



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : M2...../GPM/GC/2021

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie des procédés des matériaux & Génie chimique

### Etude de la performance d'un distillateur solaire

Présenté par:

**Beloufa Mohamed Adem Abdeldjebbar**

**Sihoub Houari**

Soutenu le 28/06/ 2021 devant le jury composé de:

Présidente:	Mme Abdelmalek	Grade	Professeur	U - Mostaganem
Examinatrice:	Mlle Benalioua	Grade	MCB	U - Mostaganem
Examinatrice:	Mme Mahrez	Grade	MCB	U - Mostaganem
Examineur:	Mr Dahmane	Grade	MAA	U - Mostaganem
Encadrant:	Mr Mana	Grade	MCA	U Mostaganem

Année Universitaire : 2020 / 2021

# Dédicaces

# *Dédicaces*



*A CELUI QUI M'A INDIQUÉ  
LA BONNE VOIE EN ME  
RAPPELANT QUE LA  
VOLONTÉ FAIT TOUJOURS  
LES GRANDS HOMMES...*

*À mon Père.*

*A CELLE QUI A ATTENDU  
AVEC PATIENCE LES  
FRUITS DE SA BONNE  
ÉDUCATION,...*

*À ma Mère.*

*À mon frère.*

*Adem*

# *Dédicaces*



*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents pour leur soutien, leur patience, leur  
encouragement durant mon parcours scolaire*

*A mon encadrant Mr MANAA qui m'a beaucoup aidé  
pendant la période d'attente*

*A mes sœurs et mon frère ainsi à toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*Et à l'ensemble des étudiants de la promotion master GC  
de l'année 2020/2021*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près et de loin pour  
que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

*Je dédie cette remise de diplôme à ma chère mère décédée  
et je demande à Dieu de bénir son âme pure au paradis.*

*Houari*

# Remerciements

### *Remerciements*

*Nous tenons en tout premier lieu à remercier Allah le tout puissant qui nous a donné cette puissance et cette patience pour présenter ce travail. Nos premiers remerciements vont à notre encadrant de mémoire, le Dr Mohamed Mana. On le remercie pour tous les efforts qu'il a déployés dans la supervision du déroulement des manipulations, de sa contribution substantielle dans l'analyse et l'interprétation des résultats, des corrections du manuscrit, des encouragements et des conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer.*

*Nous tenons à remercier Pr Bendorouché, qui a contribué à cette étude et nous a dirigé, nos vifs remerciements s'adressent A Mr Khouani Nadir ingénieur du laboratoire de L'ENSA-Mostaganem.*

*Nous tenons à remercier:*

*Mme Abdelmalek Professeur à l'université de Mostaganem d'avoir accepté de présider ce jury. Qu'elle trouve ici l'expression de notre respectueuse gratitude.*

*Dr BENALIOUA maître de conférences B à l'université de Mostaganem, Dr MAHREZ maître de conférences B à l'université de Mostaganem et Mr DAHMANE maître assistant A à l'université de Mostaganem qui ont bien voulu prendre le temps d'examiner et de juger ce travail.*

*Un grand merci à nos amis qui ont eu confiance en nous et qui, par leur présence et leur soutien, nous ont aidé à surmonter certains moments difficiles et nous ont permis de relativiser les obstacles de la vie et nous ont encouragé à toujours aller vers l'avant.*

*Une attention toute particulière va aux membres du Département de Génie des procédés pour l'aide technique, le travail administratif et le soutien moral qu'ils nous ont apporté. Enfin nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement à la réalisation de ce travail.*

## ملخص

إمدادات مياه الشرب قد أصبحت المشكل الأكبر في عصرنا , حيث يتزايد الطلب على المياه في حين أن الموارد الطبيعية تنقص أو تميل إلى الزوال . أحد الحلول التي يمكن أن تساعد على زيادة وفرة المياه الصالحة لمشرب، تحلية مياه البحر أو المياه قليلة الملوحة. أنسب طريقة لذلك هو تقطير وتحلية المياه بالطاقة الشمسية، وذلك نظرا لبساطتها وانخفاض التكلفة وخاصة توفر مصدر الطاقة

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير العوامل الداخلية والخارجية على عمل المقطر وكيفية إيجاد الإستعمال الأمثل لهذه العوامل، وبالتالي تحسين الإنتاج والمردود والأداء

نظام المعادلات التي تحكم تشغيل المقطر نظام انتقالي انشأ من أجل المحاكاة الرياضية وقد أعطت النتائج التي تظهر بوضوح أثر العوامل الداخلية والخارجية.

الإشعاع الشمسي لايزال العامل الأكبر تأثيرا على سلوك المقطر الشمسي

يبدو أيضا أن العوامل الترموفيزيائية والعناصر المكونة له تلعب دورا هاما جدا في تحسين أداء المقطر، التحكم الأمثل في هذه العناصر يمكن أن يزيد من كفاءة وفعالية المقطر

الكلمات المفتاحية : التقطير الشمسي, نظام انتقالي, الإنتاج, الأداء, المردود

## Abstract

Supply drinking water became the most alarming problem of our time, since the demand for water grows while the natural resources decrease or tend to disappear. One of the solutions which can contribute to the increase in the water potentialities is the desalination of sea water or brackish water. The most adequate process to carry out this desalination is solar distillation, considering its simplicity, its lower cost and especially the availability of the source of energy.

The aim of our work has been to study the effect of externals and internals parameters on the working characteristics of a solar still in order to optimize those parameters and improve the out put and the production.

The system of equations of the working of the solar still in transition regime has been established. A mathematical simulation has been carried to get results that show the effect of externals and internals, the incident solar radiation which is the most influent factor on the behavior of solar still, wherever the velocity of wind and ambient temperature. It's appear that thermo physical proprieties and construction have a important role on the improve of the still efficiency, a good optimization of those parameters make rising the efficiency and out put of the solar still.

Key words: solar still, transition regime, production, performance, out put.

## **Résumé**

L'approvisionnement en eau potable est devenu le problème le plus préoccupant de notre époque, puisque la demande en eau croît tandis que les ressources naturelles diminuent ou tendent à disparaître. Une des solutions qui peut contribuer à l'augmentation des potentialités en eau est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Le procédé le plus adéquat pour effectuer ce dessalement est la distillation solaire, vu sa simplicité, son moindre coût et surtout la disponibilité de la source d'énergie.

Notre travail a pour but l'étude de l'influence des paramètres internes et externes sur le fonctionnement d'un distillateur solaire afin d'optimiser ces paramètres et améliorer ainsi sa production et ses performances.

Le système d'équations gouvernant le fonctionnement du distillateur en régime transitoire a été établi. Une simulation mathématique a permis d'obtenir des résultats qui montrent clairement l'effet des paramètres externes et internes notamment, l'irradiation solaire incidente qui reste le facteur le plus influant sur le comportement du distillateur, ainsi que la vitesse du vent et la température ambiante, sur la production et la performance du distillateur solaire. Il apparaît en outre que les paramètres thermophysiques et de construction jouent également un rôle très important dans l'amélioration du rendement du distillateur, une bonne optimisation de ces derniers permet d'augmenter le rendement et l'efficacité du distillateur de façon considérable.

Mots clés: Distillation solaire, Régime transitoire, Production, Performance, Rendement.



**Listes des abréviations et symboles**

Abréviation/ symbole	Titre	Page
MED	distillation à multiples effets	16
MSF	Multi stage flash	16
$\eta_g$	L'efficacité globale	27
$Q_{evp}$	Flux massique d'évaporation d'eau	27
$m_d$	Débit massique de distillat	27
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation	27
$G$	Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface	27
$\eta_i$		27
$\tau_v$	Coefficient de transmission de la vitre	27
$\tau_e$	Coefficient de transmission de l'eau	27
$\alpha_e$	Coefficient d'absorption de l'eau	27
$\alpha_t$	Coefficient d'absorption du fond du distillateur	27
$\alpha_f$	Coefficient d'absorption fictif du distillateur	27
F.P.B	facteurs de performance brut	27
F.B.H	facteurs de performance horaire	27
$\eta$	Rendement	28
Tfond-sol	Température du fond de la solution	30
Tsurf-sol	Température du surface de la solution	30
Tvint	Température du vitre interne	30
Tvext	Température du vitre externe	30
Tamb	Température ambiante	30
Humid	Humidité	32
Ref- Eolien	Refroidissement éolien	32
V-vent	Vitesse du vent	32
P-rosée	Point de rosée	32
C-nuag	Couverture nuageuse	32
P	pression	32
$\chi_D$	Conductivité électrique	32
$V_D$	Volume de distillat	32
P.H	Production horaire	32

Liste des figures

Chapitre I

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Cycle de vie du soleil	4
Figure I.2	Transformation de l'hydrogène en hélium	6
Figure I.3	Spectre des ondes électromagnétiques	7
Figure.I.4	Spectre de la radiation solaire	7
Figure I.5	Variation du rayonnement solaire à la surface de la terre	9
Figure I.6	Niveaux d'insolations dans différentes régions du monde	10
Figure I.7	Centrales thermiques	11

Chapitre II

Figure	Titre	Page
Figure II.1	Principe de distillation à simple effet.	15
Figure II.2	Procédé de dessalement par distillation à multiples effets (MED)	16
Figure II.3	Distillateur à Multi stage flash	17
Figure II.4	Distillateur à compression de la vapeur	18
Figure II.5	Principe de la distillation solaire	19
Figure II.6	Distillateur solaire plan à effet de serre simple	20
Figure II.7	Distillateur solaire à double pente	21
Figure II.8	Distillateur solaire sphérique	21
Figure II.9	Schéma d'un distillateur à cascade	22
Figure II.10	Distillateur solaire à mèche	23
Figure II.11	Distillateur solaire verticale	23
Figure II.12	Distillateur solaire à effet de serre multiple	24
Figure II.13	Distillateur solaire à film capillaire	25

Chapitre III

Figure	Titre	Page
Figure III.1	Schéma du distillateur solaire	30
Figure III.2	Evolution des températures des différents endroits du distillateur solaire	31
Figure III.3	Evolution du volume de distillat en fonction du temps à différentes hauteurs de solutions aux concentrations 1 mg/L (a), 5 mg/L (b) 10 mg/L (c) et 20 mg/L (d).	33
Figure III.4	Evolution de la production horaire du distillat au cours du temps à différentes hauteurs de solutions aux concentrations 1 mg/L (a), 5 mg/L (b) 10 mg/L (c) et 20 mg/L (d).	34
Figure III.5	Evolution du volume de distillat en fonction du temps.	35
Figure III.6	Evolution de la production horaire du distillat en fonction du temps.	35
Figure III.7	Evolution de la température de la vitre externe et le volume du distillat au cours du temps	36
Figure III.8	Evolution de la température de la vitre externe et la production horaire du distillat au cours du temps	37
Figure III.9	Effet de la vitesse du vent sur le volume du distillat	38
Figure III.10	Effet de la couverture nuageuse sur le volume du distillat	38
Figure III.11	Evolution du volume et de la conductivité électrique du distillat au cours du temps	39
Figure III.12	Evolution de la concentration en Cl <sup>-</sup> et pH du distillat au cours temps	40

**Liste des tableaux**

Chapitre I

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Caractéristiques du soleil	5
Tableau I.2	Composition de la photosphère (pourcentage en masse)	6

Chapitre III

Tableau	Titre	Page
Tableau III.1	Conditions météorologiques et paramètres physiques du distillat	32

# *Sommaire*

## Sommaire

<i>Introduction</i> .....	<i>1</i>
<i>Chapitre I: Généralités sur le soleil et l'énergie solaire</i> .....	<i>3</i>
I.1. Introduction.....	4
I.2. Le soleil.....	4
I.3. Voyage du photon ou de l'énergie solaire du soleil à la terre .....	8
I.4. Énergie solaire et ses différentes transformations .....	10
I.4.1 Énergie solaire passive.....	10
I.4.2 Énergie solaire active .....	10
I.5. Énergie solaire photo thermique et ses différentes applications.....	11
<i>Chapitre II: Aperçu bibliographique sur les distillateurs solaires</i> .....	<i>13</i>
II.1. Introduction .....	14
II.2. Historique.....	14
II.3. Procédés de distillation.....	14
II.3.1. Principe de la distillation .....	14
II.3.2. Distillation à simple effet.....	15
II.3.3. Distillation à multiples effets .....	15
II.3.4. Distillation à détente successive ou Multi stage flash(MSF) .....	16
II.3.5. Distillation par compression de la vapeur.....	17
II.4. Distillation solaire.....	18
II.4.1. Historique.....	18
II.4.2. Définition .....	19
II.4.3. Différents types de distillateur solaire .....	19
II.4.3.1. Distillateur solaire à effet de serre .....	19
II.4.3.2. Distillateur solaire sphérique.....	21
II.4.3.3. Distillateur solaire à cascade .....	22
II.4.3.4. Distillateur solaire à mèche.....	22
II.4.3.5. Distillateur solaire vertical.....	23
II.4.3.6. Distillateur solaire à effets multiples.....	24
II.4.3.7. Distillateur solaire incliné à film capillaire .....	24
II.4.4. Paramètres et caractéristiques des distillateurs .....	25
II.4.4.1. Paramètres externes .....	25

II.4.4.2. Paramètres internes.....	25
a) Paramètres géométriques .....	25
b) Paramètres de fonctionnement .....	25
c) Eléments de conception.....	25
II.4.5. Caractéristiques et performances des distillateurs .....	26
II.4.5.1. Efficacité globale.....	26
II.4.5.2. Efficacité interne.....	27
II.4.5.3. Performance .....	27
II.4.5.4. Rendement.....	27
II.4.6. Facteurs réduisant l'optimisation de l'activité du distillateur solaire.....	28
<i>Chapitre III : Résultats et discussion .....</i>	<i>29</i>
III.1. Conception et réalisation du distillateur.....	30
III.1.1. Caractéristiques du distillateur .....	30
III.1.2. Principe de fonctionnement .....	30
III.2. Paramètres météorologiques et grandeurs physiques relatives au distillateur .....	31
III.3. Effet de la hauteur de la solution de NaCl dans le plateau sur le volume et la production horaire du distillat.....	33
III.4.Effet de la concentration de la solution à distiller sur le volume du distillat et la production horaire .....	34
III.5. Effet des paramètres météorologiques sur le volume et la production horaire du distillat.....	36
III.5.1 Température de la vitre externe .....	36
III.5.2. Vitesse du vent.....	37
III.5.3. Couverture nuageuse .....	38
III.6. Qualité de l'eau distillée obtenue.....	39
<i>Conclusion .....</i>	<i>42</i>
<i>Références.....</i>	<i>45</i>

# *Introduction*

## Introduction

La multiplication et l'aggravation des états de carence en eau sont en train de prendre mondialement une dimension du premier ordre. Le niveau des nappes phréatiques est en baisse et menace 1.5 milliards d'habitants sur la planète. Il n'est donc pas exclu que l'eau est amenée à devenir un enjeu stratégique international, pouvant engendrer de graves conflits régionaux. En Algérie, à la fin du siècle passé, le déficit inquiétant de cet or bleu a été confirmé par les diverses expertises, il a été conclu que notre pays, entre 2010 et 2025 sera confronté à cette pénurie quasi-endémique.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau, l'Algérie a suivi une planification des ressources en eau conventionnelles et même l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.

Néanmoins, le dessalement nécessite une grande quantité d'énergie dont le coût devient de plus en plus cher. Il paraît à priori intéressant d'envisager l'utilisation de l'énergie solaire (distillation solaire) dans le processus de dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres, non plus comme un vecteur écologique, mais aussi comme une réelle alternative aux ressources énergétiques.

Dans ce sens, plusieurs études ont été consacrées à la distillation solaire et ayant surtout pour but l'amélioration des performances de différents distillateurs, c'est-à-dire augmenter la quantité d'eau produite par unité de surface et par jour. Cette quantité varie avec la géométrie du distillateur, l'ensoleillement et les conditions externes ou paramètres météorologiques. Une fois le distillateur est construit et installé, sa géométrie étant fixée, ses performances doivent donc être seulement en fonction de l'ensoleillement et des conditions ambiantes.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet des paramètres internes et externes sur le fonctionnement d'un distillateur solaire conçu et réalisé dans le *''Laboratoire de Développement des Structures et Applications des Matériaux Moléculaires (SEA2M)''* Faculté des Sciences et Technologie, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.

Le présent travail comporte trois chapitres, *Le premier chapitre* présente des généralités sur le soleil et l'énergie solaire (différentes transformations); suivi par une définition d'énergie solaire photo-thermique appliquée dans le dessalement ou la distillation des eaux usées ou saumâtres.



*Le deuxième chapitre* expose une brève étude générale sur la distillation solaire pour avoir une idée claire sur ce domaine. Ce chapitre décrit les caractéristiques et le principe de fonctionnement des différents types de distillateurs.

*Le troisième chapitre* englobe les différents résultats obtenus et leurs interprétations au cours du fonctionnement de ce distillateur.

*Chapitre I*  
*Généralités sur le soleil*  
*et l'énergie solaire*

## I.1. Introduction

Cette étude a pour but d'analyser une option de l'énergie solaire qui est la distillation solaire (c.à.d. la production d'eau potable à partir d'une eau salée ou usée en utilisant l'énergie provenant du soleil). Pour cela, seront traités dans ce chapitre tous les éléments essentiels qui entrent dans la distillation solaire.

## I.2. Le soleil

Le soleil est la source de la majorité des énergies qui existent sur terre telles que les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), l'énergie hydro-électrique, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, énergie thermique des mers,...), la biomasse et plantes végétales (photosynthèse). En d'autres termes, sans soleil, il n'y'aurait pas de vie sur terre.

Le soleil, une des innombrables étoiles de notre galaxie est né il y'a 4,6 milliards d'années dont le cycle de vie est donné par la figure 1.

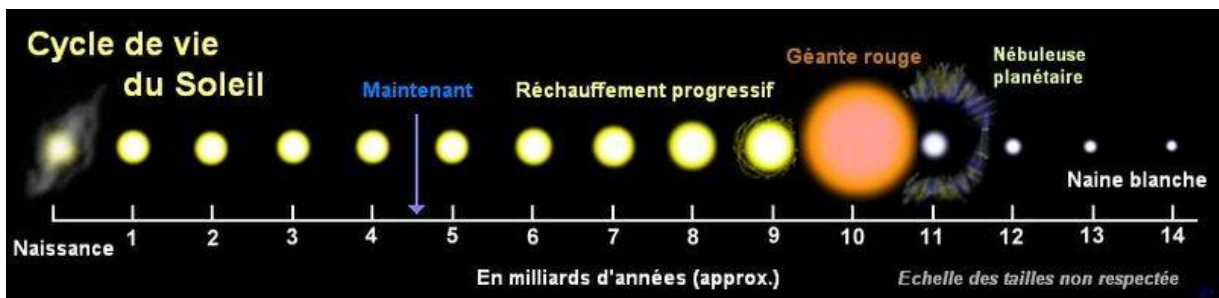


Figure I.1: Cycle de vie du soleil

Le soleil est une source immense d'énergie dont le cœur transforme chaque seconde plus de 4 millions de tonnes de matière en énergie. Certaines de ses caractéristiques sont citées dans le tableau 1.

Tableau I.1:Caractéristiques du soleil [1]

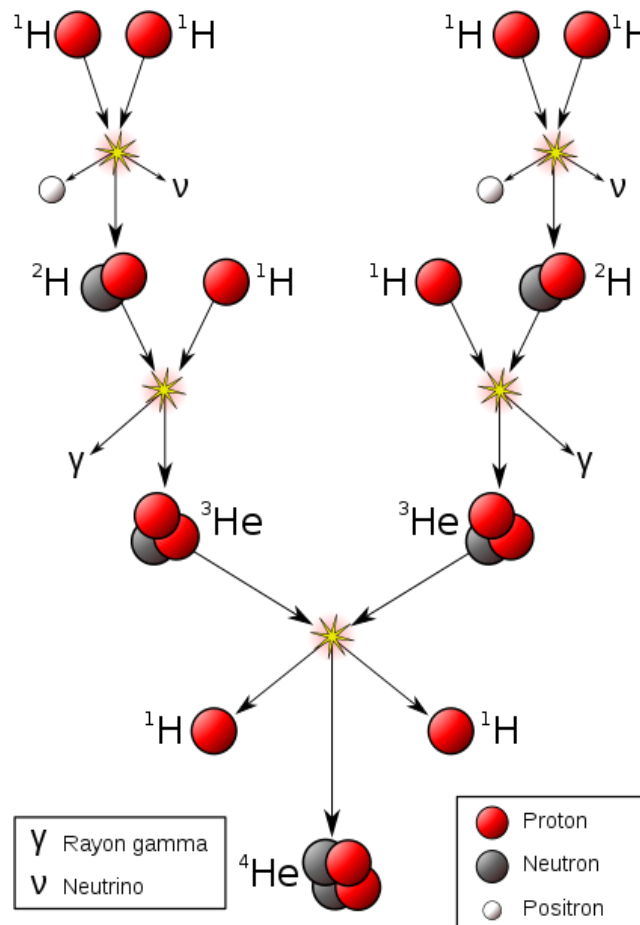
<b>Soleil</b>	
Demi-grand axe de l'orbite de la Terre (1ua)	149 597 870 km
Magnitude apparente	-26,8
Magnitude absolue	4,83
<b>Caractéristiques orbitales</b>	
Distance du centre de la voie lactée	$2,50 \times 10^{17}$ km (8 700 pc)
Période galactique	$2,26 \times 10^8$ années
Vitesse	217 km/s
<b>Caractéristiques physiques</b>	
Diamètre moyen	1 392 000 km
Aplatissement aux pôles	$9 \times 10^{-6}$
Surface	$6,09 \times 10^{12}$ km <sup>2</sup>
Volume	$1,41 \times 10^{18}$ km <sup>3</sup>
Masse ( $M_{\odot}$ )	$1,9891 \times 10^{30}$ kg
<b>Masse volumique</b>	
Moyenne	$1 408 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Au centre	$150 000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Gravité à la surface	$273,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Vitesse de libération	617,54 km/s
<b>Température</b>	
Au centre	15,1 MK
A la surface	5750 K
Couronne	5 MK
Flux énergétique	$3,826 \times 10^{26}$ W
Type spectral	G2 - V
<b>Rotation</b>	
Inclinaison de l'axe écliptique	7,25°
Inclinaison de l'axe plan Galaxie	67,23°
Vitesse, latitude 0 °	$7 008,17 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
<b>Période de rotation</b>	
Latitude 0 °	24 j
Latitude 30 °	28 j
Latitude 60 °	30,5 j
Latitude 75 °	31,5 j
Moyenne	27,28 j

**Tableau I.2 :** Composition de la photosphère (pourcentage en masse)

Elément chimique	H	He	O	C	Fe	Ne	N	Si	Mg	S
Composition (%)	73,46	24,85	0,77	0,29	0,16	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04

En effet, l'énergie du soleil provient des réactions nucléaires qui se produisent dans son noyau et qui transforment quatre atomes d'hydrogène en un atome d'hélium. Environ 3,41038 protons (noyaux d'hydrogène) sont convertis en hélium chaque seconde produisant une énergie de 383 1024 joules par seconde.

Ce processus nucléaire montré dans la figure 15 par la chaîne proton-proton, crée donc une immense chaleur qui cause la décharge des photons à partir des atomes.



**Figure I.2:** Transformation de l'hydrogène en hélium [1]

Le photon est une particule élémentaire qui a les propriétés d'ondes et de particules. Il compose les ondes électromagnétiques, des ondes radios aux rayons gamma, en passant par la lumière visible (cf. figures I.3 et I.4).

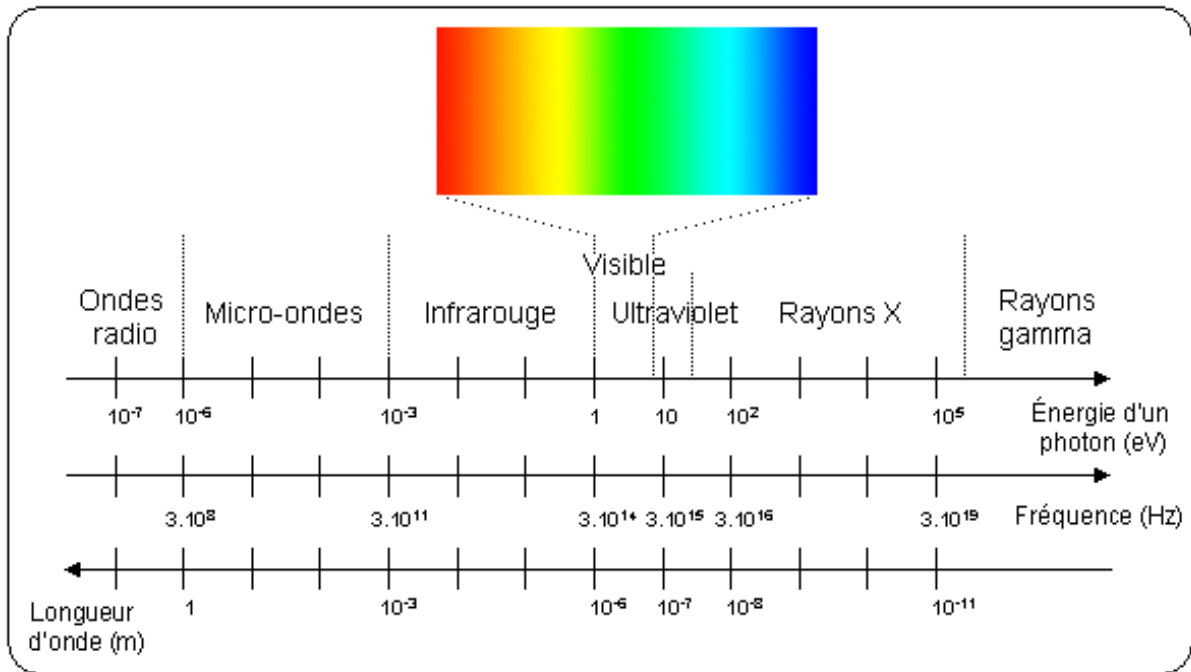


Figure I.3: Spectre des ondes électromagnétiques [2]

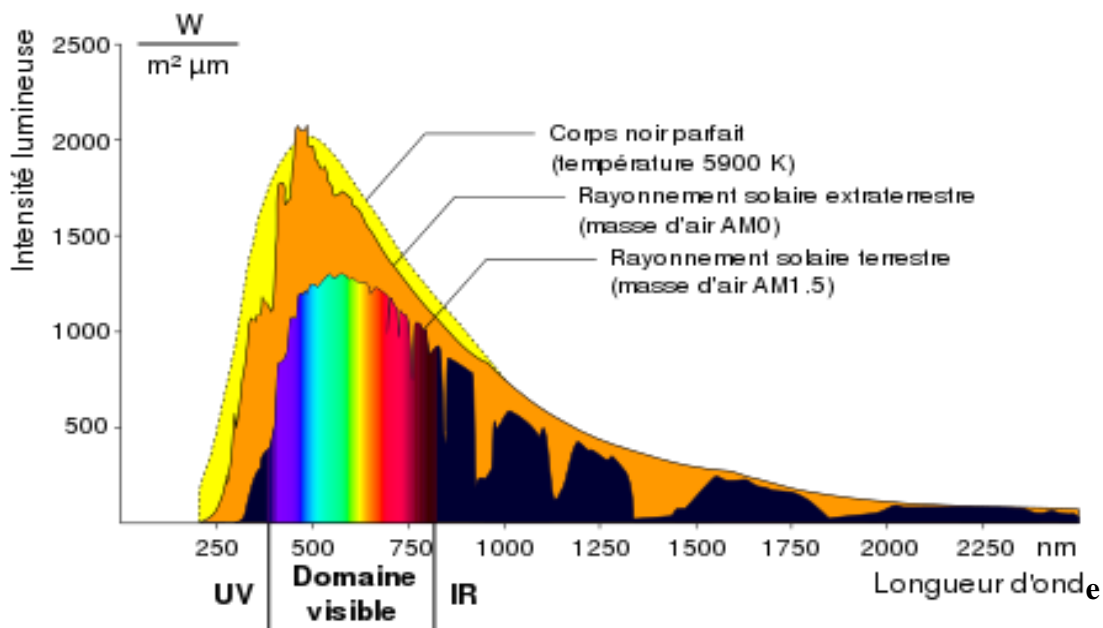


Figure I.4: Spectre de la radiation solaire [1]

### I.3. Voyage du photon ou de l'énergie solaire du soleil vers la terre

Chaque photon créé à l'intérieur du cœur du soleil ( $T^\circ$  de 15 millions  $^\circ\text{K}$ ) traverse une distance de  $0,1\mu\text{m}$  avant d'être absorbé par une couche adjacente de gaz moléculaire. Cette absorption va causer le réchauffement de l'atome environnant et va réémettre un autre photon qui va se déplacer encore sur une petite distance avant d'être absorbé par un autre atome. Ce processus qui se produit dans la zone de radiation (entre 0,25 et 0,7 du rayon solaire) se répète plusieurs fois avant que le photon n'arrive à la zone de convection (entre 0,7 du rayon solaire et la surface).

La zone de convection est séparée de la zone radiative par une couche épaisse appelée tachocline d'environ 3000 km qui pourrait être le siège de puissants champs magnétiques. Enfin le photon arrive à la surface du soleil ( $T^\circ$  de  $5800^\circ\text{K}$ ) d'où il est émis vers l'espace extérieur. La durée approximative du voyage du photon du cœur à la surface du soleil est de 100.000 ans ou 1025 absorptions et réémissions [3].

A partir de la surface du soleil, les photons vont continuer à voyager en traversant la photosphère, la partie externe du soleil d'épaisseur d'environ 400 km. La photosphère est l'endroit où la lumière visible est produite. Cette lumière contient toutes les informations sur la température, la gravité de la surface et la composition chimique du soleil.

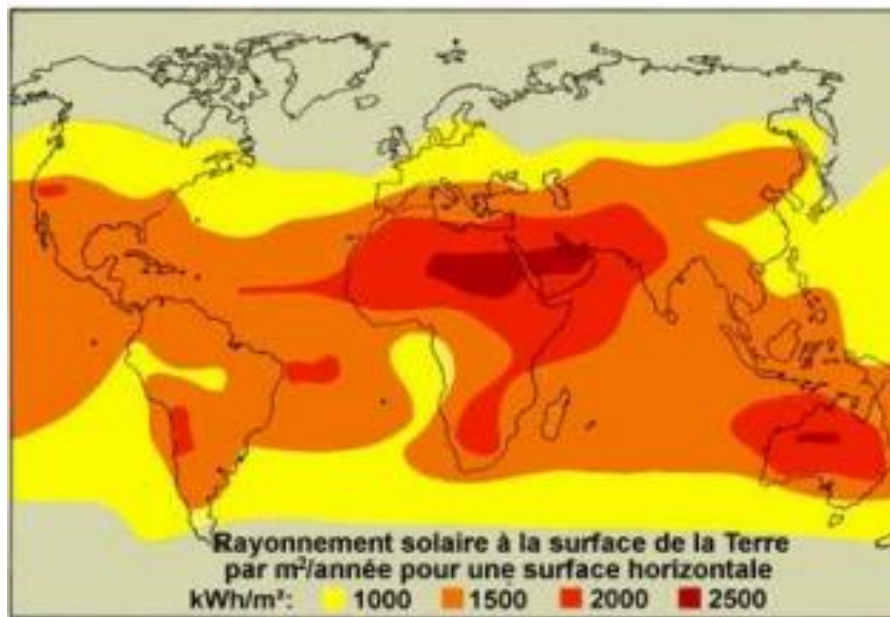
De là, les photons (la lumière visible) vont traverser l'atmosphère solaire qui est composé de trois principales zones:

- La chromosphère: 2000 km d'épaisseur et une température maximale de  $100.000^\circ\text{K}$ .
- La couronne: température de l'ordre du million  $^\circ\text{K}$ .
- L'héliosphère: débutant à environ 20 rayons solaire jusqu'aux confins du système solaire.

La chromosphère est séparée de la photosphère par la zone de température minimum ( $4000^\circ\text{K}$ ) et de la couronne par une zone de transition (élévation rapide de température jusqu'à 1 millions  $^\circ\text{K}$ ).

Après avoir traversé toute cette distance (149.600.000 km), les photons qui transportent l'énergie du soleil arrivent après 8 minutes à la surface extérieure de la terre avec seulement la moitié du milliardième de l'énergie produite par celui-ci. Pour pouvoir quantifier cette énergie, on définit la radiation solaire comme étant l'énergie du rayonnement électromagnétique émise par le soleil à travers toutes les longueurs d'ondes qui tombent chaque seconde sur une surface d' $1\text{ m}^2$  à l'extérieur de l'atmosphère terrestre. Cette quantité d'énergie est connue sous le nom de la constante solaire et est égale approximativement à  $1367,7\text{w}/\text{m}^2$ . De là, l'atmosphère terrestre va filtrer les différents rayonnements et ainsi, seuls

les rayons ultraviolets UVA et UVB, la lumière visible, les rayons infrarouges et les ondes radios atteignent la surface du globe (voir Figure.I.5).



**Figure I.5:** Variation du rayonnement solaire à la surface de la terre [4]

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère en étant relativement peu absorbé et remarquablement diffus. La quantité d'énergie solaire réfléchiée ou absorbée par l'atmosphère, les nuages et les mers est de l'ordre de 368 watts [1], laissant seulement une énergie d'à peu près un kilowatt par  $m^2$  de surface touchant le sol. Cette énergie est connue sous le nom d'insolation (voir Figure I.6).

La partie de la radiation solaire incidente qui est réfléchiée à la surface de la terre (eau, glace, neige, etc...) est appelée Albédo. Pour déterminer la radiation solaire qui touche un endroit spécifique, on considère l'énergie solaire directe qui est perpendiculaire à la surface et l'énergie solaire indirecte ou insolation diffuse qui arrive à la surface du sol à différents angles par la lumière réfléchiée par d'autres surfaces et molécules d'air. D'une manière générale, en une année et selon les régions, l'insolation directe représente les 2/3 de l'insolation totale. L'intensité de l'insolation touchant une surface pendant une période de temps dépend de la latitude, le climat, la saison de l'année et la période du jour. La figure I.5 montre les différents niveaux d'insolation dans différentes régions du monde [1].

Cette énergie qui est arrivée à la surface n'est pas directement mesurable sous sa forme rayonnante, il faut donc la transformer.



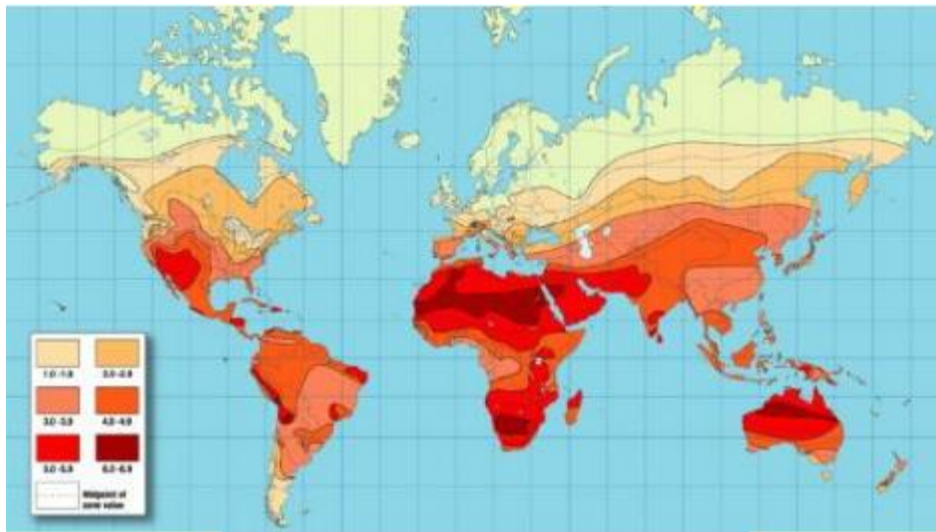


Figure I.6: Niveaux d'insolations dans différentes régions du monde [1]

#### I.4. Energie solaire et ses différentes transformations

L'énergie solaire est la source de toutes les énergies sur terre à l'exception de l'énergie nucléaire, la géothermie et de l'énergie marémotrice. C'est elle qui est à l'origine du cycle de l'eau, des vents et de la photosynthèse. Pour ses besoins vitaux, l'homme utilise cette énergie directement ou il la transforme en d'autres formes d'énergie telles que l'énergie alimentaire, l'énergie thermique, l'électricité ou la biomasse. Il existe deux types d'énergie solaire passive et active:

##### I.4.1 Energie solaire passive

C'est une énergie disponible et non polluante. Elle est utilisée directement sous forme de chaleur ou pour éclairage lorsque la lumière du soleil pénètre à l'intérieur des maisons par les fenêtres et absorbée par les murs, planchées, meubles etc...

##### I.4.2 Energie solaire active

On l'utilise après la transformation de l'énergie solaire. Il existe trois options de l'énergie solaire active:

- *L'énergie solaire thermique*: En utilisant l'effet ondulatoire des photons, les capteurs solaires photo-thermiques transforment le rayonnement solaire en chaleur.
- *L'énergie solaire photovoltaïque*: En utilisant l'effet corpusculaire des photons, la lumière du soleil excite les électrons des matériaux semi-conducteurs qui composent la cellule photo- voltaïque tels que le silicium pour produire de l'électricité.
- *L'énergie solaire Thermodynamique (ou mécanique)*: Elle concerne les appareils qui

transforment un rayonnement (ou une chaleur) solaire directement en énergie mécanique ou électrique. Le solaire mécanique est une technique très particulière, car chaque moteur solaire a des caractéristiques singulières. Il est donc très difficile, contrairement aux deux autres utilisations solaires, de présenter un principe de fonctionnement. Les moteurs solaires ont un seul point commun: La concentration de l'énergie solaire via des concentrateurs solaires (héliostats, miroirs, etc....) (voir Figure I.7).



Figure I.7: Centrales thermiques [5]

### I.5. Energie solaire photo-thermique et ses différentes applications

Comme cela a été défini plus haut, l'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs solaires photo-thermiques. Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à redistribuer cette énergie selon son application, soit par le biais d'un fluide caloporteur (eau, liquide antigel ou air), soit par l'absorbeur directement.

Le capteur solaire thermique se compose en général d'un absorbeur (bon conducteur de chaleur) peint en noir (pour augmenter l'absorption de l'énergie solaire) placé dans un coffrage isolé thermiquement (pour diminuer les pertes de chaleur) en face arrière et recouvert d'un vitrage en face avant pour créer un effet de serre qui fait augmenter son rendement. C'est à la surface de l'absorbeur que le rayonnement solaire se convertit en chaleur.

Parmi les applications de l'énergie solaire thermique, on peut citer:

- La production d'eau chaude: chauffe-eau solaire
- Le chauffage des maisons: La maison solaire
- Le chauffage de l'eau des piscines

- Le séchage des récoltes: Le séchoir solaire
- La réfrigération par absorption: Le réfrigérateur solaire
- Le dessalement ou la distillation des eaux usées ou saumâtres: Le distillateur solaire
- Les étangs solaires pour produire de l'énergie
- La cuisson des aliments: La cuisson solaire, etc....

*Chapitre II*  
*Aperçu bibliographique*  
*sur les distillateurs solaires*

## II.1. Introduction

Les problèmes en relation avec l'eau sont nombreux et très divers. Il n'y a donc aucune solution simple permettant de répondre à sa demande dans n'importe quel pays.

Le dessalement de l'eau marine ou saumâtre est un processus qui permet d'extraire le sel pour la rendre potable ou l'utiliser pour l'irrigation.

## II.2. Historique

Dès le IV<sup>ème</sup> siècle avant JC, Aristote observe le principe de la distillation. Au XII<sup>ème</sup> siècle, Abélard de Bath décrit deux expériences dans les questions naturelles «au soleil, après l'évaporation sur une roche, l'eau de mer se transforme en sel; lorsque le soleil fait défaut, on chauffe l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformer en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales».

Depuis les temps les plus anciens, les marins ont dessalé l'eau de mer à partir de simples bouilleurs sur leurs bateaux, mais l'utilisation à des fins industrielles est récente. Dans les années 60, les procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer. Par ailleurs, des recherches sont développées sur les procédés de dessalement.

## II.3. Procédés de distillation

Pour leur fonctionnement, les procédés à distillation nécessitent en grande partie de l'énergie thermique pour assurer le chauffage de l'eau salée. Pour l'eau de mer, de plus, cette énergie thermique doit être fournie à un niveau de température relativement faible, entre 60 et 120 °C suivant la technologie adoptée. La source de chaleur peut être fournie, dans le cas d'un couplage solaire, par des capteurs plans ou à concentration.

Les procédés les plus utilisés et qui sont susceptibles d'être couplés à une source d'énergie solaire sont [6]:

- Les procédés à distillation classique tel le procédé à Multi-stage flash, à compression de vapeur.
- La distillation solaire directe à effet de serre qui consiste en un procédé proprement solaire.

### II.3.1. Principe de la distillation

La distillation est un procédé de séparation des substances, mélangées sous forme liquide. Elle consiste à porter le mélange à ébullition et à recueillir une fraction légère appelée distillat, et une fraction lourde appelée résidu. C'est d'ailleurs ce procédé qui fait en sorte que le sel des mers ne s'évapore pas avec l'eau.

L'eau de mer chauffée émet une vapeur d'eau pure qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau douce. Ce principe de dessalement très simple est depuis des temps fort anciens[7].

### II.3.2. Distillation simple effet

Le distillateur à 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 simples bouilleurs à faisceau noyé. L'eau de mer est chauffée dans un récipient étanche par de la vapeur circulant dans un faisceau tubulaire plongé dans un récipient étanche par de la vapeur circulant dans un faisceau tubulaire plongé dans l'eau de mer qu'il porte à ébullition.

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 (voir figure II.1.), La température d'ébullition de l'eau peut être abaissée dans la mesure où l'on réduit la pression dans la chambre d'évaporation [8].

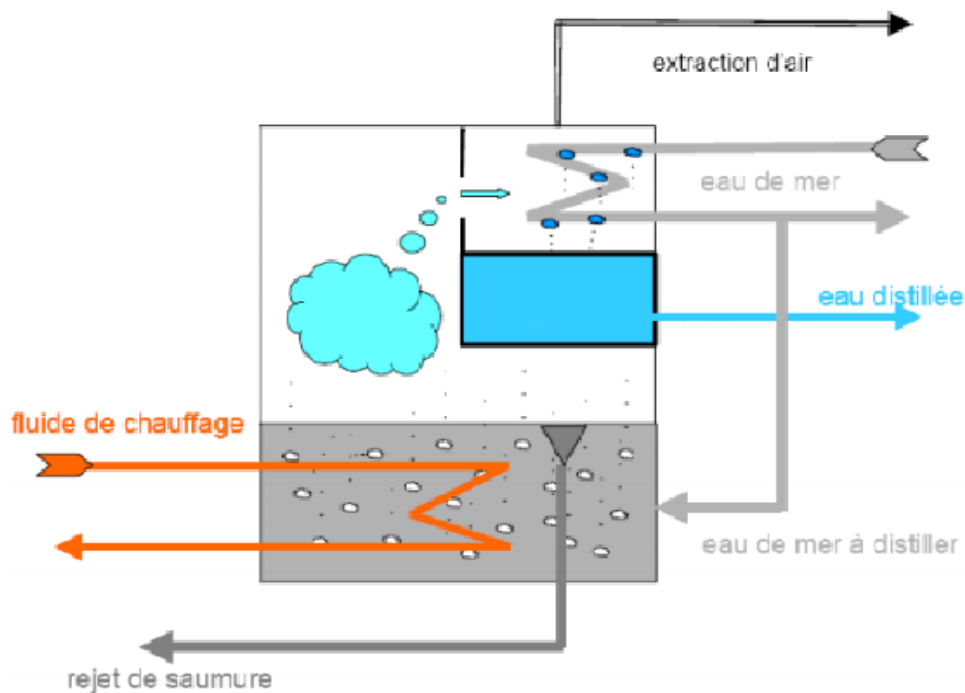


Figure II.1: Principe de distillation à simple effet.

### II.3.3. Distillation à multiples effets

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 [9].

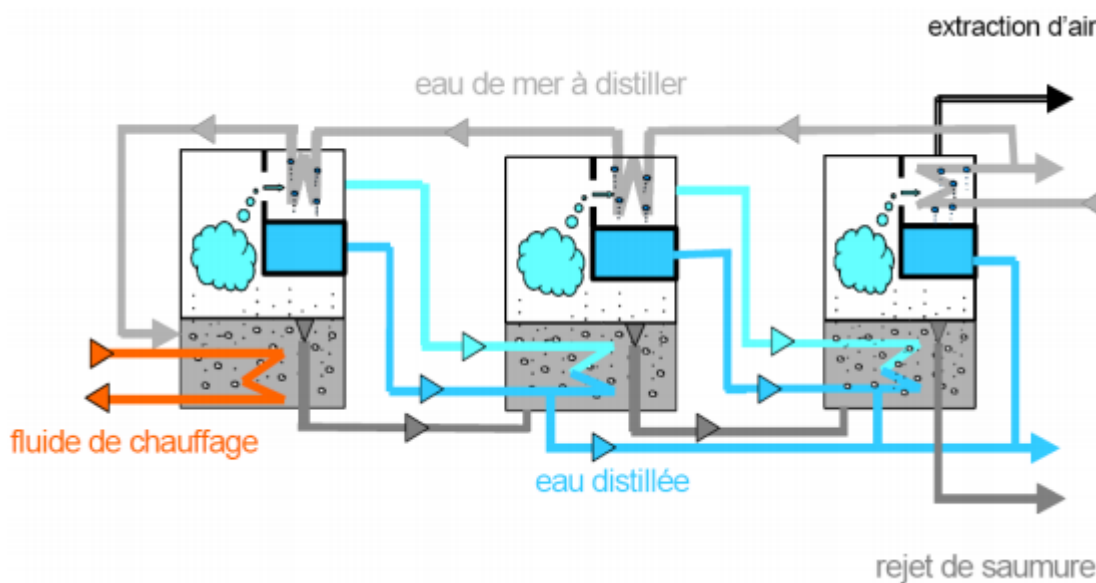


Figure II.2: Procédé de dessalement par distillation à multiples effets (MED)

### II.3.4. Distillation à détente successive ou multi stage flash (MSF)

La distillation Multi-Stage Flash est une autre méthode généralement utilisée pour le dessalement de l'eau. La pratique des performances maximales pour un ratio de MSF est de 5.17 Kg/MJ. Chaque étape d'une usine de MSF fonctionne progressivement à basse pression, que l'eau bouillie à plus faibles températures (voir figure II.3). Pour cette technique, l'alimentation en eau est chauffée à une pression suffisamment élevée pour empêcher l'ébullition, jusqu'à ce qu'elle atteigne

le premier "flash chambre." Dans la première chambre de flash, la pression est soudainement remise en liberté et l'évaporation ou «clignotant» a lieu. Ce clignotant d'une petite portion de l'aliment pour animaux continue à chaque étape, parce que la pression dans chacun d'eux est plus faible. Contrairement à l'effet de processus multiples, ce processus régénère et sa vapeur se condense dans le même effet (la scène). Ainsi, ce modèle offre l'avantage de la récupération de la chaleur. C'est l'alimentation en eau en passant par l'échangeur de chaleur dans la section supérieure de la chambre de flash. La vapeur est condensée au niveau de cet échangeur où elle rétrocède sa chaleur latente de vaporisation.

Deux sections distinctes de chaque étape sont les clignotants chambre (où les vapeurs sont produites) et la section de condensation (où les vapeurs sont condensées). La quantité d'eau doit être proportionnelle à la différence de température entre les étapes. Ainsi, plus la différence température, est grande plus la quantité de vapeur flashée augmente. Une fois que la vapeur est flashée, la température diminue jusqu'à ce qu'elle soit en équilibre thermodynamique avec la pression.

Comme la vapeur est produite, le concentré d'eau devient de plus en plus concentré. La section de condensation contient le tube échangeur de chaleur où les vapeurs sont condensés par un refroidisseur d'eau de mer ou d'eau d'alimentation [10].

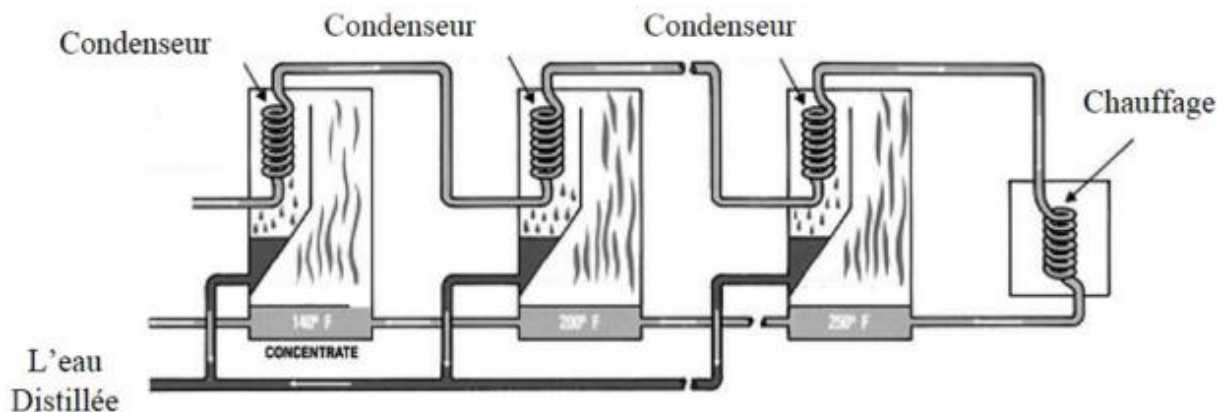


Figure II.3: Distillateur à Multi stage flash

### II.3.5. Distillation par compression de la vapeur

L'eau de mer est portée à ébullition dans une enceinte isolée, la vapeur est aspirée par un compresseur qui élève sa température et sa pression. Cette vapeur est envoyée dans un faisceau tubulaire en bas de l'enceinte, elle se condense en cédant sa chaleur à l'eau de mer qui est portée à ébullition [11]. Ce procédé fonctionne exactement sur le principe d'une pompe à chaleur, où c'est un compresseur qui fournit de l'énergie. La vapeur produite est comprimée adiabatiquement, ce qui accroît sa température de saturation. Lors de sa condensation, elle peut donc transmettre sa chaleur de vaporisation à l'eau salée avec un bon gradient thermique, ce qui permet un bon rendement. Le



compresseur assure une faible pression dans la cellule, permettant de fonctionner à une température réduite, d'environ 60°C et d'éviter ainsi l'entartrage. L'avantage du procédé est une faible consommation énergétique sous forme mécanique ou électrique (7 à 8 kWh/m<sup>3</sup>, pour des grandes installations). Toutefois la capacité des installations à compression de vapeur est limitée par la taille des compresseurs, elles s'étendent aujourd'hui, de 15 à plus de 3800 m<sup>3</sup>/j [12].

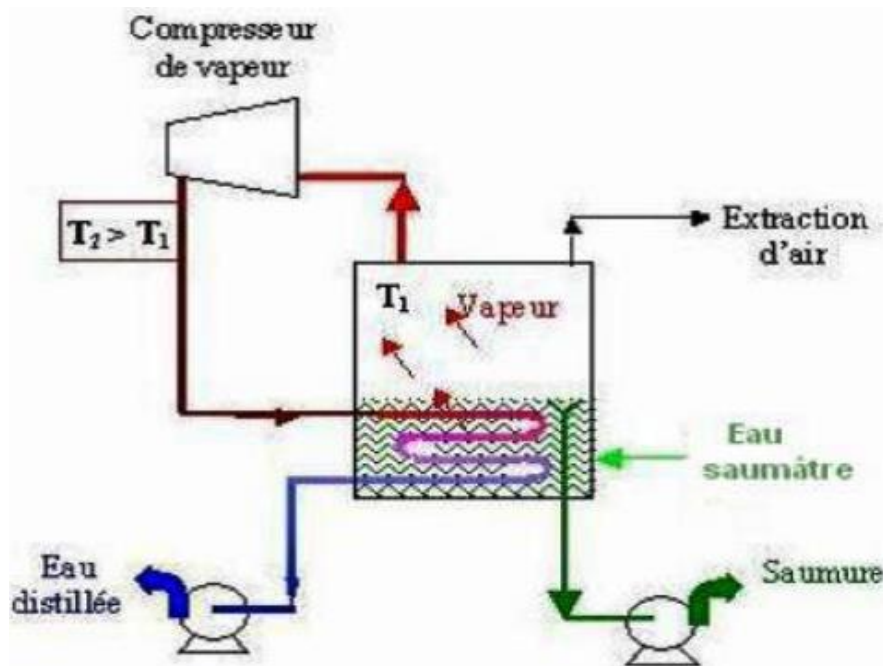


Figure II.4: Distillateur à compression de la vapeur

## II.4. Distillation solaire

### II.4.1. Historique

Depuis des siècles, l'eau de rivière fournissait directement l'eau dans le but d'être potable. Lorsqu'il n'y avait pas de rivière ni de lacs, les peuples utilisaient des techniques pour produire de l'eau Potable comme la distillation par l'énergie solaire.

Les systèmes de dessalement solaire ne datent pas d'aujourd'hui, ils sont connus pour la première fois au Chili depuis 1872 par l'ingénieur suédois CHARLES WILSON qui a construit le premier distillateur solaire, pour fournir de l'eau potable aux animaux à partir de l'eau salée de la mer. En 1920, KAUSH utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires. Au début des années 1930, 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.

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 2ème guerre mondiale. En 1969, COOPER proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur solaire type serre. Depuis les années 1970, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, parmi lesquels, nous pouvons, sans être exhaustif citer [13] :

- Le distillateur à effet multiple (Oltra, 1972 ; Bartali, 1976).
- Le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné (Akhmatova, 1978).
- Le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches (FRICK et SOMERFELD 1973).

#### II.4.2. Définition

La distillation solaire est l'une des techniques utilisées pour la production de l'eau potable à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer grâce à l'énergie solaire. Le principe de fonctionnement d'un distillateur solaire basé sur les différents types de transfert de chaleur.

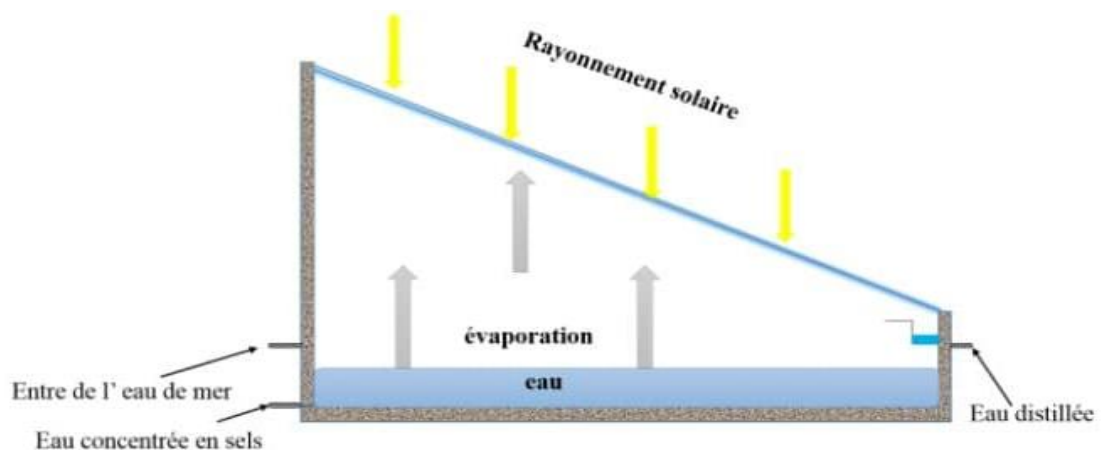


Figure II.5: Principe de la distillation solaire.

L'eau salée dans le bac va se chauffer et avec l'augmentation de température, une partie de l'eau s'évapore puis la vapeur d'eau se condense sur la surface intérieure de la vitre sous forme de gouttes d'eau qui s'acheminent dans le récupérateur de l'eau distillée (Figure II.5).

#### II.4.3. Différents types de distillateur solaire

##### II.4.3.1. Distillateur solaire à effet de serre

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires, les plus utilisés sont ceux du type à effet de serre, ils présentent l'avantage d'être simples, facile à réaliser et peu coûteux, mais ils présentent le

gros inconvénient d'une production très faible d'eau potable (de l'ordre de 2,5 à 3 litres par m<sup>2</sup> par jour) [14]. Dans ce type on peut distinguer des modèles de distillateurs plans à effet de serre:

- **Distillateur à pente unique**

Le distillateur solaire plan à simple pente est considéré comme le distillateur le plus simple et le plus reconnu dans le monde. Il est constitué d'un absorbeur sous forme de bassin horizontal, et rempli d'eau salée ou saumâtre et couvert d'une vitre transparente en verre, inclinée d'un certain angle pour être exposé au maximum de la radiation solaire et faciliter l'écoulement des gouttelettes vers une gouttière placée en bas de la vitre. L'eau condensée ensuite, est récupérée et stockée. Pour minimiser les pertes d'énergie un isolant thermique est utilisé en bas et aux cotés à l'extérieur de l'absorbeur (Figure II.6) [15].

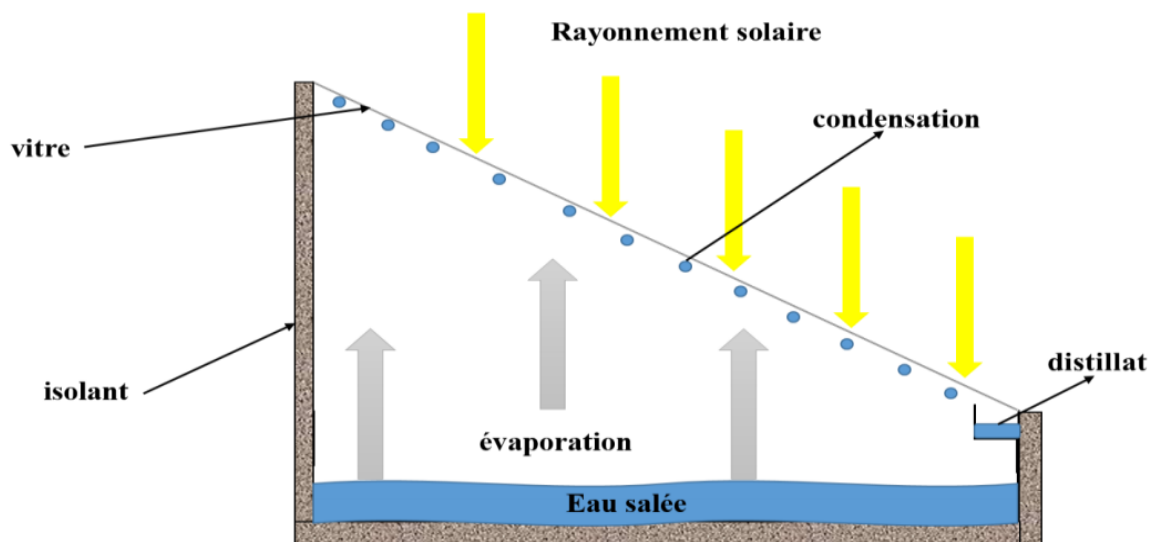


Figure II.6: Distillateur solaire plan à effet de serre simple

- **Distillateur à double pente**

Il a le même principe que le distillateur à simple pente mais il est composé de deux capteurs où chacun des deux est incliné d'un angle (Figure II.7). L'avantage du distillateur à double vitrage, est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation [16].

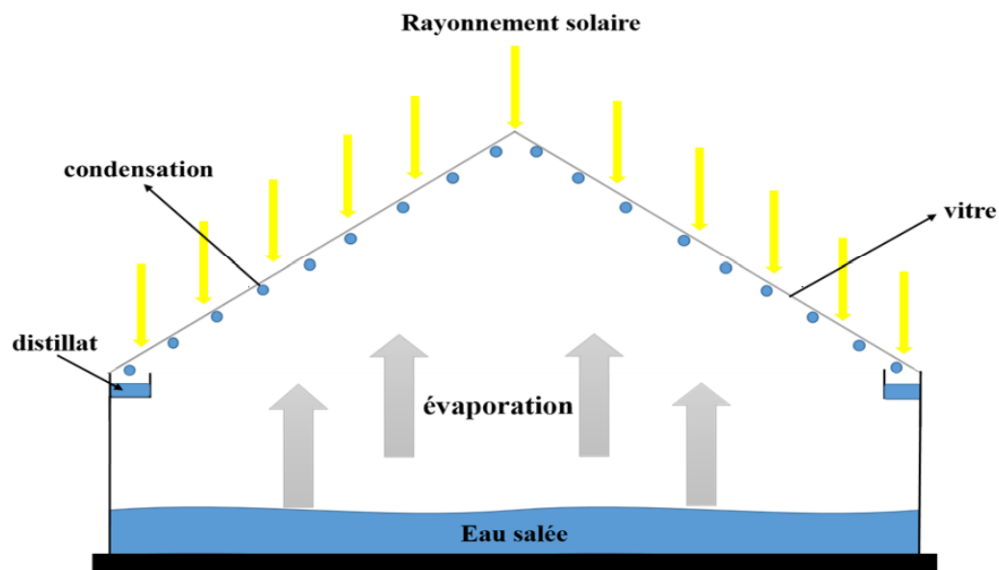


Figure II.7: Distillateur solaire à double pente

#### II.4.3.2. Distillateur solaire sphérique

C'est un distillateur en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposant sur des supports (Figure II.8), il est essentiellement constitué par trois parties, une demi sphère supérieure

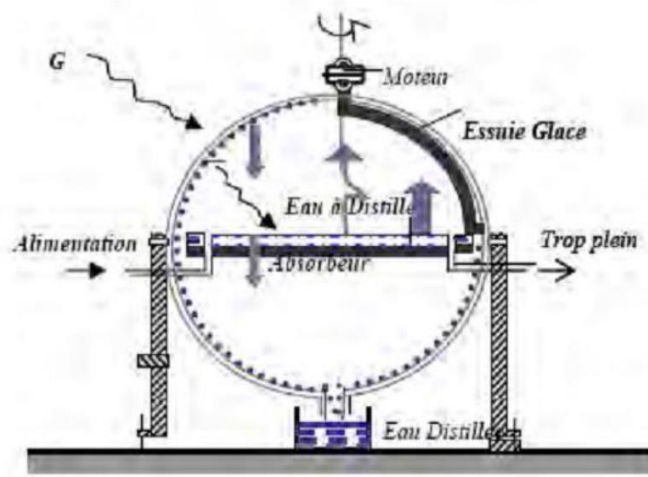


Figure II.8: Distillateur solaire sphérique [17].

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 [12].

### II.4.3.3. Distillateur solaire à cascade

Un distillateur solaire à cascades est constitué d'une bac étanche surmontée d'une vitre (figure II.9). 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 [18].

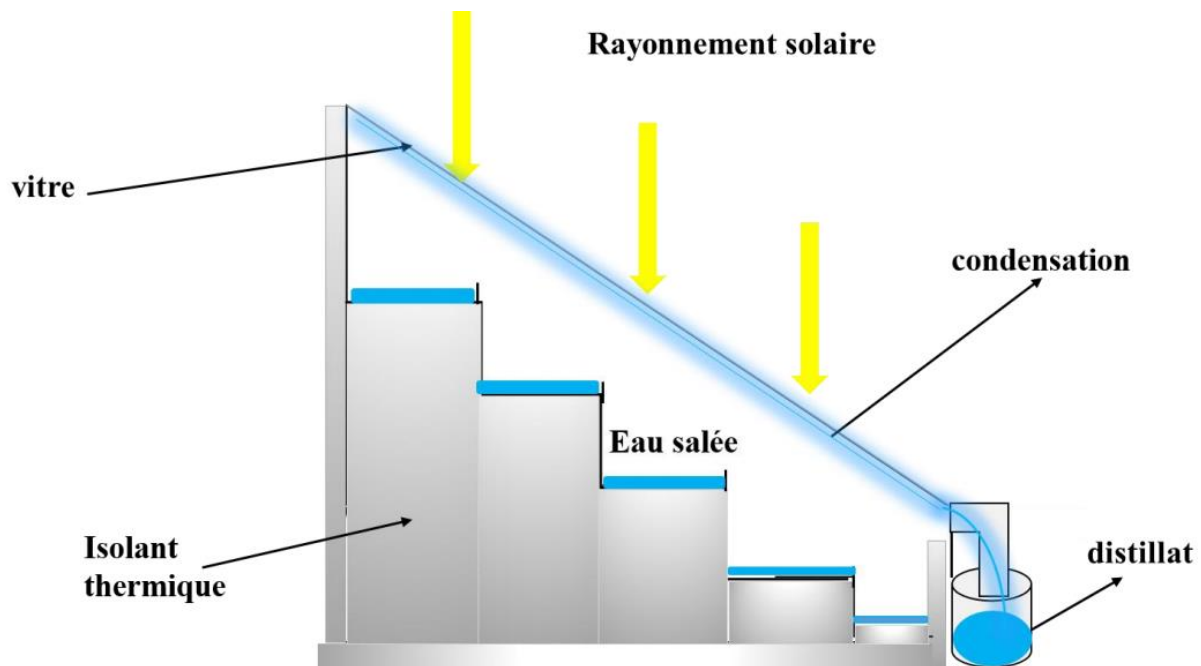


Figure II.9: Schéma d'un distillateur à cascade.

### II.4.3.4. Distillateur solaire à mèche

Dans ce type de distillateur l'eau saumâtre coule à travers une garniture poreuse, et absorbe le rayonnement, la mèche est inclinée d'une manière que l'eau d'alimentation en faible quantité est bien exposée au soleil avec un meilleur angle (Figure II.10). Elle s'échauffe rapidement à une température plus élevée. Ces distillateurs ont l'avantage que l'eau est bien exposée au soleil avec une grande surface efficace et une faible lame d'eau d'alimentation ce qui facilite son échauffement [19].

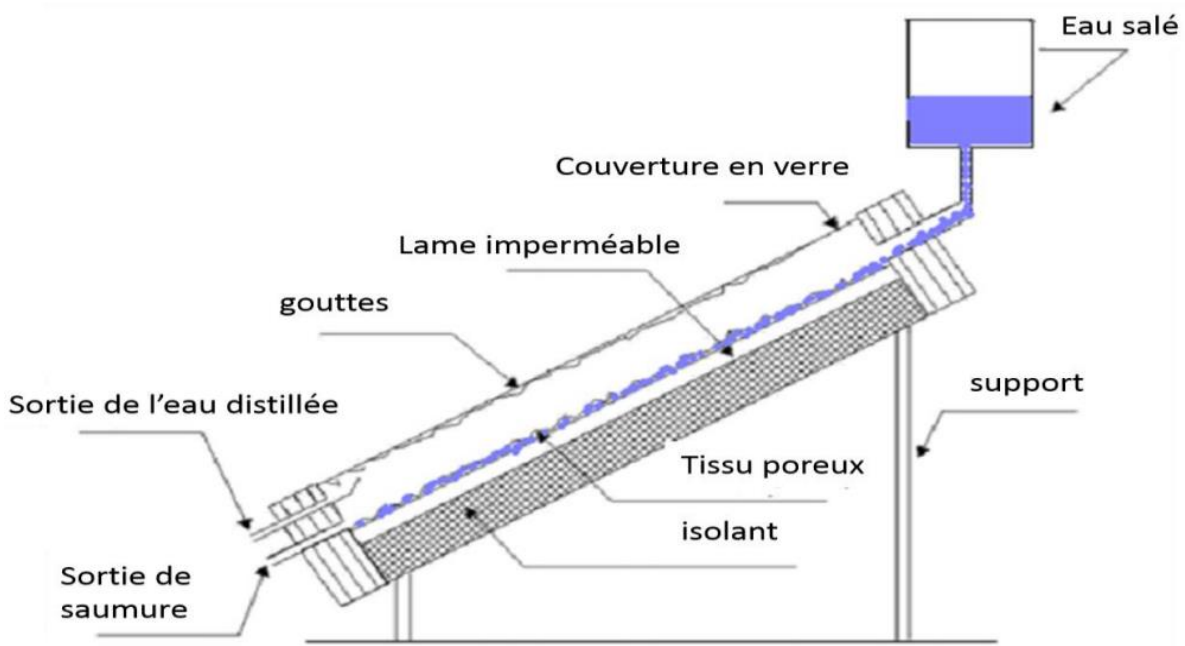


Figure II.10: Distillateur solaire à mèche [18].

#### II.4.3.5. Distillateur solaire vertical

La Figure II.11 présente le principe de fonctionnement du 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 régulée à l'aide d'une

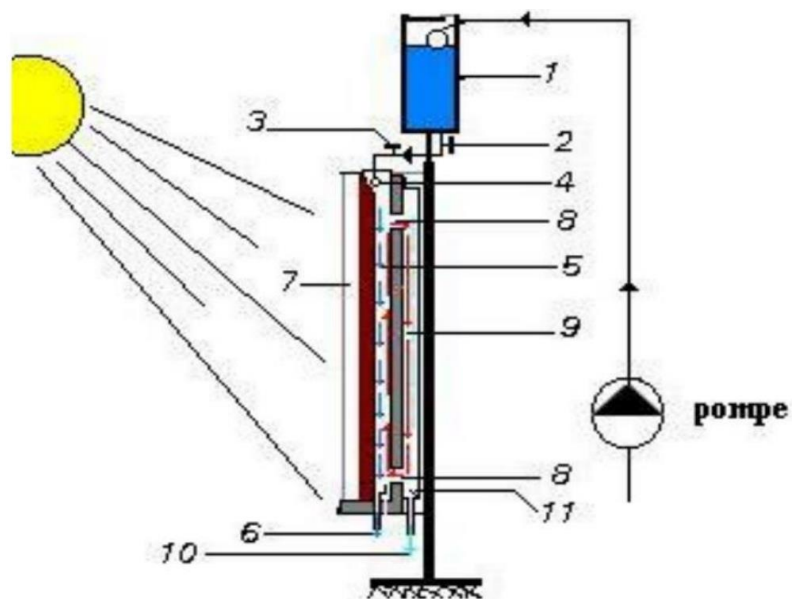


Figure II.11: Distillateur solaire verticale [20].

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 [18].

#### II.4.3.6. Distillateur solaire à effet multiples

Dans ce type de distillateurs, il existe plusieurs évaporateurs en série que l'on appelle effets (Figure II.12). L'eau évaporée du premier effet se condense au niveau du deuxième effet et l'énergie libérée par la condensation est consommée pour évaporer l'eau qui s'y trouve. Le troisième évaporateur, joue le rôle de condenseur pour les vapeurs issues du second effet et ainsi de suite. Cependant, plus l'écart de température est faible, plus la surface d'échange assurant le transfert d'énergie doit être grande. L'investissement est donc un peu plus important. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce) [21].

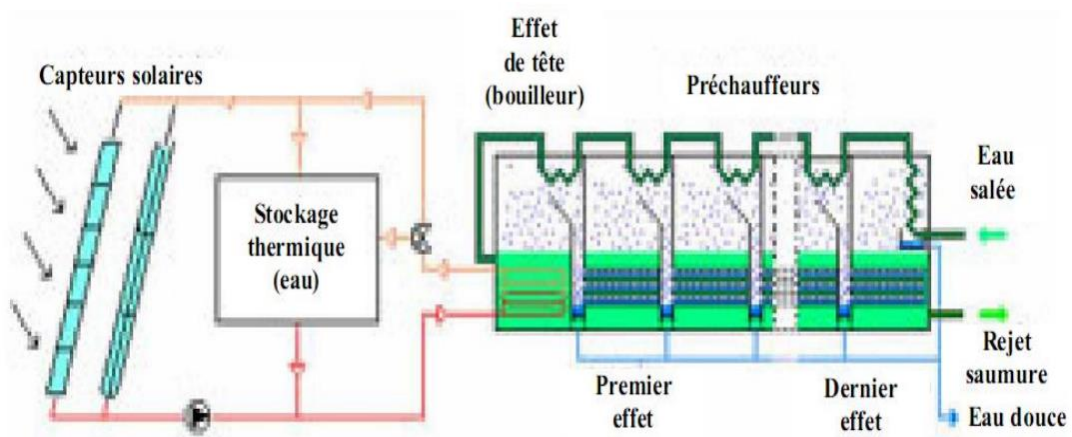


Figure II.12: Distillateur solaire à effet de serre multiple [13].

#### II.4.3.7. Distillateur solaire incliné à film capillaire

Le distillateur à film capillaire est une cellule parallélépipédique formée par deux plaques métalliques disposées face à face et inclinées d'un angle (Figure II.13). L'eau saumâtre à distiller s'écoule simultanément par capillarité et gravité sur un côté de la plaque métallique à l'aide d'un tissu. L'autre côté de la même plaque est peint en noire et exposé au rayonnement solaire. La

vapeur d'eau produite quitte le tissu et va se condenser au contact de l'autre qui se trouve juste en face [22].

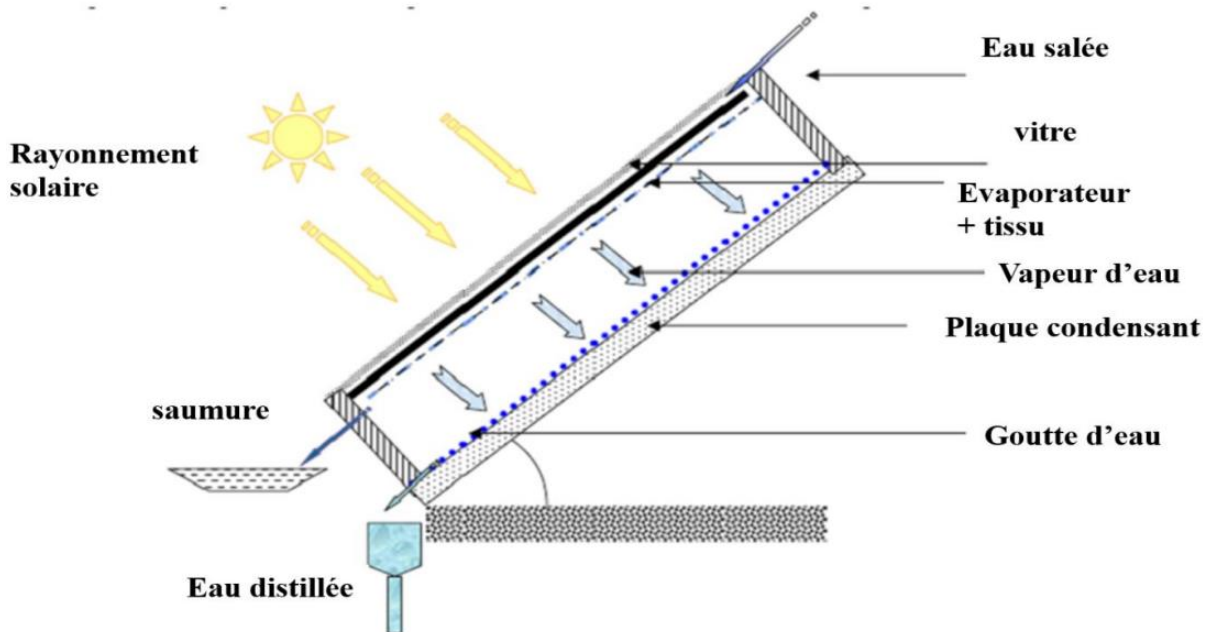


Figure II.13: Distillateur solaire à film capillaire [22].

#### II.4.4. Paramètres et caractéristiques des distillateurs

On peut classer les paramètres relatifs aux distillateurs de la façon suivante:

##### II.4.4.1. Paramètres externes

- Paramètres d'ensoleillement.
- Paramètres météorologiques (la vitesse du vent et ouverture nuageuse).

##### II.4.4.2. Paramètres internes

###### a) Paramètres géométriques

Deux nouvelles grandeurs sont introduites pour les distillateurs:

- Inclinaison de la vitre par rapport au plan horizontal.
- Hauteur du niveau de l'eau à distiller.

###### b) Paramètres de fonctionnement

Ces paramètres sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de l'eau à distiller.

###### c) Eléments de conception

Les éléments de conception sont les différents matériaux utilisés dans la réalisation des différents éléments du distillateur. Citons:



- **La couverture**

Elle doit être transparente, fabriquée en verre ou en plastique et inclinée par rapport à l'horizontale suivant la latitude de la région. Le plastique est préféré à cause de sa grande transmissivité pour la radiation solaire à haute température, faible transmissivité pour les radiations à basse température, sa haute humidification pour l'eau et la grande stabilité de ses propriétés physiques au cours du temps. Cependant, le verre a un grand inconvénient, c'est celui de son poids et de sa fragilité surtout lors du montage et le transport. Il a été conclu aussi que la couverture ne doit pas être loin de la solution salée.

- **L'absorbeur**

Il a pour rôle de transformer instantanément le rayonnement solaire qu'il reçoit en chaleur et de la transmettre par conduction à la solution salée. Un bon absorbeur doit avoir les propriétés et les qualités suivantes:

- \* Un facteur d'absorption voisin de l'unité,
- \* Une bonne conductivité thermique,
- \* Une bonne résistance chimique vis-à-vis de la solution qui le baigne,
- \* Imperméable,
- \* Supporter de grandes températures sans qu'il y ait des effets de détérioration.

- **L'isolation thermique**

Pour diminuer les pertes de chaleur au niveau de l'absorbeur et augmenter ainsi la température de la solution, la base et les côtés du distillateur solaire doivent être isolés thermiquement. Dans certains cas, la production annuelle en eau d'un distillateur solaire avec une isolation thermique est de 15% plus grande que celle d'un autre non isolé.

- **Le scellement**

Pour prévenir les pertes de vapeur de l'intérieur du distillateur vers l'extérieur, la couverture doit être bien scellée avec une colle transparente.

- **Les gouttières**

Les gouttières doivent être assez profondes pour diminuer les pertes du condensat par déversement et étroites pour minimiser l'ombre sur l'absorbeur.

## II.4.5. Caractéristiques et performances des distillateurs

### II.4.5.1. 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:

$$\eta_g = \frac{Q_{evp}}{G S_v} = \frac{m_d}{G S_v} L_v \quad (1)$$

$Q_{evp}$ : Flux massique d'évaporation d'eau.

$m_d$ : Débit massique de distillat.

$L_v$ : Chaleur latente de vaporisation.

$G$ : Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface.

#### II.4.5.2. 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 :

$$\eta_i = \frac{Q_{evp}}{\alpha_t G S_v} = \frac{m_d}{G S_v} L_v \quad (2)$$

avec

$$\alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \tau_e \alpha_f \quad (3)$$

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre.

$\tau_e$  : Coefficient de transmission de l'eau.

$\alpha_e$  : Coefficient d'absorption de l'eau.

$\alpha_t$  : Coefficient d'absorption du fond du distillateur.

$\alpha_f$ : Coefficient d'absorption fictif du distillateur.

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

#### II.4.5.3. Performance

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

$$FBH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (4)$$

$$FBH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 heures}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 heures}} \quad (5)$$

#### II.4.5.4. Rendement

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

$$\eta = \frac{m_d}{G} L_v \quad (6)$$

#### II.4.6. Facteurs réduisant l'optimisation de l'activité du distillateur solaire

##### a) *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.

##### b) *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.

##### c) *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.

##### d) *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.

# *Chapitre III*

## *Résultats et discussion*

### III.1. Conception et réalisation du distillateur

#### III.1.1. Caractéristiques du distillateur

Le distillateur solaire utilisé dans cette étude a été conçu et réalisé par Messieurs le professeur Benderdouche enseignant au département Génie des procédés université de Mostaganem et le docteur Benadjmia enseignant à l'Université de Relizane puis d'autres améliorations ont été apportés à ce dispositif par Messieurs: Dr Labdelli, Dr Mana enseignants à l'école supérieure d'agronomie de Mostaganem et Mr Khouani Nadir ingénieur de laboratoire au même établissement.

Le distillateur étudié est composé des éléments suivants:

- une couverture
- un absorbeur
- un isolant thermique
- un scellement
- deux gouttières



Figure III.1: Schéma du distillateur

#### III.1.2. Principe de fonctionnement

L'eau est ajoutée manuellement ou de façon automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire traversant les deux vitres externe et interne de l'enceinte du distillateur fait chauffer la solution de NaCl jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau produite se condense sur la face interne de la vitre relativement plus froide. Celle-ci en pente légère, conduit ensuite l'eau distillée vers une gouttière liée à un récipient de stockage.

Pour mettre en évidence, l'effet de la température considérée comme paramètre fondamental, on a essayé de mesurer les températures à différents endroits du distillateur et suivre leur évolution au cours du temps d'ensoleillement. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure III.2. A travers cette dernière, nous constatons que la température augmente de la vitre externe vers le fond du plateau ( $T_{\text{fond-sol}} > T_{\text{surf-sol}} > T_{\text{vint}} > T_{\text{vext}} > T_{\text{amb}}$ ). Cet ordre est surtout bien visible entre 12h et 16h. Ces différentes températures commencent à augmenter depuis 8h jusqu'à atteindre des maxima vers 14 h, elles sont respectivement égales à 45 °C et 52 °C pour les températures de la

surface de la solution ( $T_{surf-sol}$ ) et du fond du bac du distillateur ( $T_{fond-sol}$ ). Ceci est dû à l'absorption de l'énergie solaire par le plateau peint en noir, considéré comme un corps noir.

L'élévation de la température du vitrage intérieur est due à l'absorption du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation. La température de la face intérieure est légèrement supérieure à celle de la face extérieure, ceci s'explique par la quantité importante du flux reçu par la face intérieure tandis que la face extérieure est sous l'effet seulement de paramètres météorologiques. La température ambiante ( $T_{amb}$ ) atteint une valeur minimale de  $20^{\circ}\text{C}$ .

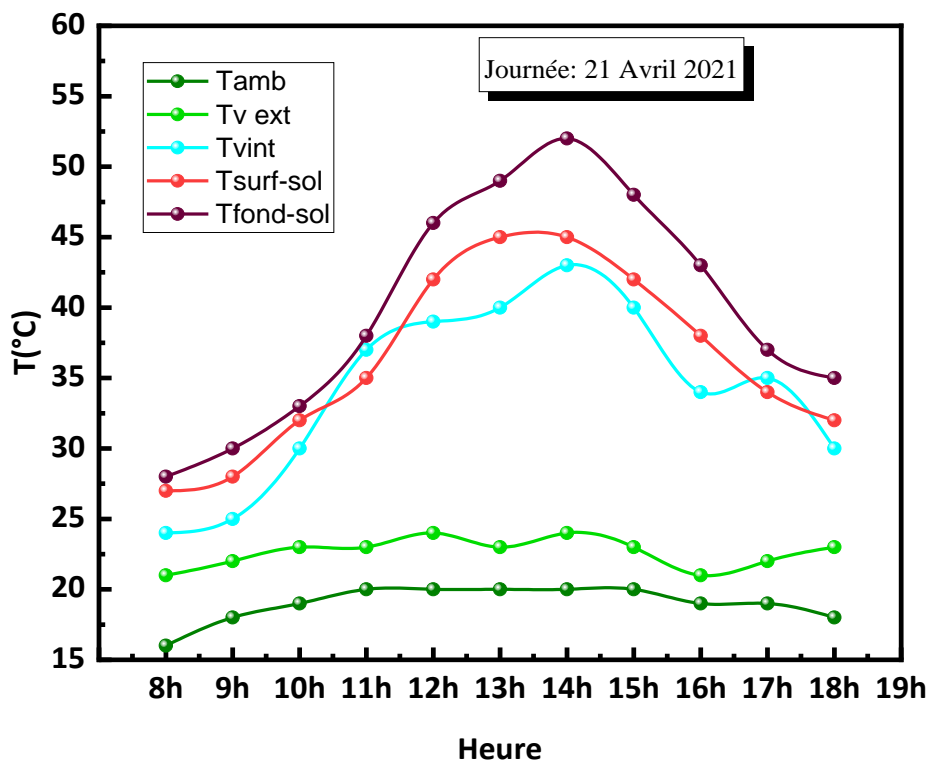


Figure III.2: Evolution des températures des différents endroits du distillateur solaire

Malheureusement, ces mesures ont été prises en ouvrant le distillateur, cela entraînait des fuites de vapeur qui mettent beaucoup de temps à se reformer, pour cette raison nous avons décidé de prendre simplement les mesures de  $T_{amb}$  et  $T_{v\ ext}$  et laisser le distillateur bien fermé.

### III.2. Paramètres météorologiques et grandeurs physiques relatives au distillateur

Les conditions météorologiques telles que la température ambiante, l'humidité, le refroidissement éolien, la vitesse et la direction du vent, le point de rosée, la couverture nuageuse, la pression ainsi que les paramètres physiques du distillat comme le volume, la production horaire, la conductivité électrique, le pH, et la concentration en chlorure, sont enregistrés pour chaque heure d'ensoleillement. Parmi les résultats obtenus, seulement ceux de la journée du 06 Mai 2021 sont

exposés au tableau III.1. Nous avons choisi particulièrement, cette journée en raison de l'obtention le plus grand volume journalier du distillat. Notons bien qu'on s'est servi d'une application dans le smartphone pour déterminer ces conditions météorologiques.

t	Tamb (°C)	Humid (%)	Ref-Eolien	V-vent (km/h)	D-vent	P-rosée	C-nuag (%)	P (hPa)	Tvit-ex (°C)	$\chi_D$ (mS)	$pH_D$	$V_D$ (ml)	P.H (ml)
8h	17	98	18	9	N-O	17	88	1017	17	-	-	0	0
9h	18	92	18	9	N-O	17	86	1017	21	-	-	0	0
10h	19	85	19	8	N-O	16	85	1018	22	-	-	4	4
11h	19	78	19	9	N	15	83	1018	26	0.033	6.70	40	36
12h	20	75	20	11	N	15	82	1018	27	0.030	6.73	118	78
13h	20	77	20	13	N	16	62	1018	29	0.025	6.46	230	112
14h	20	73	20	14	N	15	62	1018	29	0.023	6.43	380	150
15h	20	73	20	13	N	15	48	1017	31	0.037	6.02	510	130
16h	20	72	20	12	N-O	15	39	1017	31	0.040	5.98	600	90
17h	20	70	20	11	N-O	15	26	1017	30	0.045	6.17	670	70
18h	20	70	20	9	N-O	15	25	1016	27	0.043	6.24	710	40
19h	20	69	20	7	N	14	7	1016	-	0.047	6.14	740	30

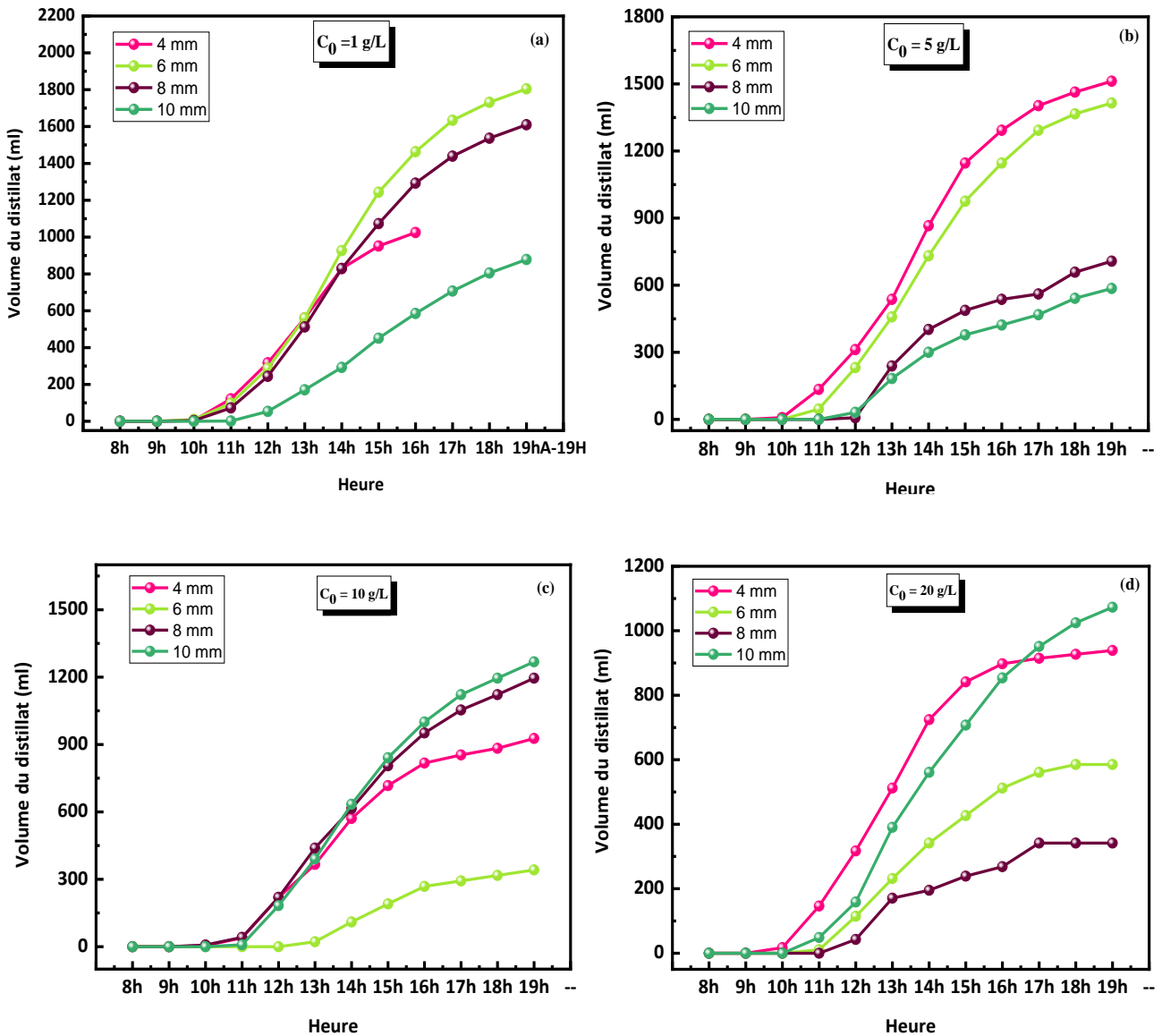
**Tableau III.1:** Conditions météorologiques et paramètres physiques du distillat

Durant cette journée, 2530 ml d'une solution de NaCl d'une concentration d'1 g/L a été introduite dans le distillateur, depuis 8h du matin jusqu'à 19 h. En vue d'une amélioration de la capacité de distillation du dispositif, plusieurs paramètres tels que la hauteur de l'eau dans le plateau, la concentration de la solution de NaCl ont été optimisés, en tenant compte des variations des conditions météorologiques.

### III.3. Effet de la hauteur de la solution de NaCl dans le plateau sur le volume et la production horaire du distillat.

A travers les courbes illustrées sur les figures III.3 (a), III.3 (b), III.3 (c) et III.3 (d), on remarque que le volume du distillat augmente avec le temps surtout entre 12h et 16h pour atteindre une valeur

presque maximale vers 19 h. D'autre part, l'effet de la hauteur de la solution de NaCl est bien visible surtout pour la concentration de 5 g/L. Ainsi, il est Clair, que plus la hauteur de la solution diminue, plus le volume du distillat augmente. Cette évolution n'est pas observée pour les autres concentrations, vu que les conditions météorologiques ont une influence sur ce paramètre.



**Figure III.3:** Evolution du volume de distillat en fonction du temps à différentes hauteurs de solutions aux concentrations 1 g/L (a), 5 g/L (b) 10 g/L (c) et 20 g/L (d).

Théoriquement, la hauteur correspondante à un volume de distillat élevé est bien 4 mm, mais cette hauteur n'a pas été choisie, pour une raison de séchage de la solution au environ de 16h (voir figure III.3 (a)). Ainsi, tous les tests qui suivent vont être effectués avec une hauteur de 6 mm.



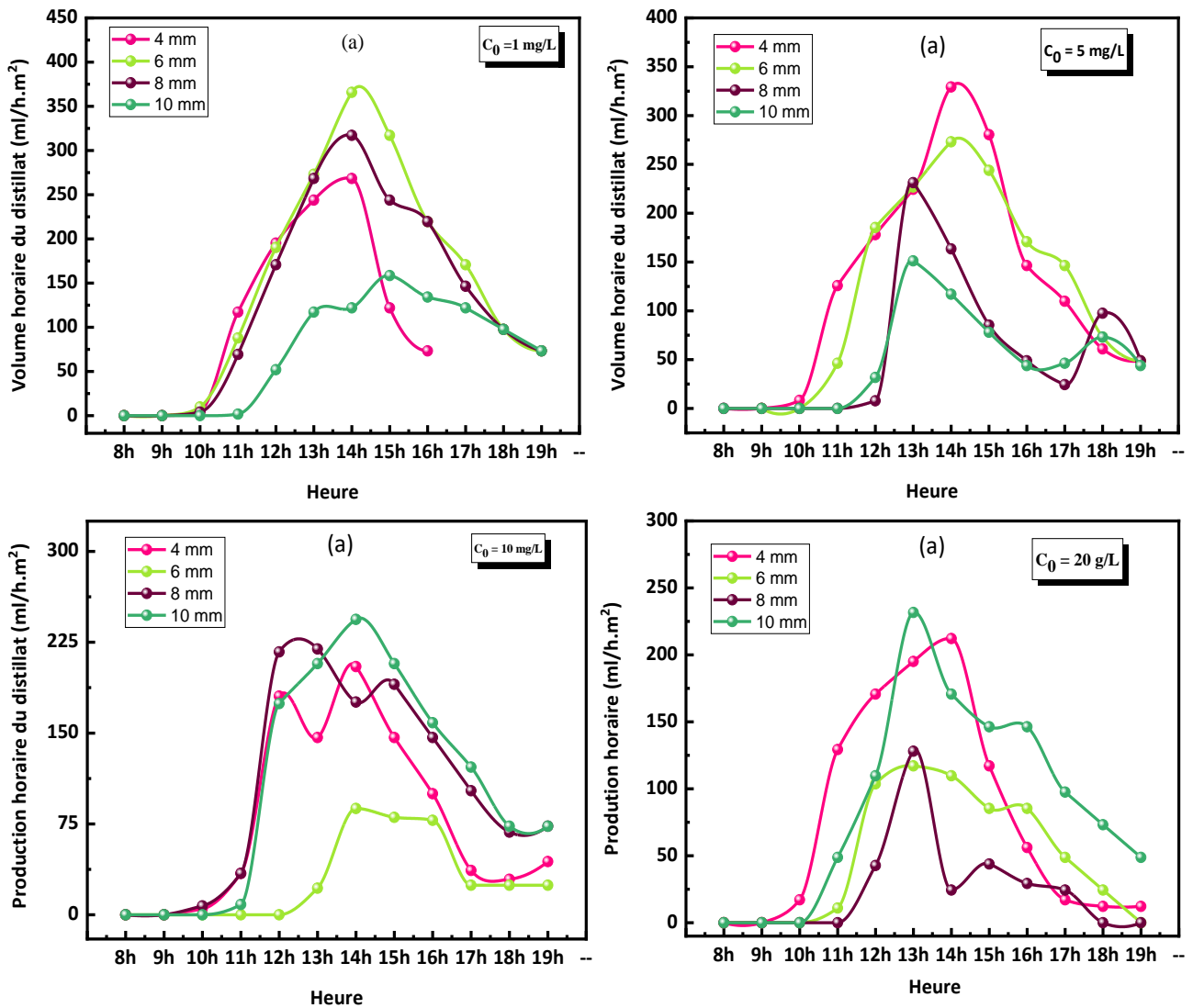


Figure III.4: Evolution de la production horaire du distillat au cours du temps à différentes hauteurs de solutions aux concentrations 1 g/L (a), 5 g/L (b) 10 g/L (c) et 20 g/L (d).

### III.4. Effet de la concentration de la solution à distiller sur le volume et la production horaire du distillat.

Nous avons choisi la valeur optimale de la hauteur d'eau (6mm) à laquelle la production d'eau est maximale, nous avons ensuite fixé cette hauteur et faire varier les concentrations entre 1 et 20 g/l. Ces étapes nous a permis à représenter l'évolution du volume et la production horaire du distillat au cours du temps (voir figures III.5 et III.6). Après avoir comparé les quatres concentrations (1g/L, 5g/L,10g/L,20g/L) nous avons remarqué que la production d'eau a atteint son maximum (1800 ml) ainsi que la production horaire (350ml) à 14h avec une concentration de 1g/l.

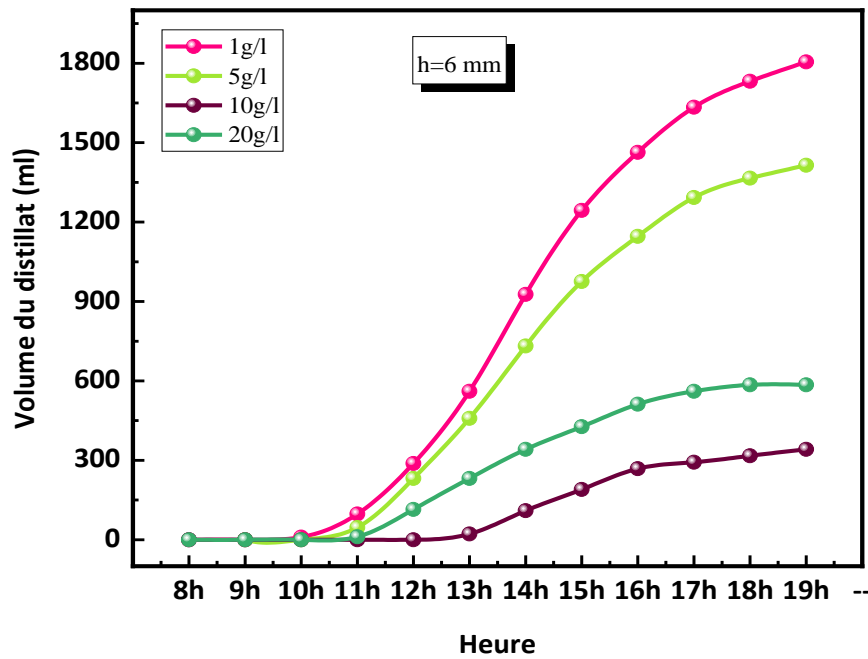


Figure III.5: Evolution du volume de distillat en fonction du temps.

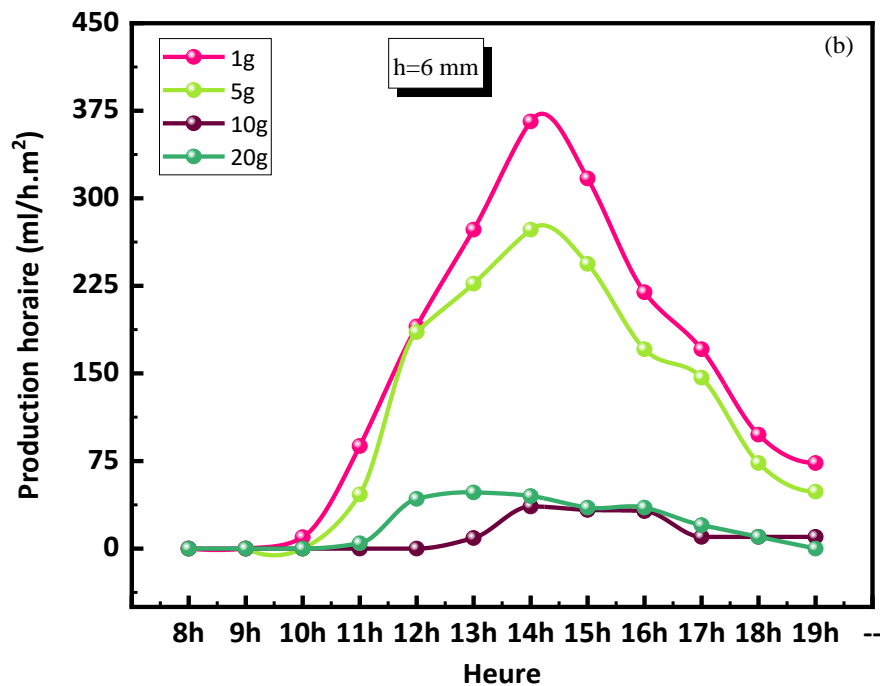


Figure III.6: Evolution de la production horaire du distillat en fonction du temps.

### III.5. Effet des paramètres météorologiques sur le volume et la production horaire du distillat

Parmi ces paramètres météorologiques, on a choisi, la couverture nuageuse, la vitesse du vent et la température de la vitre externe au lieu de la température ambiante. Vu que la première est liée aux conditions météorologiques et au même temps aux caractéristiques de la vitre.

#### III.5.1 Température de la vitre externe

La Figure III.7 représente les évolutions de la température de la vitre externe et le volume du distillat au cours du temps. A travers cette figure, on remarque qu'au cours du temps, les deux paramètres évoluent le même sens. Entre 10h et 15h, l'augmentation de la température de la vitre externe de 20°C à 32°C fait accroître le volume du distillat jusqu'à 1244 ml/m<sup>2</sup>. Mais à partir de 16h, cette température commence à s'abaisser, ce qui entraîne une faible augmentation du volume du distillat qui va atteindre 1800 ml/m<sup>2</sup> vers 19h.

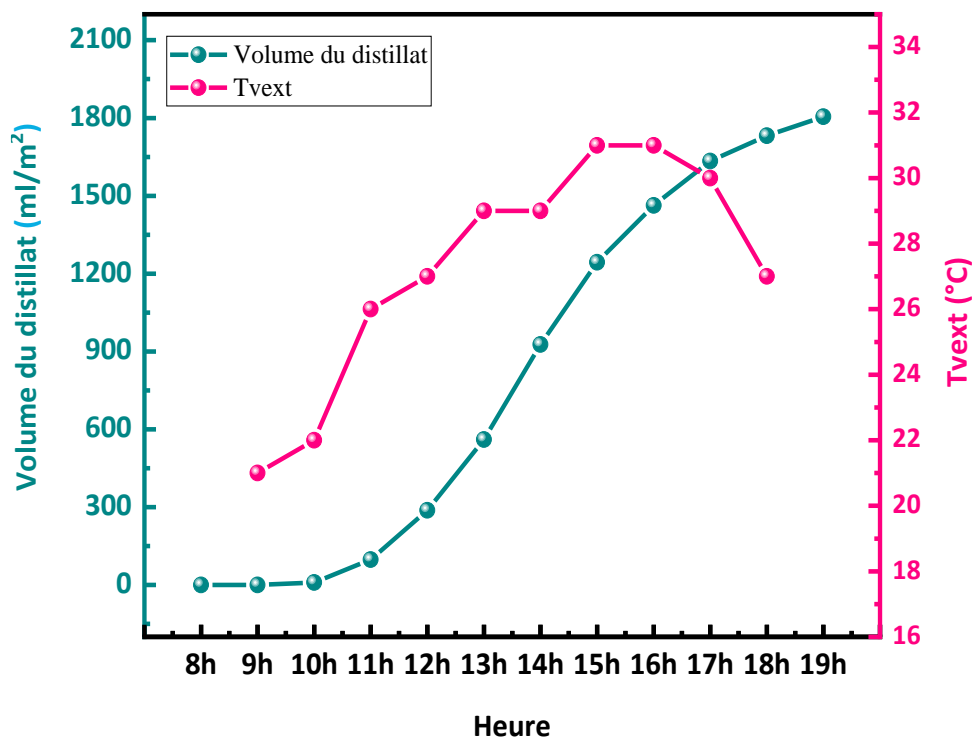
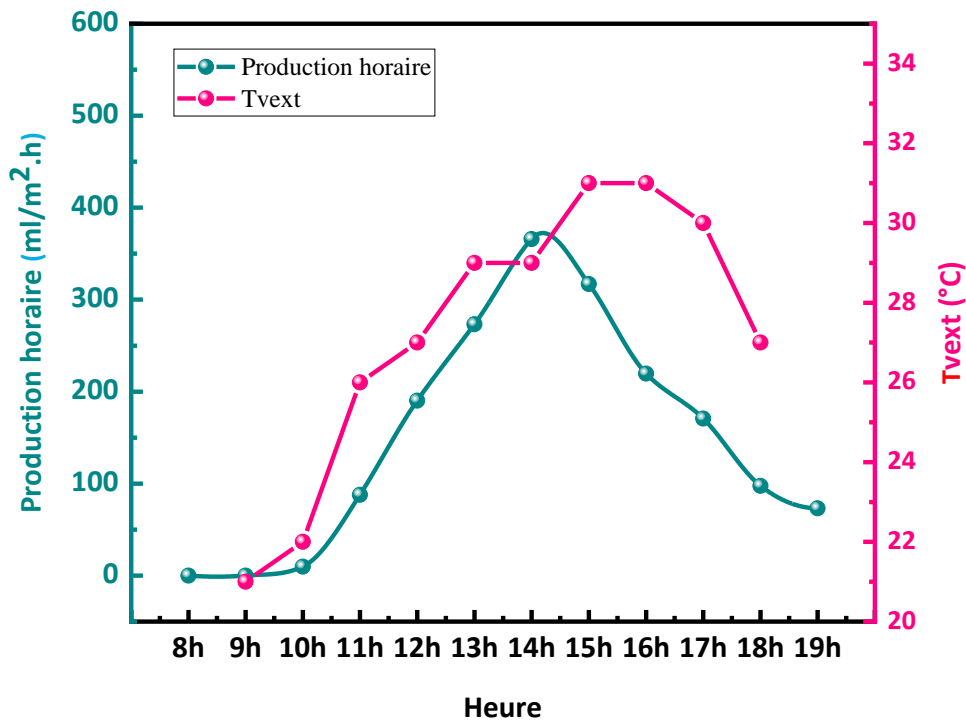


Figure III.7: Evolution de la température de la vitre externe et le volume du distillat au cours du temps.

Pour mieux comprendre cette évolution, on a représenté la variation de la production horaire du distillat en fonction du temps (voir figure III.8). Il est clair, que la production horaire et la température de la vitre augmentent de 9 h jusqu'à 14h où elle atteint sa valeur maximale de 366 ml/m<sup>2</sup>.h. Par contre la température maximale de la vitre externe, a atteint 31 °C, une heure plus tard.

A partir de cette heure, les deux paramètres commencent à diminuer, vers 19h la production horaire du distillat sa plus faible valeur de 73 ml/m<sup>2</sup>.h.



**Figure III.8:** Evolution de la température de la vitre externe et la production horaire du distillat au cours du temps.

### III.5.2. Vitesse du vent

L'influence de la vitesse du vent sur le volume du distillat est illustrée sur la figure III.9. Ces résultats sont obtenus, en choisissant deux journées dont les vitesses du vent étaient nettement différentes. La première en date du 06/05/2021 et la seconde est celle du 09/05/2021 où les vitesses maximales du vent étaient respectivement de 14 km/h et 34 km/h. En parallèle, les autres conditions opératoires doivent être aussi les plus proches possibles, telles que, la concentration en NaCl est de 1g/L pour deux hauteurs de 6 mm et 10 mm. Tout d'abord il faut noter, que durant toutes ces semaines, la vitesse du vent n'a pas dépassé les 34 km/h, en plus elle est instable, et varie de façon rapide et aléatoire. Bien que cette dernière reste modérée son effet négatif sur le volume du distillat est bien visible sur la figure III.9. D'un autre côté, on doit aussi tenir compte de l'effet négatif de la hauteur de la solution de NaCl. De grandes vitesses du vent provoquent le refroidissement de la face extérieure de la vitre, il en résulte une diminution de la température par accroissement des pertes de chaleur par convection au niveau de la vitre (face extérieure). ceci conduisait ainsi à une chute de la production du distillat.

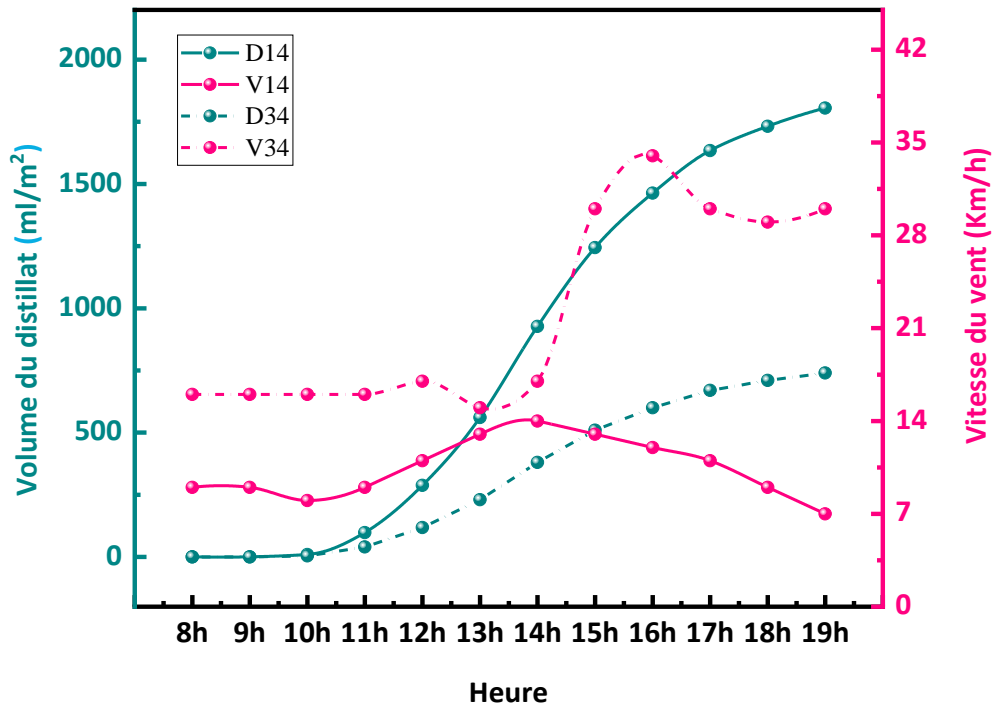


Figure III.9: Effet de la vitesse du vent sur le volume du distillat

### III.5.3. Couverture nuageuse

La figure III.10 présente l'effet de la couverture nuageuse sur la production totale du distillat. Pour représenter de telle figure, on a sélectionné les résultats correspondants aux journées du 07 et

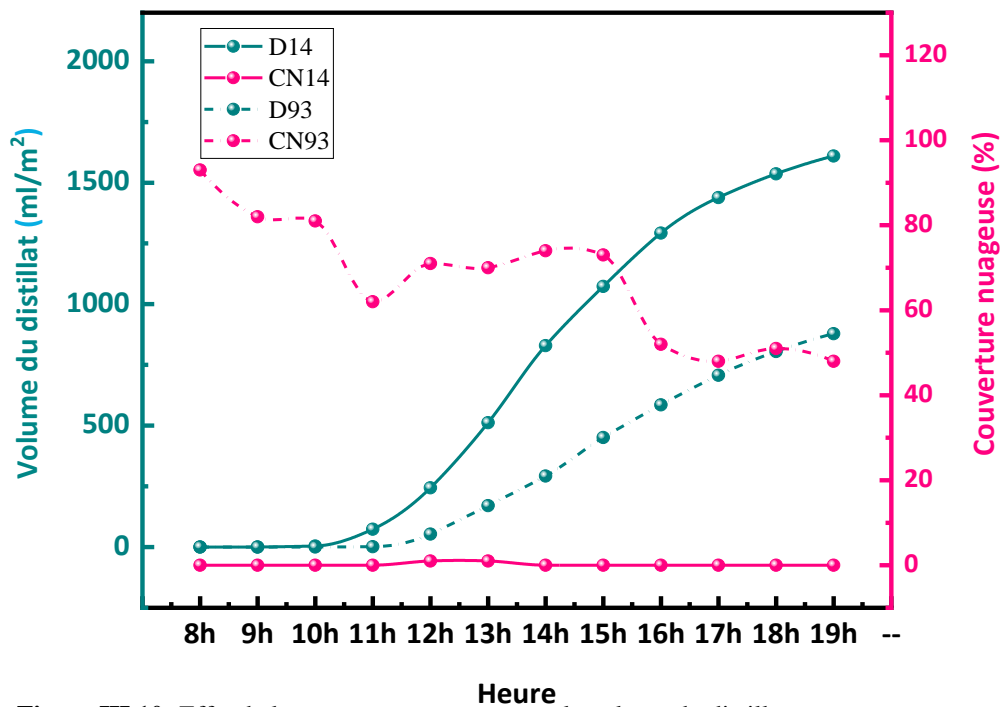


Figure III.10: Effet de la couverture nuageuse sur le volume du distillat

09 Mai 2021 dans lesquelles, les maxi des couvertures nuageuses ont atteint les valeurs maximales respectives de 14 % (la plus faible couverture) et 93 % (la plus forte couverture) et aussi avec des conditions opératoires proches (solution d'1 g/L avec deux hauteurs de 8 mm et 10 mm). Il est clair, que la couverture nuageuse fait diminuer le volume du distillat en empêchant une partie des radiations solaires d'arriver à la solution de NaCl. Une couverture nuageuse de 93 % en présence d'autres facteurs tels que la hauteur de la solution ont pu diminuer le volume du distillat de 1069 ml/m<sup>2</sup>.j à 873 ml/m<sup>2</sup>.j.

## 6. Qualité du distillat

Les résultats obtenus précédemment, ont montré l'effet des différents paramètres sur la production journalière et horaire du distillat. Pour compléter ce travail, on a essayé d'étudier les performances du distillateur en termes de qualité du distillat.

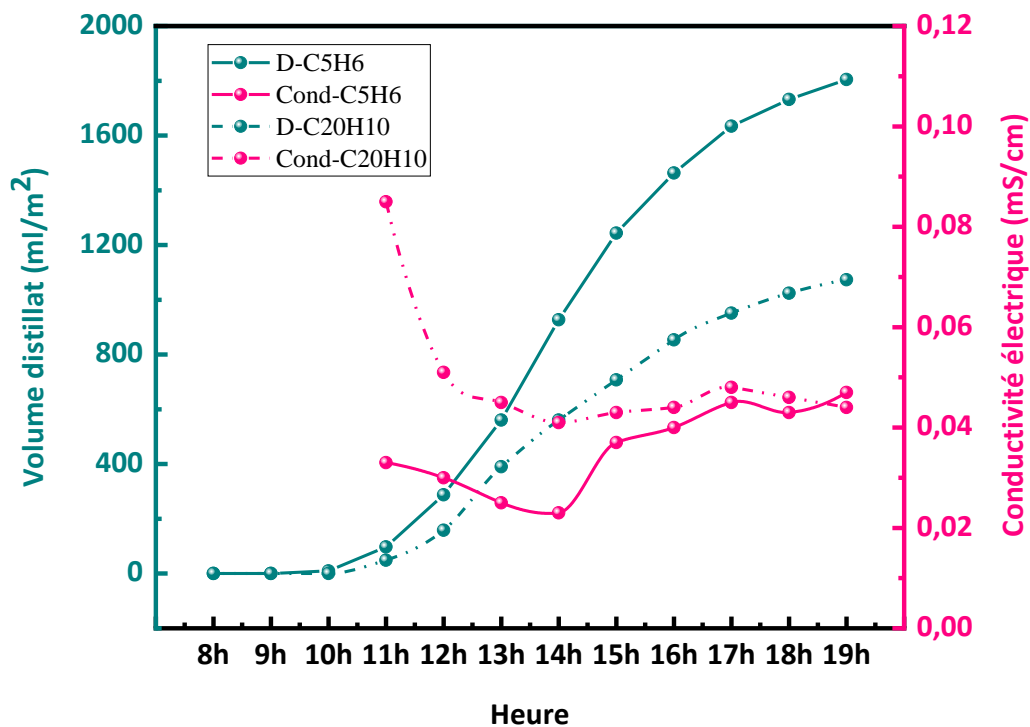


Figure III.11: Evolution du volume et de la conductivité électrique du distillat au cours du temps.

L'eau distillée est une eau qui a subi une distillation, donc est théoriquement exempte de certains sels minéraux et organismes que l'on pourrait retrouver dans l'eau « naturelle ». Elle contient idéalement des molécules H<sub>2</sub>O, des gaz dissous comme O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>. Elle est qualifiée d'eau purifiée. Malheureusement, le transfert de quelques substances volatiles et d'un peu de matériel non volatile (porté dans le flot de vapeur d'eau) dans l'eau distillée est inévitable. Ainsi, plusieurs paramètres physico-chimiques du distillat tels que la conductivité électrique, le pH et la concentration en chlorure (Cl<sup>-</sup>) ont été mesurés à chaque heure d'ensoleillement pour contrôler la qualité de cette eau.

Parmi les résultats obtenus, on a sélectionné ceux des journées du 06 et 24 mai 2021 qui présentent respectivement le minimum et le maximum de la production du distillat. Dans telles conditions, les concentrations des solutions en NaCl sont respectivement 5g/L et 20 g/L pour des hauteurs respectives de 6 mm et 10 mm. A travers ces résultats (figure III.9), on remarque que les conductivités électriques des deux solutions restent faibles de l'ordre de  $0,04 \text{ mS/m}^2$ , ce qui prouve une bonne qualité du distillat. Il est clair aussi, que la solution d'une concentration de 1g/L présente une conductivité plus faible que celle de 20 g/L, le long de toute la journée. Donc, la grande production du distillat, pour la solution d'1 g/L, n'a pas empêché d'avoir une eau distillée de bonne qualité.

Le pH de l'eau distillée est théoriquement de 7, cependant, il est extrêmement instable car la présence inévitable de très faibles quantités d'ions peut le changer de façon importante. D'autre part, laissé à l'air libre et à température ambiante, le pH de l'eau distillée peut-être affecté. Ainsi on essayé de suivre l'évolution du pH du distillat au cours temps. Les résultats obtenus et illustrés sur la figure III.12, montrent que le pH des deux solutions varie entre 6 et 6,6 ce qui laisse dire que l'eau distillée est légèrement acide, ceci peut être dû à la présence du  $\text{CO}_2$  dissout. Par comparaison entre les deux solutions, la solution la plus concentrée, possède un pH, plus élevée, ceci est dû peut être à la présence des ions  $\text{Cl}^-$  en quantité plus élevée que celle de l'autre solution (voir figure III.12) qui fait diminuer la solubilité du  $\text{CO}_2$  dans le distillat. Cette concentration de  $\text{Cl}^-$  résiduelle dans illustrée sur la figure III.12, ne dépasse pas les 0.004 %. Tout cela prouve que l'eau distillée est d'une bonne qualité.

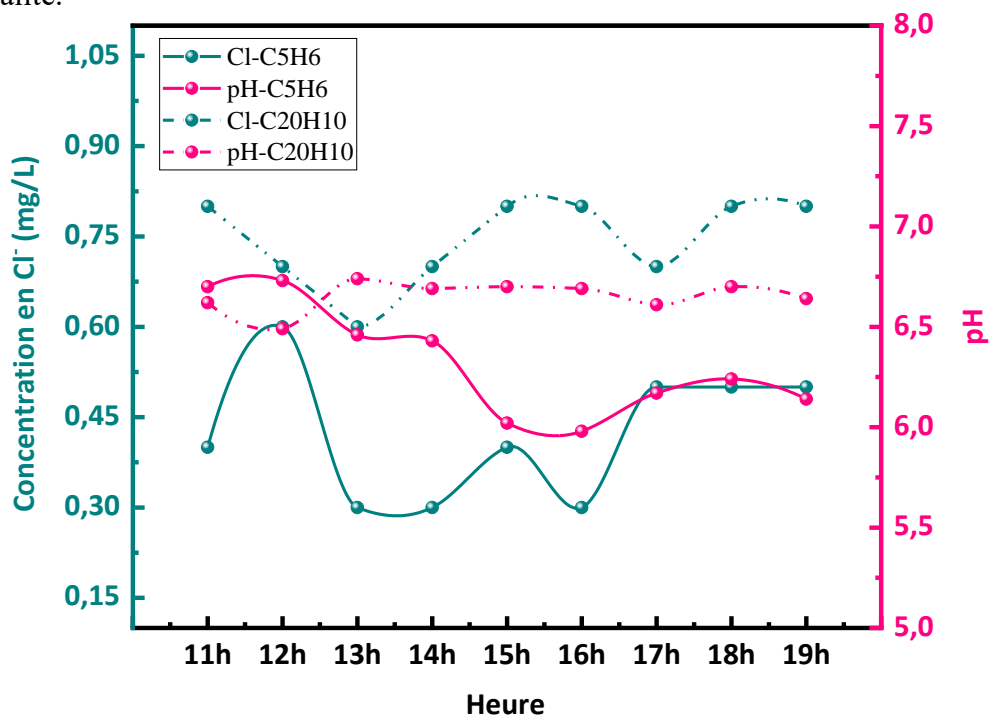


Figure III.12: Evolution de la concentration en  $\text{Cl}^-$  et pH du distillat au cours du temps.

# *Conclusion*



## Conclusion

La majorité de l'eau douce est sous forme de glace polaire qui est inutilisable. Il ne reste donc que environ 1/4 de l'eau douce pour que tous les habitants de la planète bleue puissent assouvir leurs besoins, c'est donc très peu. L'eau devient donc de plus en plus rare, dès lors, de plus en plus convoitée. Elle constitue un enjeu politique et économique important. Cette situation a poussé les scientifiques dans le monde entier à chercher, des voies de production de l'eau douce avec peu de dépenses. Parmi les moyens mis en œuvre, l'utilisation de l'énergie solaire qui a vite trouvé sa place. Ainsi, la production d'eau douce par voie solaire devient importante dans la mesure elle économise beaucoup d'énergie. Le distillateur solaire à effet de serre utilisé dans notre étude est un dispositif très simple dans sa réalisation et son entretien. Il a été conçu et réalisé avec des matériaux locaux, dans le *''Laboratoire du Développement des Structures et Applications des Matériaux Moléculaires (SEA2M)''* Faculté des Sciences et Technologie, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem. Avec de tel dispositif, la température de la surface de la nappe d'eau à atteint les 52 °C dans une période moins chaude. Avec une telle température, le système fonctionne jusqu'au couché du soleil. Différentes expériences ont été menées dans le but d'étudier la distillation d'une solution de NaCl à l'aide de notre distillateur solaire. Durant cette période, plusieurs paramètres météorologiques ont été enregistrés pour chaque heure d'ensoleillement, mais on s'est contenté d'étudier l'effet de quelques uns (température de la vitre externe, vitesse du vent et couverture nuageuse) sur le volume et la production horaire du distillat. Tout d'abord on a essayé d'optimiser la hauteur de la solution NaCl dans le plateau. En général, pour les quatre solutions de NaCl à différentes concentrations (1-20 g/L), la hauteur optimale est 4 mm, malheureusement, cette hauteur a posé un problème de séchage de la solution au niveau du plateau. C'est pour cette raison on a choisi une hauteur de 6 mm pour le reste des manipulations. D'autre part, il faut noter que la solution la moins concentrée (1g/L) qui a produit le plus de l'eau distillée. Les paramètres météorologiques ont joué aussi leur rôle dans cette distillation. La température de la vitre externe, liée directement à la température ambiante joue en faveur de la production du distillat, plus elle s'élève plus le volume du distillat augmente. Par contre, la vitesse du vent et la couverture nuageuse ont un effet négatif sur la production du distillat. Plus le ciel est couvert et le vent souffle fortement, le distillateur produit moins d'eau distillée.

Finalement avec ce distillateur à effet de serre on a pu produire 1800 ml/m<sup>2</sup>.j de l'eau distillée d'une meilleure qualité à partir d'une solution aqueuse de NaCl. Ces résultats sont encourageants, ce qui nous laisse dire que ce distillateur a tout le mérite d'être pris en charge pour d'éventuelles

améliorations dans sa conception. L'avantage de ce dispositif est d'être facilement exploitable en milieu rural par des gens peu qualifiés techniquement.

# *Références*

## Références

- [1] Wikipedia, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil>.
- [2] CSP\_imagerie-medicale-radiographie-principe.xml
- [3] Solar Facts and Advice, <http://www.solar-facts-and-advice.com>.
- [4] Le soleil source d'énergie, <http://galileo.cyberscol.qc.ca/intermet/temperature/soleil.htm>.
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_solaire\\_thermodynamique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_thermodynamique).
- [6] A. SADI, « Le dessalement Solaire – Considération technique » Rev. Energ. Ren Chemss 2000.
- [7] La Distillation, Techno-Science.net : site d'actualité des sciences et des technologies, consulté le 14/03/2013.
- [8] 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. 232p.
- [9] Production adduction d'eau potable, usine de dessalement. [hmf.enseeiht.fr](http://hmf.enseeiht.fr), BEI ERE 2009 - 2010, consulté le 02/03/2013.
- [10] Ian C. Watson; O.J. Morin, Jr; Lisa Henthorne, « Desalting Handbook for Planners», 3eme Edition / Juillet 2003, RosTek Associates, Inc., Tampa, Florida.
- [11] Association des retraités du groupe CEA, groupe argumentaire sur le nucléaire, "Dessalement et réacteurs nucléaires", Fiche N°32, 1-4, Février 2008.
- [12] I. SAOUANE, Etude des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur d'un système de dessalement par voie solaire, Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [13] Hamrat Oussama, Influence du débit de refroidissement sur les performances d'un distillateur solaire actif avec chambre de condensation séparée, approche expérimentale, thèse master, Université de KHEMIS MILIANA, 2016/2017.
- [14] Fedali Saida, Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtre à bas coût pour les communautés rurales, mémoire de magister, université de BATNA , Année Universitaire 2007/2008.
- [15] H. Boutebila, Etude et conception d'un distillateur solaire à usage agricole, Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, 2012.
- [16] ZEROUALI MEKKI, contribution à l'optimisation des performances d'un distillateur solaire, thèse magistère en physique, université hadj lakhdar – batna, 9 /12/ 2012.
- [17] A. Chaker, G. Menguy, Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique, Rev Energ Ren. Numéro spécial 10ème Journée International de Thermique (2001) 53–5853.
- [18] Abderrahmane Khechekhouch et Guehef Chouaib, Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan pour une communauté saharienne, Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-oued, 25/05/2016.
- [19] R.S. Hansen, C.S. Narayanan, K.K. Murugavel, Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh, Desalination. 358 (2015) 1–8.
- [20] Docteur Merad née Mesri Mokhtaria et Professeur Cheknane Ali Avec la participation de M. Rougab Ilyes, Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications, Université Amar Telidji – Laghouat.
- [21] P. Hunkyun, Low-Cost Multi-Effect Solar Still: Alternative Appropriate Technology for Personal Desalination, in: T. Yonar (Ed.), Desalination, IntechOpen,Rijeka,2017.doi:10.5772/intechopen.68365.

- [22] M. Zerouki, Y. Marif, M. Belhadj, N.E. Settou, Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien, *Ann. Sci. Technol.* 4 (2012) 46–57.