nu = 0.14 \cdot (Gr Pr)^{0.33}$$

Nombre de Grashoff :

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\mu^2}$$

β : Coefficient de dilatation en $[k^{-1}]$.

λ : Longueur du bac absorbant en $[m]$.

ρ : La masse volumique de l'eau en $[kg/m^3]$.

g : L'accélération en $[m^2/s]$.

μ : La viscosité dynamique en $[kg/m.s]$.

Nombre de Prandlt :

$$Pr = \frac{\mu_e \cdot C_{pe}}{\lambda_e}$$

Les pertes thermiques du bassin par conduction thermique à travers l'isolation est données comme suit :

$$\Phi_{cd \text{ b iso i}} = K_b \times T_b - T_{iso} \quad (\text{III.87})$$

T_b : Température du bac.

T_{iso} : Température de l'isolant.

Avec :

$$K_b = \frac{\lambda_b}{\sigma_b} \quad (\text{III.88})$$

λ_b : Conductivité thermique du bac.

σ_b : Épaisseur du bac.

- Par conduction Isolant-bassin :

$$\Phi_{cd \text{ iso i b}} = \frac{\lambda_b}{\sigma_b} (T_b - T_i) \quad (\text{III.89})$$

- Par conduction à travers l'isolant :

$$K_i = \frac{\lambda_{iso}}{\sigma_{iso}} (T_{iso i} - T_{iso e}) \quad (\text{III.90})$$

λ_{iso} : Conductivité de l'isolant.

σ_{iso} : Épaisseur de l'isolant.

- Par conduction à travers l'isolant

$$\Phi_{c.iso.i-a} = h_{iso.e.a} \times (T_{iso.e} - T_a) \quad (III.91)$$

$h_{iso.e.a}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur.

- Par conduction à travers l'isolant

$$h_{rev} = \varepsilon_{iso} (T_{sol}^2 - T_{iso.e}^2) \cdot (T_{iso.e} + T_{sol}) \quad (III.92)$$

III.6. Description du distillateur solaire

Le distillateur est de type à pente unique et à simple effet de serre, il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à entretenir.

Il est constitué de l'intérieur par un isolant de 2 cm d'épaisseur en premier lieu et le stockeur d'énergie (MCP) le tout recouvert par l'absorbeur (une plaque d'aluminium) de 1mm peint en noir (mate), une marmite en acier inoxydable au milieu de MCP. Cette dernière est couplée avec un support cylindrique en (PVC) de même diamètre. Le vitrage est un verre simple de 04 mm d'épaisseur incliné de 30°.

On alimente le distillateur manuellement en eau à l'aide d'un tuyau, qu'on expose sous les rayons solaires naturels.

L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau ainsi obtenue se condense sous le vitrage. Les gouttelettes d'eau s'écoulent vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière conduisant à un tuyau vers un bac gradué.

III.7. Les éléments essentiels de distillateur

III.7.1. Le boîtier

On a utilisé la ruche d'abeille comme boîtier qui est ensuite isolé avec du polystyrène expansé et enrobé avec d'une l'aluminium pour réfléchir le maximum de rayonnement solaire vers la marmite.



Figure III.5 : Le boîtier avant isolation.

Le tableau suivant montre les caractéristiques de boîtier:

Tableau III.2: Caractéristiques de boîtier.

Le matériau	Longueur (m)		Largeur (m)		Hauteur (m)	Epaisseur (m)
	côté extérieur	côté intérieur	côté extérieur	côté intérieur		
Le boîtier	0.51	0.46	0.425	0.375	0.23	0.05

III.7.2. La couverture de la marmite

La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de températures ainsi qu'aux températures élevées. Une appellation « verre solaire » existe et fait l'objet d'exigences toutes particulières : le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage ainsi que de l'angle d'incidence et de la nature du rayonnement (direct ou diffus).

Actuellement, un nouveau verre, dit « antireflet ». Ce verre a un taux de transmission de l'ordre de 96%.



Figure III.6 : la couverture en verre.

La couverture est assemblée avec un support en (PVC) forme cylindrique, à une simple ponte.



Figure III.7 : Support de la couverture.

III.7.2.1. La composition du verre

Les verres ont pour composition :

- un corps vitrifiant, la silice, introduit sous forme de sable (70 à 72%).
- un fondant, la soude, sous forme de carbonate et sulfate (environ 14%).
- un stabilisant, la chaux, sous forme de calcaire (environ 10%).
- divers autres oxydes tels que l'alumine, la magnésie, améliorant les propriétés physiques du verre, notamment la résistance à l'action des agents atmosphériques.
- pour certains types de vitrage, l'incorporation de divers oxydes métalliques permet la coloration.

III.7.2.2. Quelques propriétés physiques et mécaniques du vitrage.

- **Densité** : La densité du verre est de 2,5 soit une masse de 2,5 kg par m² et par mm d'épaisseur pour les vitrages plans.
- **La masse volumique** : exprimée dans le système d'unités légales, est de 2500 kg/m³. Un m² de verre 4 mm a donc une masse de 10 kg.
- **Résistance à la compression** : La résistance du verre à la compression est très élevée : 1000 N/mm² ou 1000 MPa. Ceci signifie que, pour briser un cube de verre de 1 cm de côté, la charge nécessaire est de l'ordre de 10 tonnes.
- **Résistance à la flexion** : un vitrage soumis à la flexion a une face en compression et une face en extension. La résistance à la rupture en flexion est de l'ordre de :
 - 40 MPa (N/mm²) pour un verre float recuit.
 - 120 à 200 MPa (N/mm²) pour un verre trempé (suivant épaisseur, façonnage des bords et type d'ouvrage).

La valeur élevée de la résistance du verre trempé est due au fait que son traitement met les faces du vitrage en forte compression.

- **Elasticité** : le verre est un matériau parfaitement élastique : il ne présente jamais de déformation permanente. Il est cependant fragile, c'est-à-dire que, soumis à une flexion croissante, il casse sans présenter de signes précurseurs.
- **Module de Young (E)** : Ce module exprime la force de traction qu'il faudrait théoriquement appliquer à une éprouvette de verre pour lui communiquer un allongement égal à sa longueur initiale. Il s'exprime en force par unité de surface. Pour le verre, selon les normes européennes : $E = 7 \times 10^{10} \text{ Pa} = 70 \text{ GPa}$.
- **Coefficient de Poisson (Ó)** : (coefficient de contraction latérale) Lorsqu'une éprouvette subit un allongement sous l'influence d'une contrainte mécanique, on constate un rétrécissement de sa section. Le coefficient de Poisson Ó est le rapport entre le rétrécissement unitaire sur une direction perpendiculaire au sens de l'effort et l'allongement unitaire dans la direction de l'effort. Pour les vitrages du bâtiment, la valeur du coefficient Ó est de 0,2.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques de la couverture transparente :

Tableau III.3: Caractéristiques de la vitre transparente.

Matériau	Dimension		Emissivité
	Diamètre (m)	Épaisseur (m)	
Verre ordinaire	0.3	0.004	0.83

III.7.3. L'absorbeur

L'absorbeur est un élément essentiel du distillateur. Il est recouvert d'une peinture mate (pour éviter les réflexions) et noir (pour avoir un bon coefficient d'absorption). Il doit absorber une grande partie du rayonnement solaire et transmettre la chaleur produite vers la marmite. Il doit être le plus léger possible afin d'éviter l'inertie de mise en régime et construit avec un matériau bon conducteur. A ces deux qualités, il faut ajouter celles d'ordre mécanique et chimique (bonne tenue à la pression, à la dilatation, résistance à la corrosion, fiabilité dans le temps).

Ces types de surfaces absorbant au maximum et réémettant au minimum ont été nommées surfaces « sélectives ». **La sélectivité** de l'absorbeur est très importante; elle est améliorée au moyen de traitements de surface qui ajoutent au support des caractéristiques telles que le rayonnement solaire est très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis (dû à l'échauffement) est limité. Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs :

- α : coefficient d'absorption
- ε : coefficient d'émission



Figure III.8: L'absorbeur teinté en noir et son emplacement.

III.7.4. L'isolation.

L'isolation joue un rôle très important qui consiste en la réduction des fuites thermiques ; on a utilisé le polystyrène (épaisseur = 6cm)

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques de l'isolant :

Tableau III.3: Caractéristiques de l'isolation.

Matériau	Epaisseur (m)	Conductivité (W/m.K)
Polystyrène	0.06	0.04

III.7.5. Le stockeur d'énergie.

Il est bien évident que le premier critère de choix d'un MCP concerne la température de transformation puisqu'elle doit être conforme au procédé. Parmi tous les produits ayant une température de fusion acceptable, il est plus judicieux de choisir celui qui représentera la plus grande chaleur latente.

III.7.5.1. Le composite MCP

Un mélange de trois constituants du composite est préparé selon les pourcentages suivant :

Tableau III.4: Caractéristiques de MCP.

La masse	Paraffine	Graphite	Perlite
En pourcentage (%)	60	15	25
En kilogramme (kg)	1.5	0.78	0.625

III.7.5.2. Critères de choix d'un MCP

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- **Les propriétés thermodynamiques et thermiques**

- Une température de fusion dans la gamme de températures désirée.
- Une chaleur latente de fusion par unité de masse importante.
- Une haute densité, pour diminuer le volume du stockage.
- Une bonne conductivité thermique, pour améliorer les transferts thermiques et diminuer les gradients de température requis à la charge et à la décharge.
- Une bonne chaleur spécifique, pour bénéficier des effets du stockage en chaleur sensible.
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase, pour pouvoir utiliser des géométries simples de capsules et d'échangeurs.

- **Les propriétés cinétiques**

Le matériau ne doit pas présenter de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température de stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de 5-10 °C peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage.

Par ailleurs, la vitesse de cristallisation est déterminante pour la puissance du système de stockage. Si le produit est long à cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur.

- **Les propriétés chimiques**

- Le matériau à changement de phase doit montrer :
- Une stabilité chimique (absence de réaction chimique entre le MCP et le conteneur).
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit fiable.
- Aucune action corrosive sur les matériaux de construction ou sur leur conteneur.
- Le matériau doit être non inflammable et non explosif et ne doit pas être nocif.

- **Les propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)**

- Le MCP doit être disponible en grandes quantités.
- Être bon marché.
- Être non toxique pour les êtres vivants.
- Être recyclable en fin de vie.

III.7.6. La marmite.

Elle est en acier, elle absorbe le maximum de rayonnement solaire soit directement ou bien indirectement, c'est pour cette raison qu'elle est peinte en noire. Elle est sous forme d'une cocotte-minute (hermétique),



Figure III.9 : la marmite.

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques de la marmite.

Tableau III.5: Caractéristiques de la marmite.

Matériau	Diamètre (m)	Hauteur (m)
Dimension	0.3	0.7

III.7.7. Le réflecteur

Le réflecteur est un simple miroir de surface plane, possédant une propriété réfléchissante, reposé sur un support en bois



Figure III.10 : Le réflecteur (le miroir).

Le tableau suivant montre les caractéristiques de réflecteur :

Tableau III.6: Caractéristiques de réflecteur.

Matériau	La longueur (m)	La largeur (m)	L'épaisseur (m)
Le réflecteur	0.51	0.415	0.004

III.7.8. La gouttière

C'est un simple tuyau en plastique, elle canalise l'eau distillée pour la rapprocher du tuyau qui mène vers le bécher gradué.

III.7.9. La tuyauterie

La tuyauterie est en plastique ; elle est utilisée pour la récupération d'eau distillée.

III.7.10. Bécher gradué

Le bêche gradué (figure III.11) facilite la mesure de quantité des eaux distillées collectées dans le but de savoir la quantité d'eau distillée produite pour chaque test.



Figure III.11. Bêcher gradué.

III.7.11. Thermocouples

Des thermocouples sont nécessaires pour le prélèvement des températures de toutes les parties du distillateur (l'eau à distiller, l'intérieur du distillateur, température du vitrage à l'intérieur et à l'extérieur, le réflecteur et la température ambiante).

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température. Il se compose de deux métaux de natures différentes reliés à une extrémité. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, qui peut être ensuite transcrite en température. Les alliages thermocouple sont généralement disponibles en fils.



Figure III.12 : thermocouple de type K.

Pour collecter les données fournies par les thermocouples on a utilisé un instrument de d'enregistrement de données basé sur PC. « Pico Technology Enregistreur de données, Température ».

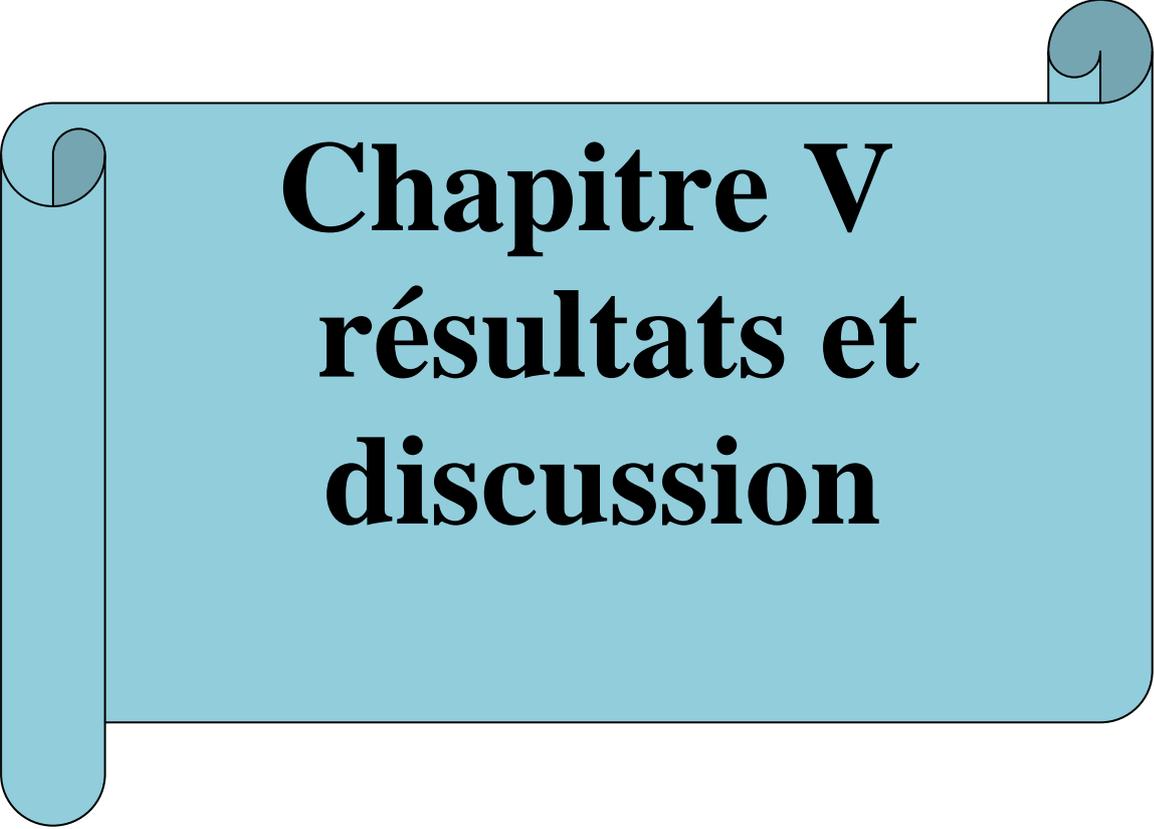


Figure III.12: Pico Technology Enregistreur de données, Température.

Cet enregistreur de données de température basé sur PC est facile à utiliser, et permet la collecte, l'analyse et l'affichage de 8 thermocouples maximum. L'enregistreur de données peut être utilisé avec tout un éventail de types de thermocouples, ce qui en fait un choix idéal pour la plupart des besoins. Il offre également une connectivité USB et des alarmes programmables nous permettant de fixer des limites pour chaque canal.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu les différents phénomènes d'échange énergétique ainsi que les échanges de chaleur au sein de distillateur, on a cité aussi les hypothèses simplificatrices ensuite les bilans énergétiques d'un distillateur solaire, enfin on a fait une description de notre prototype et ces différents éléments.



Chapitre V

résultats et

discussion

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats d’une série de tests expérimentaux qu’ont été effectués sous un ensoleillement naturel au Campus Hasnaoua II, au niveau de la faculté du Génie de la construction (UMMTO).

IV.2. Discussions des résultats

IV.2.1. Premier essai effectué le (25-9-2019),

Ciel clair, journée ensoleillée

Heure (h)	Eclairement (W/m ²)
6 :50	16,8
7 :30	476
8 :30	803,5
9 :30	933,6
10 :30	994,9
11 :30	1023,2
12 :30	1032,2
13 :30	1025,7
14 :30	1001
15 :30	946,3
16 :30	831,2
17 :30	553,1
18 :15	53,8

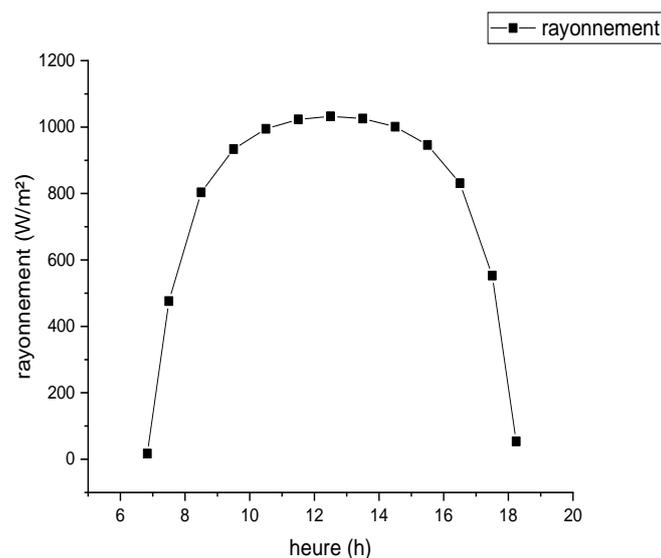


Figure IV.1 : Eclairement incident pour la ville de Tizi-Ouzou pour le 1^{er} essai.

Après avoir terminé la réalisation et assemblé tous les éléments du distillateur, on a directement effectué un test.

On a mis une quantité d’eau de mer (0.5 L) dans la marmite, et on a mesuré l’évolution des températures de l’eau toutes les 15 min.

Après 30 min d’exposition du capteur au soleil, des gouttelettes d’eau distillée apparaissent sur la face intérieure de la vitre. L’eau saumâtre s’est vaporisée et le condensat s’est formé sur la vitre. La vapeur produite subit une condensation au contact de la vitre refroidie par l’air extérieur.

Le tableau ci-dessous résume les températures mesurées au cours du 1^{er} essai

Tableau IV.1 : les températures de l'eau à distillée mesurées en 1^{er} essai.

L'heure (h)	Le temps (min)	La température (°C)
12 :15	0	43.8
12 :30	15	47.5
12 :45	30	53.0
13 :00	45	54.9
13 :15	60	55.6
13 :30	75	57.4
13 :45	90	59.3
14 :00	105	60.8
14 :15	120	62.1
14 :30	135	64.2
14 :45	150	65.7
15 :00	165	66.5

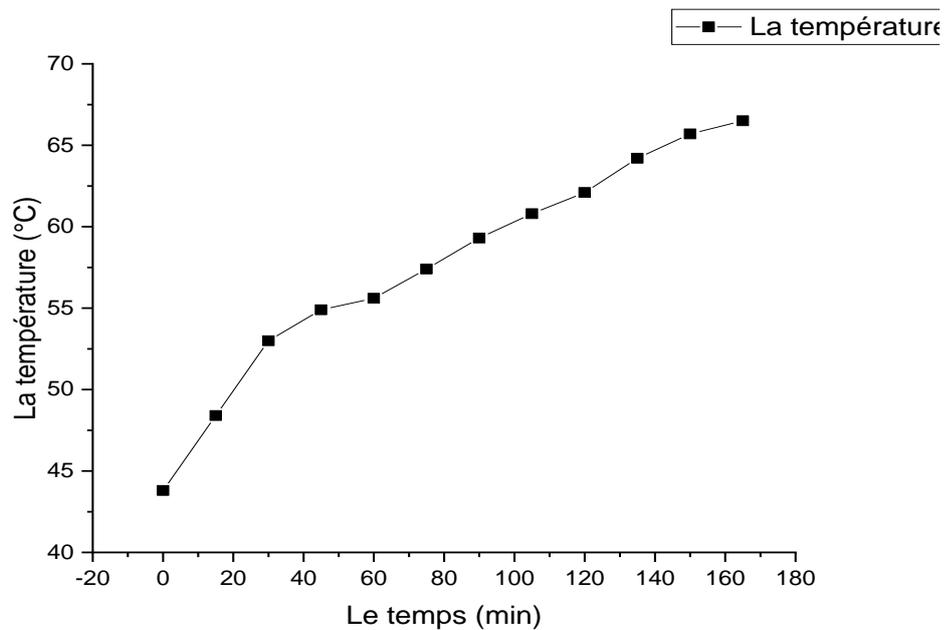


Figure IV.2 : Variation de la température de l'eau à distillée en fonction du temps

Dans ce test on a constaté la montée en température de l'eau tout le long de l'essai, cette augmentation est due au positionnement de réflecteur qui assure que les rayons solaires sont toujours bien réfléchis sur le vitrage du distillateur.

La figure IV.2 montre l'augmentation de la température de l'eau, ce qui implique une augmentation de la production de l'eau distillée.

A la fin de la journée, nous avons récupéré une quantité d'eau distillée.

Surface de la vitre :

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,07m^2$$

Dans une surface de (0,07 m²), nous avons obtenu (0,07 L) d'eau distillée.

Pour une surface de 1 m², la quantité d'eau serait de 1 L.

IV.2.2. Deuxième essai (09-10-2019)

Ciel clair, journée ensoleillée

Heure (h)	Eclairement (W/m ²)
06:56	3
07:30	344,1
08:30	755,3
09:30	909,3
10:30	979,9
11:30	1012,1
12:30	1021,5
13:30	1010,3
14:30	980,4
15:30	910,3
16:30	757,7
17:18	351,2
18:05	3,2

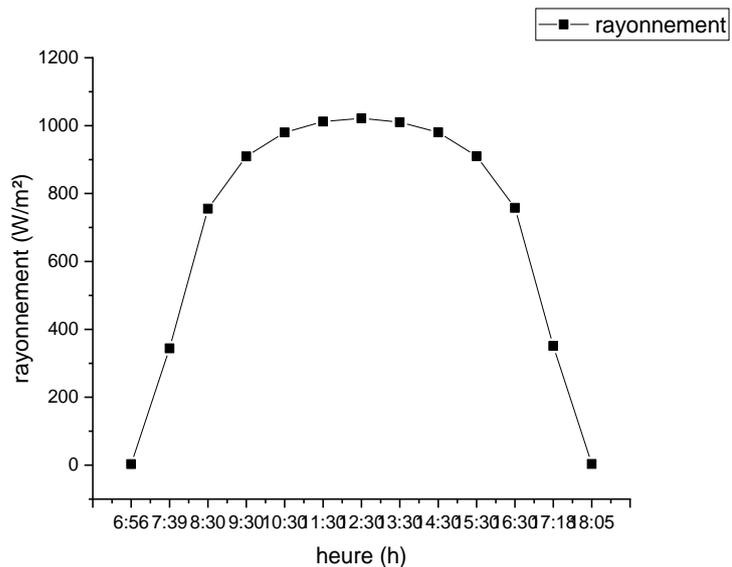


Figure IV.3 : Eclairement incident à Tizi-Ouzou, au 2^{ème} essai.

Nous avons commencé le test à 12h:00, après avoir alimenté le distillateur en eau d'une quantité de (0.5 L). On a mesuré les températures de l'eau à distiller toutes les 30 minutes et voici les résultats obtenus :

Tableau IV.2 : Les températures de l'eau à distiller mesurées au 2^{ème} essai.

L'heure (h)	Le temps (min)	La température (°C)
11 :00	0	24.3
11 :30	30	29.6
12 :00	60	33.2
12 :30	90	37.5
13 :00	120	44.4
13 :30	150	46.2
14 :00	180	54.2
14 :30	210	57.0
15 :00	240	58.1

Ces valeurs sont reportées sur la courbe ci-dessous :

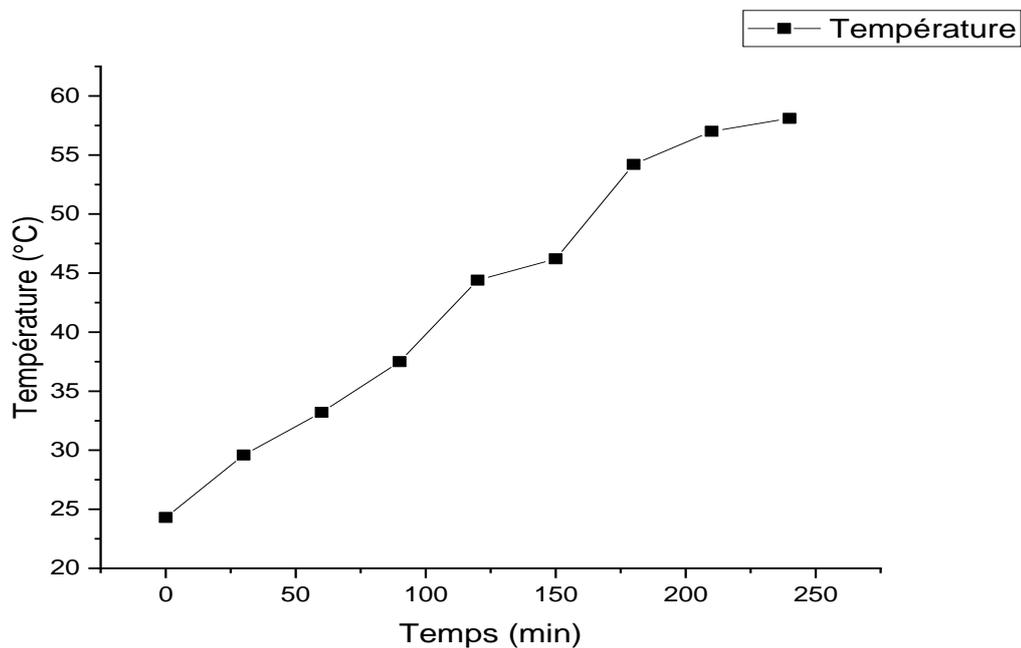


Figure IV.4 : variation de la température de l'eau à distillée en fonction du temps. (2^{ème} test)

On a remarqué toujours l'augmentation proportionnelle des températures de l'eau à distiller avec le temps.

Après deux heures d'exposition sous le rayonnement solaire global, nous avons assisté à l'apparition des premières gouttes sur la face intérieure de la vitre.



Figure IV.5 : La formation des gouttes. (2^{ème} test)

Comme on voit sur cette photo il y a formation des gouttes, ce qui signifie que l'eau se chauffe jusqu'à vaporisation.

A la fin de l'essai (4 heures), on a récupéré 0,06 L

Pour une surface de 1 m² la quantité d'eau serait de 0,86 L

IV.2.3.Troisième essai (15-10-2019)

Journée ensoleillée avec ciel partiellement nuageux

Heure (h)	Eclairement (W/m ²)
06:00	0,8
07:30	278
08:30	729
09:30	895,9
10:30	971,4
11:30	1005,6
12:30	1015,3
13:30	1004,9
14:30	969,6
15:30	892
16:30	720
17:30	246,1

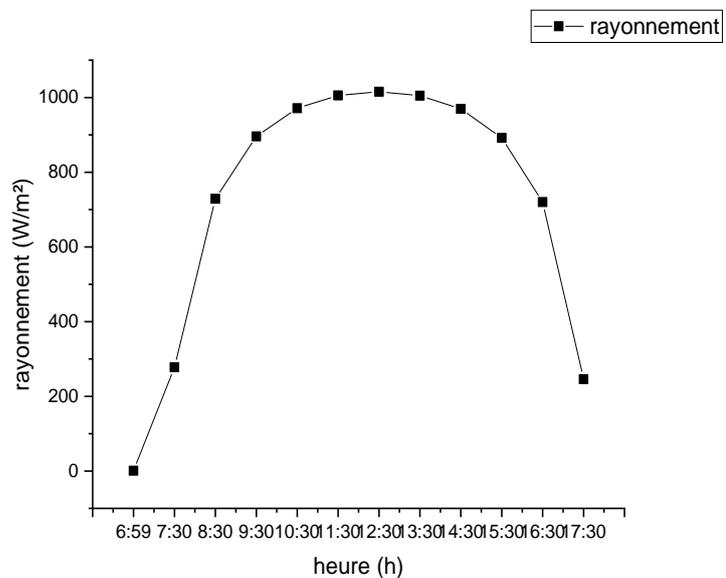


Figure IV.6: Eclairement incident pour la ville de Tizi-Ouzou au 3^{ème} essai.

Malgré le fait que le ciel n'était pas dégagé, le test a été réalisé pour mieux cerner les performances du distillateur dans les différentes conditions atmosphériques.

Avec une température ambiante de 23°C ; nous avons commencé le test à 10h 30 avec une quantité d'un litre d'eau de mer. On a mesuré les températures chaque 30 minutes et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.3 : Les températures de l'eau à distiller mesurées au cours du 3^{eme} essai.

L'heure (h)	Le temps (min)	La température (°C)
10 :30	0	35.1
11 :00	30	37.5
11 :30	60	40.7
12 :00	90	42.5
12 :30	120	44.3
13 :00	150	45.1
13 :30	180	47.5
14 :00	210	48.1
14 :30	240	50.4

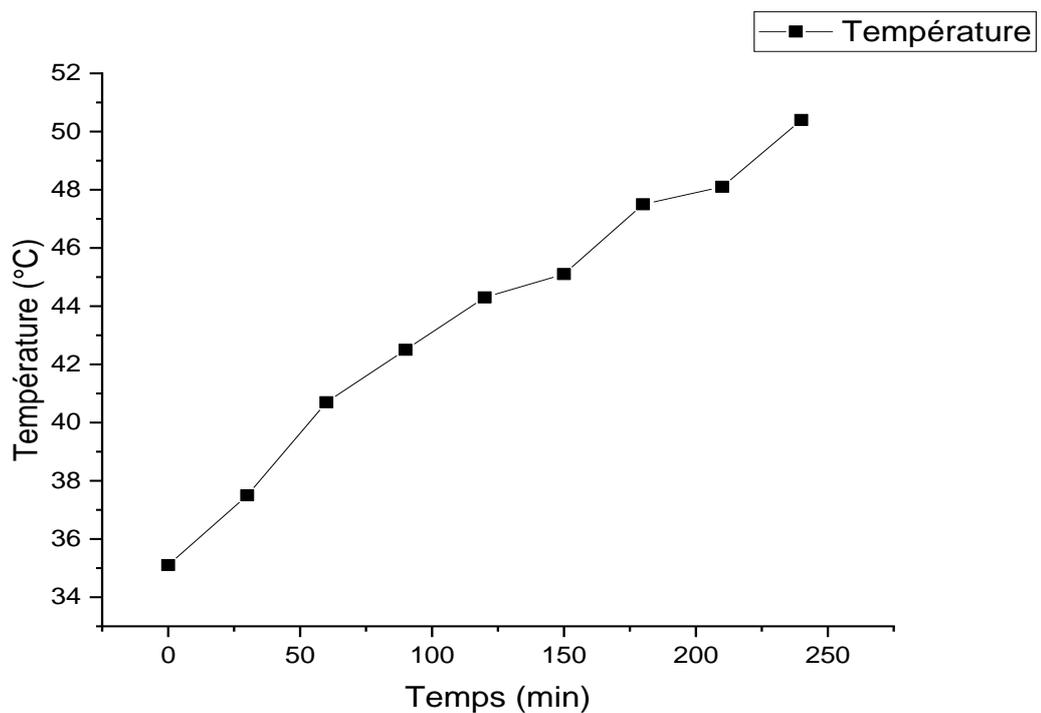


Figure IV.7: Variation de la température de l'eau à distiller en fonction du temps.

Les premières gouttelettes sont apparues sur le vitrage quand la température à l'intérieur de distillateur était à 40 °C, comme le montre la figure suivante :



Figure IV.8: Apparition des premières gouttes. (3^{ème} test)

La production de l'eau distillée est déclenchée après trois heures avec une quantité de 0.08 L ; à la fin de la journée une quantité de 0.13 L a été récupérée.

La projection pour une surface de 1 m² serait de 1.85 L.



Figure IV.9 : Glissement des gouttelettes (au cours du 3^{ème} test).

IV.2.4. Quatrième essai le (30-10-2019),

Ciel partiellement nuageux

heure (h)	Eclairement (W/m ²)
07:36	152,6431
08:30	644,8075
09:30	853,855
10:30	944,7736
11:30	985,3088
12:30	996,4081
13:30	983,0761
14:30	939,2679
15:30	841,8561
16:30	614,767
17:21	118,6868

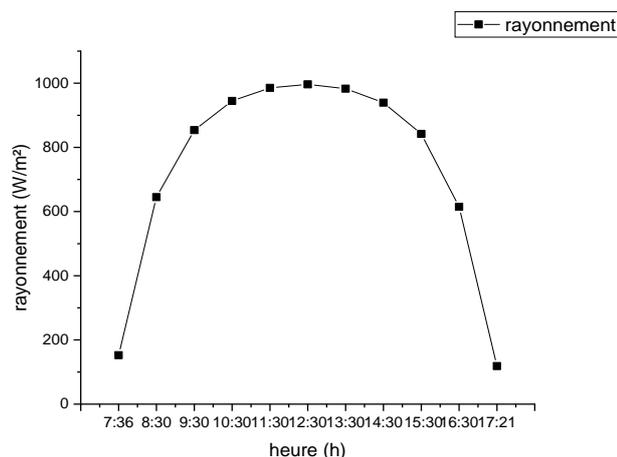


Figure IV.10: Eclairement incident pour la ville de Tizi-Ouzou au cours du 4^{ème} essai.

Nous avons exposé le distillateur sous les rayons solaires à une température ambiante de 24.5°C et on a commencé à mesurer les températures à 11 h et voici les résultats obtenus :

Tableau IV.4 : les températures de l'eau à distiller mesurées a 4^{ème} essai.

L'heure (h)	Le temps (min)	La température (°C)
11 :00	0	35.01
11 :30	30	37.5
12 :00	60	45.2
12 :30	90	49.7
13 :00	120	52.0
13 :30	150	55.1
14 :00	180	55.3
14 :30	210	55.4
15 :00	240	58.0

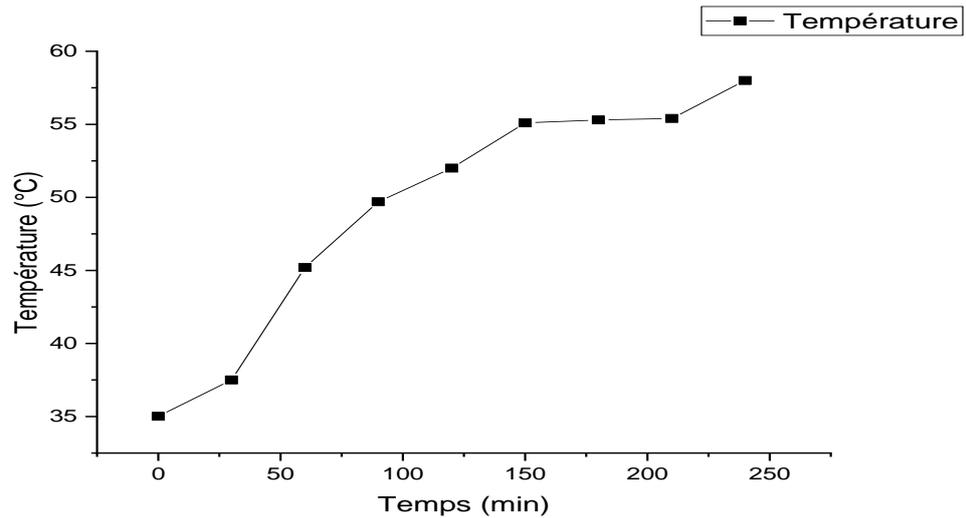


Figure IV.11: Variation de la température de l'eau à distiller au cours du temps (4^{ème} test)

On observe que les températures augmentent au fur et à mesure que le rayonnement solaire augmente jusqu'à 13h 30 ; on remarque que les températures se stabilisent à cause du passage des nuages qui ont réduit le rayonnement solaire incident pendant 90 minutes.

La figure IV.12 montre les premières gouttes :



Figure IV.12 : Les premières gouttes. (4^{ème} test)

La récupération de l'eau distillée a été faite après 90 minutes qu'on a commencé les mesures et nous avons obtenu une quantité d'eau de 0.06 L.



Figure IV.13: Glissement des gouttelettes. (4^{ème} test)

A la fin de la journée nous avons récupéré 0,15 L

En projection sur une surface était de 1 m², la quantité serait est de 2 ,14 L

IV.2.5. Cinquième essai (04-11-2019),

Ciel dégagé

heure (h)	Eclairement (W/m ²)
07:39	116,8565
08:30	610,3858
09:30	837,2181
10:30	934,3925
11:30	977,5073
12:30	989,332
13:30	975,2469
14:30	928,8053
15:30	824,9376
16:30	578,9989
17:18	86,4766

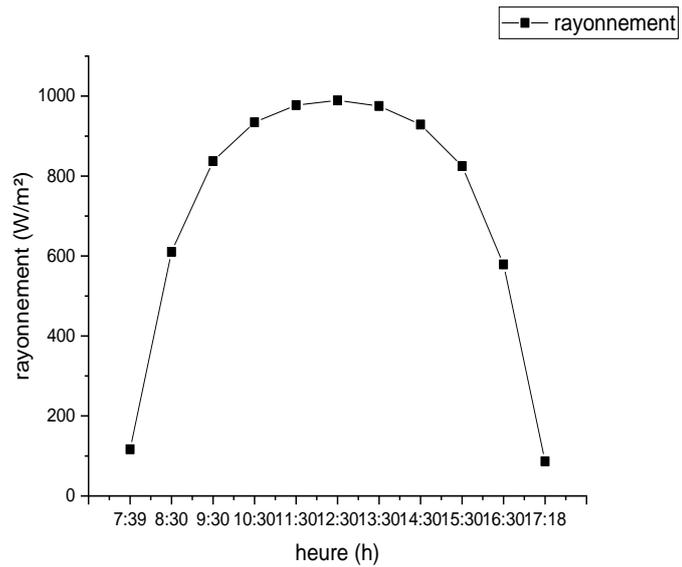


Figure IV.14: Eclairement incident pour la ville de Tizi-Ouzou au 5^{ème} essai.

Après avoir installé sept capteurs de température qui sont placés comme suit :

Thermocouple 1 : température de l'eau à distillée.

Thermocouple 2 : température dans la marmite.

Thermocouple 3 : température de l'absorbeur.

Thermocouple 4 : température de la vitre extérieur.

Thermocouple 5 : température de l'air ambiant.

Thermocouple 6 : température de réflecteur (miroir).

Thermocouple 7 : température de la vitre intérieur.

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K.

Le thermocouple mesure les températures à différents endroits, avec un pas d'une minute pendant une période de 223 minutes (3h et 43 min).



Figure IV.15 : Mise en place des thermocouples.

Tableau IV.5 : les différentes températures mesurées au 5^{ème} essai.

Heure	T eau	T enceinte	T absorbeur	T vitre ext	T air ambiant	T réflecteur	T vitre int
Minutes	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	39,88	44,59	47,83	38,98	23,52	39,89	40,2
5	40,69	46,14	48,54	39,07	22,98	44,07	40,79
10	41,54	45,11	49,09	39,55	23,33	44,03	40,47
20	43,16	47,41	51,42	41,65	23,51	44,63	42,12
30	44,29	47,89	50,42	40,63	23,31	44,31	42,72
40	46,05	48,32	48,96	40,44	23,29	42,87	43,2
50	47,77	47,79	47,51	38,67	22,16	40,77	40,76
60	47,56	47,23	48,31	38,45	23,3	42,13	41,45
70	47,97	49,1	48,92	39,86	24,52	41,91	40,27
80	47,48	49,47	51,1	42,74	26,39	43,25	40,88
90	48,91	51,05	51,2	43,55	24,47	41,34	40,25
100	50,16	52,01	52,07	45,21	23,79	41,55	40,02
120	50,27	52,06	52,6	45,69	24,22	42,17	41,08
130	49,59	52,25	53,77	45,04	25,7	46,26	43,59
140	49,91	52,12	52,59	46,1	27,26	50,08	46,54
150	50,52	53,15	51,79	46,73	27,56	50,75	48,12
160	50,94	53,27	52,55	46,49	26,91	51,31	47,93
170	51,33	54,77	55,29	47,57	27,28	52,58	48,91
180	51,5	53,52	51,85	44,48	26,38	50,47	47,48
190	51,33	51,81	51,4	43,98	25,94	48,71	46,09
200	52,34	51,65	49,67	42,53	24,56	45,85	45,95
210	52,53	51,7	48,96	42,06	24,16	44,51	44,59
220	53,24	53,24	49,97	41,68	23,39	40,89	44,32
223	52,48	52,67	50,85	40,55	23,08	42,51	43,64

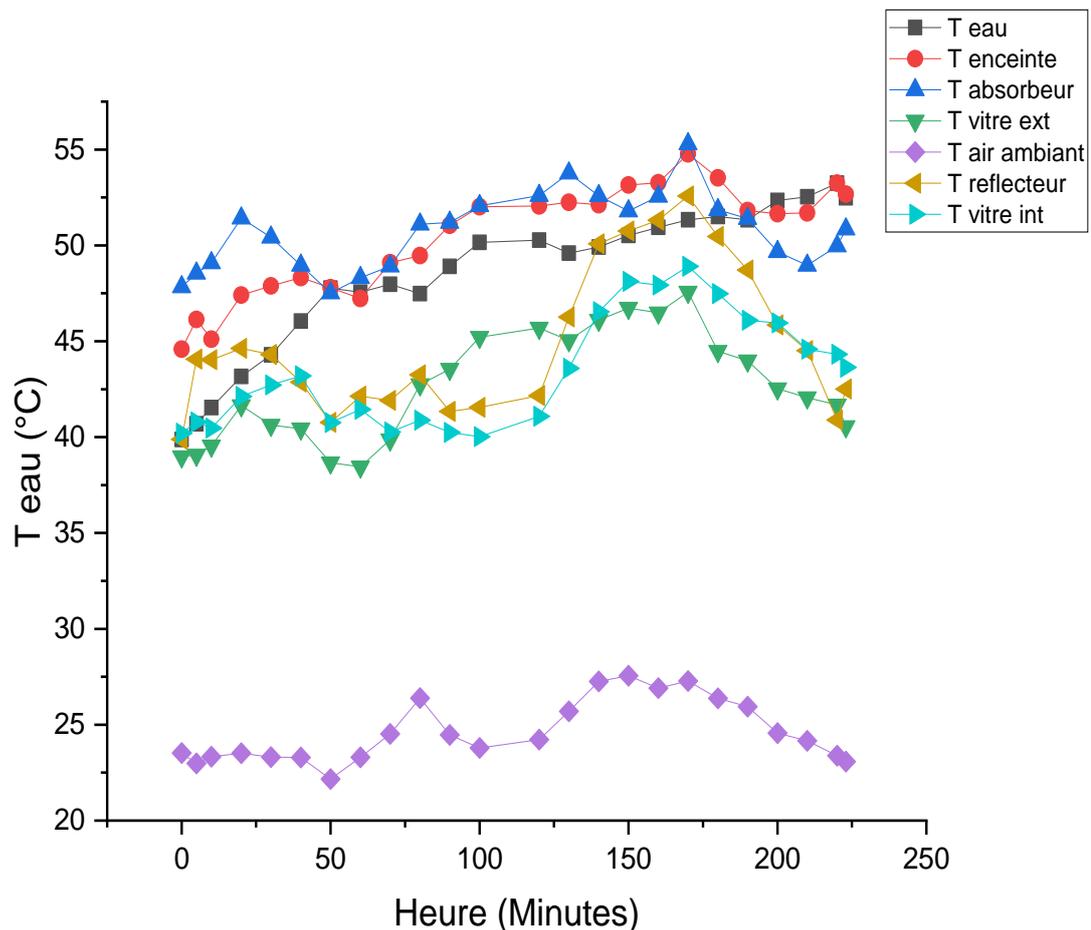


Figure IV.16 : variation de la température en fonction du temps (5^{ème} test)

A la fin de la journée une quantité de 0.14L a été récupérée.

La projection si la surface était de 1 m² est 2 L.

La figure IV.16 montre l'évolution des températures en fonction du temps au sein du distillateur :

L'évolution de la température de l'eau à distiller en fonction de temps : la température augmente progressivement et cela est dû au rayonnement solaire incident et au rayonnement réfléchi par le réflecteur.

L'évolution de la température de l'enceinte en fonction de temps : on remarque l'augmentation de la température à cause l'évaporation de l'eau à distiller.

L'évolution de la température de la vitre intérieure en fonction du temps : la température augmente progressivement à cause du flux de chaleur cédé par l'évaporation de l'eau à distiller.

L'évolution de la température de la vitre extérieure en fonction du temps : on remarque aussi l'augmentation progressive de la température à cause du flux cédé par convection naturelle à l'extérieur et par rayonnement. On constate qu'elle est inférieure à la température de l'enceinte et à celle de l'eau à distiller, sa courbe est située en dessous de celles de l'enceinte et de l'eau.

L'évolution de la température de l'absorbeur en fonction de temps : une augmentation de température a été remarquée aussi pour l'absorbeur grâce au rayonnement solaire global et le rayonnement réfléchi par le réflecteur.

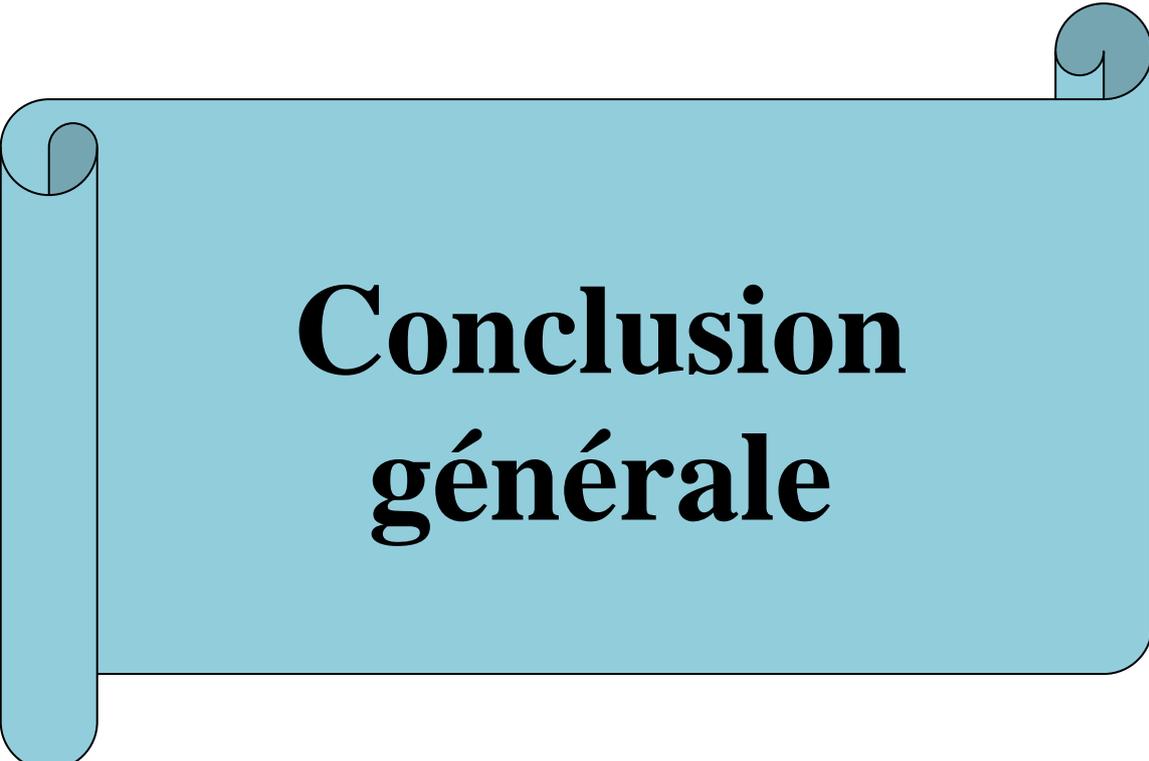
L'évolution de la température de réflecteur en fonction de temps : une augmentation significative de la température du réflecteur au début qui est dû au mal emplacement de thermocouple. Après on observe une variation proportionnelle à la température ambiante et une légère diminution au cours de l'essai qui est due à la vitesse de l'air qui fait accélérer la convection.

Conclusion :

D'après les essais effectués sur notre prototype, on a remarqué qu'au cours de l'insolation, la température des différents éléments du distillateur suit l'évolution du rayonnement solaire ; d'où les maximas se trouvent là où le rayonnement solaire est maximal.

La production d'un distillateur est liée étroitement à la quantité de chaleur qu'il reçoit.

On constate que la quantité d'eau distillée est importante par rapport à la surface (qui est très petite).



**Conclusion
générale**

Conclusion générale

La production d'eau douce par voie solaire est importante à deux points de vue, la nécessité d'économiser de l'énergie et le souci de procurer de nouvelles ressources en eau.

L'objectif principal a été basé sur une étude purement expérimentale de la distillation solaire à effet de serre afin d'obtenir de l'eau distillée qui pourra pallier aux besoins en eau potable.

Après avoir introduit des notions sur le gisement solaire et le rayonnement solaire, ainsi qu'un bref historique sur la distillation solaire et les différents procédés de dessalement particulièrement le procédé de la distillation solaire, ceci nous a amenés à entreprendre une étude des phénomènes physiques qui conditionnent le fonctionnement du distillateur solaire (rayonnement, conduction, convection, l'évaporation et la condensation).

Les variations des températures nous suggèrent à dire que la production d'eau distillée dépend évidemment de l'énergie solaire incidente mais également à la surface absorbante et principalement la surface d'échange entre l'absorbeur et la marmite

Il apparait en particulier qu'une augmentation de rayonnement solaire direct et réfléchi reste les paramètres les plus influents sur la production d'eau distillée.

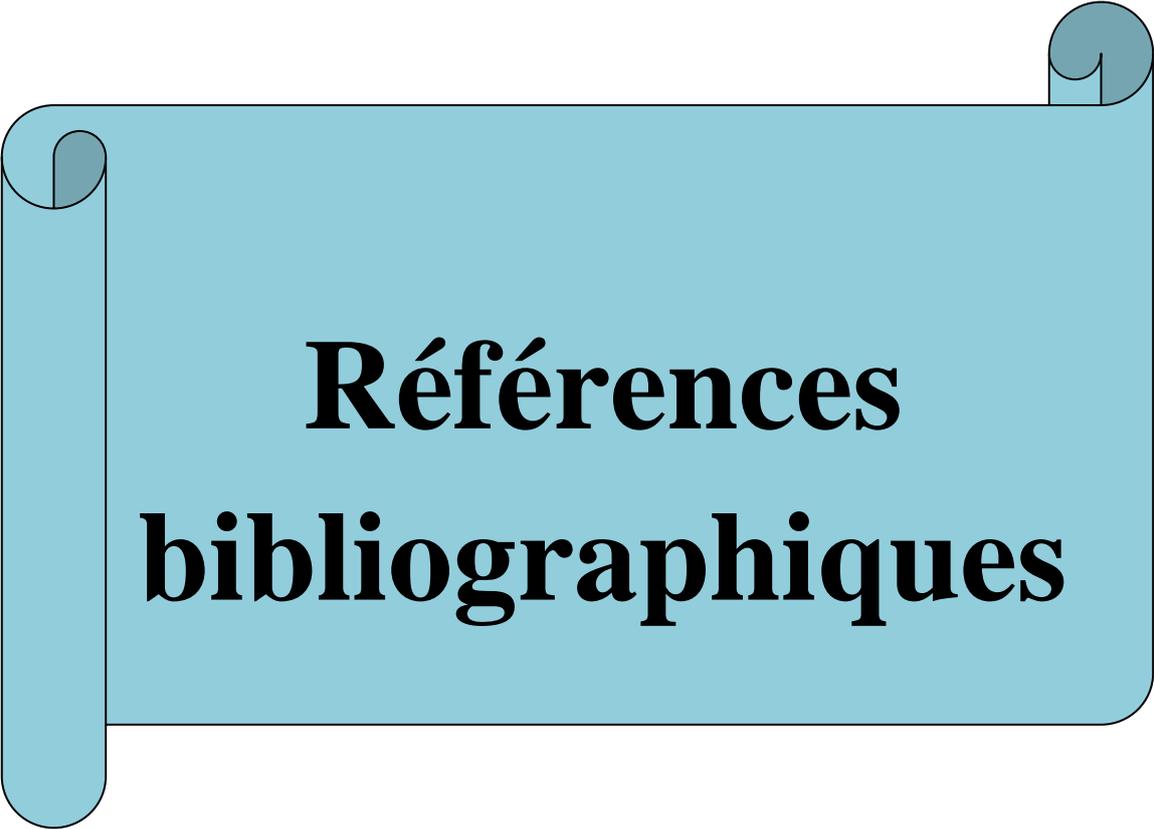
Pour que le rayonnement soit perpendiculaire à la surface de réflecteur et afin d'optimiser tout le système, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite solaire.

L'utilisation d'un absorbeur métallique noir a amélioré la productivité du distillateur, et cela due à une bonne absorptivité de l'absorbeur causée par sa couche sélective.

L'utilisation de miroir comme réflecteur a amélioré la productivité du distillateur, et cela est dû à la bonne réflexion des rayons solaires sur le distillateur.

On peut cependant retenir les recommandations suivantes pour améliorer les performances de distillateur et on propose :

- Choisir un verre qui laisse passer une bonne partie des radiations et qui n'absorbe pas les radiations infra-rouges (sa température ne doit pas augmenter).
- Superposer deux verres ordinaires avec une fine lame d'air, ce qui permet de refroidir la vitre intérieure et faire accélérer la condensation.
- Effectuer les tests dans les périodes de chaleur sous un rayonnement solaire intense.
- Utiliser un système d'essuie-glace pour faire balayer les gouttes formées sur la vitre intérieure qui empêche le passage de rayonnement incident.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Abdihak ; A. Rachid. Etude et réalisation d'un distillateur solaire, mémoire de master, Energie renouvelable ; Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2016.
- [2] Alain Ricaud, 2011. Gisement solaire et transferts énergétique, Université de CERGY PONTOISE
- [3] D^r. Salmi Mohamed. Cours : le gisement solaire ; département de physique, université Mohamed Boudiaf_ Msila
- [4] RAYMOND BACQ (1982) « Le guide de l'énergie solaire et les pompes à chaleur »
Edition marabout
- [5] R. BETNARD, G. Menguy, M. Schwartz. Livre: le rayonnement solaire; conversion thermique et application.
- [6] DJADOUR Ahmed, BOUSSADIA Ahmed. Etude et réalisation d'un capteur solaire thermique à air, Mémoire de Master Energétique ; Université de mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2016.
- [7] Drif Idir. Bilan thermique d'un chauffe eau solaire, Mémoire de Master, Energétique ; Université de mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2013
- [8] www.portail.cder.dz (consulté octobre 2019)
- [9] Babaarbi Khalissa, Boussoufi Cherifa. Etude comparative des deux convertisseurs énergétiques solaires. Mémoire de Master; Energétique, Université Djilali BOUNAAMA KHEMIS-MILIANA
- [10] Omar Ketfi, Djamel Lafri. Le capteur solaire plan thermique .2015
- [11] Ait Saada Sonia, mémoire de Master, refroidissement d'un panneau photovoltaïque avec stockage de chaleur, Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou, 2016.
- [12] A. Ziyadou, Etude et conception d'un distillateur solaire à effet de serre, diplôme d'études approfondies en physique, 2011
- [13] Malik, M.A.S; TIWIRI, G; KUMAR, S et SLDHA, MS. Solar distillation. Oxford,pergamon press. (1982).
- [14] Al-Shammiri, M, et Safar, M Multi-effect distillation plants: state of the art; Desalination126. (1999)
- [15] Michel DUTANG, Le dessalement de l'eau de mer, Le magazine de la chronique scientifique / n °4 / Juillet-Août 2005.
- [16] BOUTEBILA Hichem, THESE de Doctorat, Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole. 2012
- [17] Perreau Benoit, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : les techniques d'hier et d'aujourd'hui, contexte économique et perspectives, février 1998.
- [18] BELGHIT, A ; CHERIFI, M et TAKILT, T. Influence des paramètres thermodynamique sur le rendement d'une station de dessalement MSF avec recirculation de la saumure. (2017)
- [19] J. Dunglas," "le dessalement de l'eau de mer une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau ", membre de l'académie d'agriculture de France, manuscrit publié en février 2014.
- [20] <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/le-dessalement-de-leau-de-mer-et-des-eauxsaumatres-840#d0e174>

Références bibliographiques

- [21] A. Boutreaà, M. Mekhermeche, "L'influence d'une surface réfléchissante sur le rendement d'un distillateur solaire simple ", ingénieur d'état en génie des procédés, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2006.
- [22] Thèse: A. R. Garcia. Étude de la congélation comme technique de traitement des eaux.2004.
- [23] Y. Mandri," Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer Par congélation sur paroi froide", diplôme de doctorat en génie des procédés, Université Claude Bernard, Lyon 2011.
- [24]A. Maurel, « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce » 2e édition, Technique et documentation. Paris.
- [25] Production adduction d'eau potable, usine de dessalement. hmf.enseeiht.fr, BEI ERE 2009 – 2010.
- [26] K.Rabah "Contribution a l'étude d'un distillateur solaire modulaire constitue d'un capteur solaire a ruissellement et d'une chambre a condensation», docteur en génie mécanique, Université des sciences et de la technologie houari Boumediene.2012
- [27]A. Chaker et al, Caractéristique de fonctionnement d'un distillateur solaire, Journée Internationale de thermique, Tanger, Maroc 2005.
- [28] N. Bellel et al, Etude, réalisation et simulation numérique d'un distillateur solaire à cascade, Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa 2012
- [29] CHAKR A, BELLEL N., et MENGUY G., « Perte thermique dans un distillateur sphérique ». Revue Internationale D'Héliothermie, N°28,46-49 (2003).
- [30] Abderrahmane. K et Guehef. C ; Mémoire de fin d'étude, Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan pour une communauté saharienne,2016.
- [31] S. Fedali, modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales, thèse magistère 2013.
- [32] M. Boukar et al, Construction et expérimentation d'un distillateur solaire vertical indirect à simple effet, Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen 2007.
- [33] 'Dessalement par énergies renouvelables .MEDRC' A. Maure L, Février 2004.
- [34] **Kaabi .A et Smakdji. N.** Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar still global efficiency; Desalination 209. (2007)
- [35] Sacadura "**Initiation aux transferts thermiques**" Technique et documentation, Paris, 4^e tirage **1993**.