

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### LICENCE

En Génie Mécanique

Option : énergétique

Présenté par :

Abiadat Souhieb & Bouzidi Abdelbassit

Thème

---

# CALCUL DU BILAN THERMIQUE DANS UN DISTILLATEUR SOLAIRE

---

Proposé & encadré par :

Dr Benkherbache S

*Année Universitaire : 2021/ 2022*

## Sommaire

<b>Introduction</b>	
<b>Chapitre I :Etude bibliographique</b>	
<b>I .1 L'énergie solaire.....</b>	<b>4</b>
<b>I .1.1 Valeurs énergétiques.....</b>	<b>6</b>
<b>I .1.2 Rôle sur Terre.....</b>	<b>7</b>
<b>I .1.3 Exploitation humaine.....</b>	<b>8</b>
<b>I.2 Conversion thermique de l'énergie solaire.....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.1 Principe de la conversion thermique.....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.1.1 L'habitat solaire passif.....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.1.2 Capteurs plans.....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.1.3 Capteurs à concentration.....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.1.4 Capteurs sous vide.....</b>	<b>13</b>
<b>I.2.1.5 Panneau solaire thermique domestique.....</b>	<b>14</b>
<b>I.2.2 Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.2.1 Le rayonnement solaire.....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.2.2 Principe de la conversion Photoélectrique.....</b>	<b>16</b>
<b>I.2.2.3 Cellule photovoltaïque.....</b>	<b>16</b>
<b>I .3 La Distillation.....</b>	<b>17</b>
<b>I .3.1 Histoire .....</b>	<b>18</b>
<b>I .3.2 Distillation à la cornue dans un alambic.....</b>	<b>21</b>
<b>I .3.3 Principe.....</b>	<b>23</b>
<b>I .3.4 Distillation discontinue.....</b>	<b>24</b>
<b>I .3.5 Distillation continue.....</b>	<b>24</b>
<b>I .3.6 Distillation sous vide.....</b>	<b>25</b>
<b>I .3.7 Distillation industrielle.....</b>	<b>25</b>
<b>I .4 Association des procédés a distillation avec l'énergie solaire .....</b>	<b>26</b>
<b>I .4.1La distillation solaire direct à effet de serre.....</b>	<b>27</b>
<b>I .4.2La distillation à détente successive ou multi-étage flash (MSF).....</b>	<b>28</b>
<b>I .4.3 La distillation par compression de vapeur.....</b>	<b>29</b>
<b>I .4.4La distillation par multiple effets .....</b>	<b>29</b>
<b>I .4.5.Paramètres de conception.....</b>	<b>30</b>
<b>Chapitre II : Les distillateurs solaires</b>	
<b>II .1 Classification des distillateurs solaires.....</b>	<b>32</b>
<b>II .1.1 Distillateurs solaires passifs.....</b>	<b>33</b>
<b>II .1.2 Distillateur solaire actif.....</b>	<b>39</b>
<b>II .1.2.1 Distillateur solaire actif à multiple bassin.....</b>	<b>39</b>
<b>II .1.2.2 Distillateur solaire Actif à multiple bassin muni d'un capteur plan.....</b>	<b>39</b>
<b>II .2 Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur.....</b>	<b>42</b>
<b>II .2.1 Paramètres Internes.....</b>	<b>43</b>

<b>II .2.1.1 Paramètres de construction.....</b>	<b>43</b>
<b>II .2.1.1.1 Couverture.....</b>	<b>43</b>
<b>II .2.1.1.2 L'inclinaison.....</b>	<b>43</b>
<b>II .2.1.1.3 L'absorbeur.....</b>	<b>44</b>
<b>II .2.1.1.4 La hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller.....</b>	<b>44</b>
<b>II .2.1.1.5 L'isolation des faces latérales du distillateur.....</b>	<b>44</b>
<b>II .2.1.2 Paramètres thermo physiques.....</b>	<b>44</b>
<b>II .2.1.3 Paramètres optiques .....</b>	<b>44</b>
<b>II .2.1.4 Paramètres de position.....</b>	<b>45</b>
<b>II .2.2 Paramètres Externes.....</b>	<b>45</b>
<b>II.2.2.1 Paramètres météorologiques.....</b>	<b>45</b>
<b>II .2.2.2 Paramètres Géographiques.....</b>	<b>46</b>
<b>Chapitre III :Bilan thermique dans un distillateur solaire</b>	
<b>III.1.Description de distillation solaire .....</b>	<b>48</b>
<b>III.2. Principe de fonctionnement de distillateur solaire.....</b>	<b>48</b>
<b>III.3. Modélisation et calcul du bilan thermique dans un distillateur solaire.....</b>	<b>48</b>
<b>III.3.1. Energie solaire absorbe.....</b>	<b>48</b>
<b>III.3.2. Bilan thermique de l'absorbeur.....</b>	<b>49</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>52</b>

## LIST DES FIGURES

<b>Figure I.1</b>	<b>Les applications directes de l'énergie solaire.....5</b>
<b>Figure I.2</b>	<b>Part de la production d'énergie primaire produite par le solaire (données BP 2018). .....5</b>
<b>Figure I.3</b>	<b>Répartition quotidienne moyenne de l'énergie solaire reçue au sol sur Terre.....7</b>
<b>Figure I.4</b>	<b>Un héliostat de la centrale solaire Thémis.....10</b>
<b>Figure I.5</b>	<b>La centrale solaire thermodynamique SEGS, dans le désert des Mojaves, en Californie.....10</b>
<b>Figure I.6</b>	<b>Rayonnement Solaire.....12</b>
<b>Figure I.7</b>	<b>Capteurs à concentration.....12</b>
<b>Figure I.8</b>	<b>Capteurs à concentration.....13</b>
<b>Figure I.9</b>	<b>Capteur solaire thermique plan sous vide.....14</b>
<b>Figure I.10</b>	<b>Conversion thermique.....14</b>
<b>Figure I.11</b>	<b>Effet photoélectrique.....15</b>
<b>Figure I.12</b>	<b>Conversion photovoltaïque.....16</b>
<b>Figure I.13</b>	<b>Cellule photovoltaïque.....17</b>
<b>Figure I.14</b>	<b>Distillation simple sans la colonne à fractionner, souvent utilisée par les chimistes.....18</b>
<b>Figure I.15</b>	<b>Une colonne à distiller au musée Stella Matutinal de Saint Leu, à La Réunion.....20</b>
<b>Figure I.16</b>	<b>Distillation à la cornue dans un alambic.....20</b>
<b>Figure I.17</b>	<b>Une colonne à distiller dans un musée en Ukraine.....21</b>

<b>Figure I.18</b>	<b>Colonnes de distillation industrielles.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure I.19</b>	<b>Etude expérimentale d'un distillateur solaire.....</b>	<b>28</b>
<b>Figure I.20</b>	<b>désodorisation - évaporateur d'eau de mer, distillation à détente étagée à recirculation ( MSF ).....</b>	<b>28</b>
<b>Figure I.21</b>	<b>Distillation par compression de vapeur.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure I.22</b>	<b>Schéma d'une installation de dessalement par Multiple-effets accouplés à des capteurs solaires.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure II.1</b>	<b>Distillateur solaire à double effets (l'eau s'écoule sur la couverture supérieure).....</b>	<b>34</b>
<b>Figure II.2</b>	<b>Distillateur solaire à double effet surélevé.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure II.3</b>	<b>Distillateur solaire à double effets (bassin supérieur prend la forme d'un 'V').....</b>	<b>36</b>
<b>Figure II.4</b>	<b>Distillateur solaire symétrique à double pente.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure II.5</b>	<b>Distillateur solaire type asymétrique à double effets.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure II.6</b>	<b>Distillateur solaire à double effet, à double pente.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure II.7</b>	<b>Distillateur solaire type actif, couplé à un capteur par mode de circulation.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III.1</b>	<b>Bilan énergétique d'un distillateur solaire plan Au niveau de la vitre.....</b>	<b>49</b>

# ***INTRODUCTION***

## **Introduction**

Sur le plan mondial, la demande de l'eau potable de bonne qualité est de plus en plus forte, en effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture sont de plus en plus élevés. En Algérie le problème d'approvisionnement en eau potable est déjà posé, d'abord il faut mettre des mécanismes pour diminuer le gaspillage et les fuites d'eau, car cette substance reste insuffisante. L'une des solutions est la production de l'eau douce à partir de l'eau salée. Néanmoins, le dessalement nécessite une énergie dont le coût est important, pour ce la des projets dans le domaine de l'énergie solaire ont montré depuis 1872, que la distillation solaire est économiquement la plus compétitive lorsque la demande en eau douce n'est pas trop grande. Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du Bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire Algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. Plusieurs types de configurations de distillateurs solaires ont été construits et essayés à travers le monde. Dans le même temps beaucoup de chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire les transferts de chaleur et de matière dans les distillateurs solaires.

# **Chapitre I**

## **Etude bibliographique**

## **I.1 L'énergie solaire :**

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre.

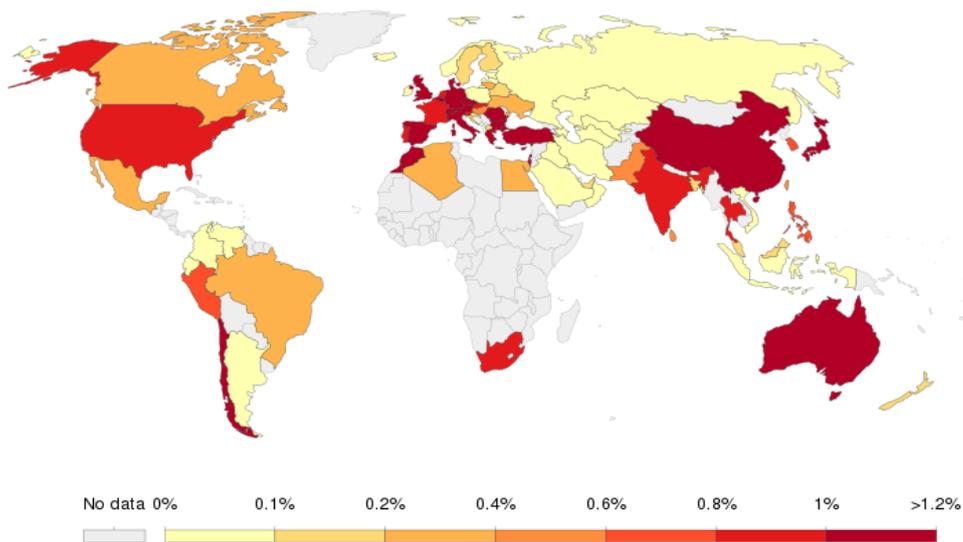
L'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde.

Les sources d'énergie issues indirectement de l'énergie solaire sont notamment l'énergie hydraulique, dérivée de l'énergie cinétique de l'eau dont le cycle dépend de l'énergie thermique du Soleil ; l'énergie éolienne, provenant de l'énergie cinétique du vent, lui-même lié à l'échauffement et à l'évaporation de l'eau générés par le Soleil, la rotation de la Terre et la force de Coriolis ; l'énergie hydrolienne et l'énergie des vagues, liées aux mouvements des océans et des cours d'eau ; le bois énergie et l'énergie de la biomasse ainsi que la géothermie de très basse température, provenant des couches superficielles du sol réchauffées par le Soleil. L'énergie solaire est ainsi l'une des principales formes d'énergies renouvelables. On peut ajouter, à des échelles de temps plus longues, les combustibles fossiles, provenant de matières organiques créées par photosynthèse (charbon, pétrole, gaz naturel...) auxquelles s'ajoute l'énergie biochimique de la matière organique vivante.



**Figure I.1 :Les applications directes de l'énergie solaire**

Share of primary energy from solar, 2018



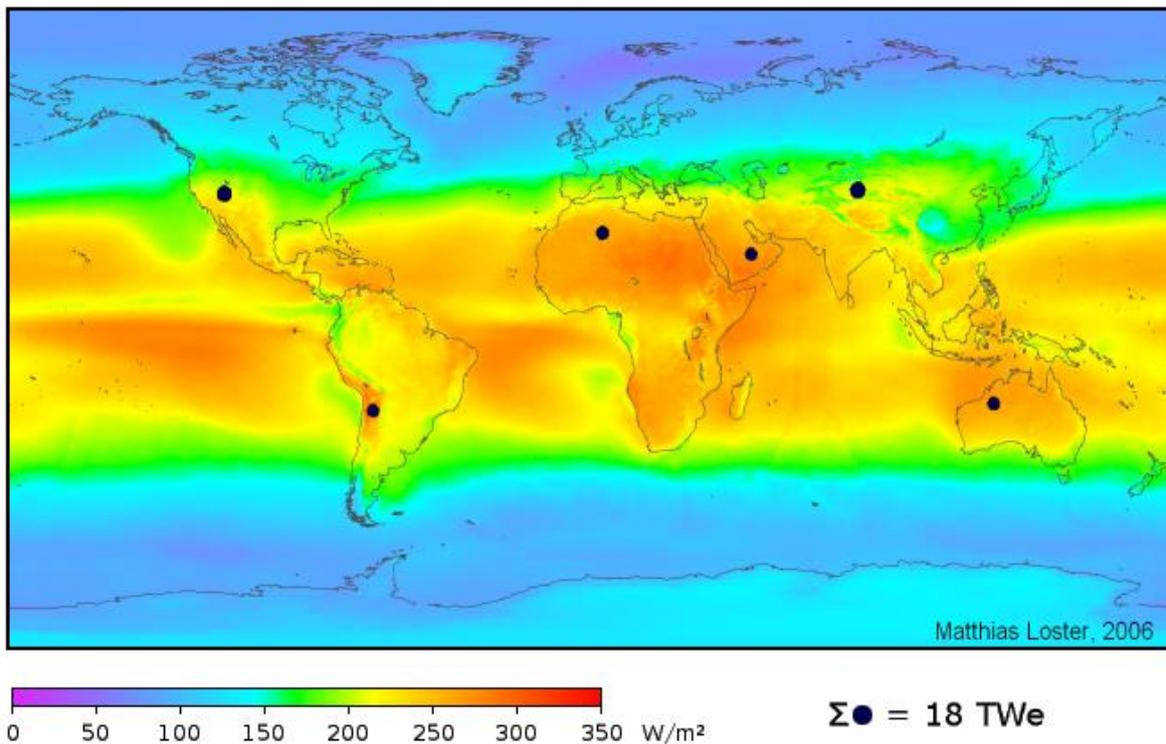
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2020)  
 Note: Primary energy is calculated using the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies energy production from fossil fuels.

**FigureI.2 : Part de la production d'énergie primaire produite par le solaire (données BP 2018)**

### **I.1.1 Valeurs énergétiques**

La Terre reçoit 174 pétawatts (10<sup>15</sup> watts, ou PW) de rayonnement solaire entrant dans la haute atmosphère (irradiation solaire), soit environ 340 W/m<sup>2</sup> à sa surface (rayonnement solaire incident moyen). Environ 30 % sont réfléchis dans l'espace, tandis que le reste est absorbé par les nuages, les océans et la masse terrestre. Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre est principalement réparti entre le spectre visible et les infrarouges proches, ainsi qu'une petite partie située dans les ultraviolets proches[1]. La majorité de la population mondiale vit dans des zones où le niveau d'irradiation solaire moyen (nuit comprise) est compris entre 150 et 300 W/m<sup>2</sup>, ce qui représente 3,5 à 7,0 kWh/m<sup>2</sup> par jour. En France, l'énergie totale reçue au cours d'une année est de 1 100 kWh/m<sup>2</sup>, tandis qu'à l'équateur, elle s'élève à 2 200 kWh/m<sup>2</sup>. [2]

L'énergie solaire totale absorbée chaque année par l'atmosphère terrestre, les océans et les masses terrestres est d'environ 3 850 zettajoules (10<sup>21</sup> joules, ou ZJ)[3]. En 2002, cela représente plus d'énergie en une heure que la consommation humaine sur une année. Pour comparaison, le vent contient 2,2 ZJ et la photosynthèse capture environ 3 ZJ par an dans la biomasse. La quantité d'énergie solaire atteignant la surface de la planète est si importante que, en un an, elle représente environ deux fois l'énergie obtenue à partir des ressources non renouvelables de la Terre — charbon, pétrole, gaz naturel et uranium combinés — exploitées de tout temps par l'homme. L'énergie totale utilisée par l'homme représente en effet, en 2005, 0,5 ZJ, dont 0,06 ZJ[4] sous forme d'électricité.



**Figure I.3 : Répartition quotidienne moyenne de l'énergie solaire reçue au sol sur Terre.**

### **I .1.2Rôle sur Terre**

Le rayonnement solaire est absorbé par la surface terrestre, les océans — qui couvrent environ 71 % du globe — et l'atmosphère. L'air chaud contenant l'eau évaporée des océans s'élève, provoquant une circulation atmosphérique ou une convection. Lorsque l'air chaud atteint une altitude élevée, où la température est basse, la vapeur d'eau se condense en nuages, puis s'écoule sur la surface de la Terre sous forme de pluie, complétant ainsi le cycle de l'eau. La chaleur latente de la condensation de l'eau réchauffe à son tour l'air ambiant et amplifie la convection, produisant des phénomènes atmosphériques tels que le vent, les cyclones et les anticyclones[5]. Le rayonnement solaire absorbé par les océans et les masses terrestres représente environ 240 W/m<sup>2</sup> et, ajouté à l'effet de serre, maintient la surface à une température moyenne de 14 °C. Par photosynthèse, les plantes vertes convertissent l'énergie solaire en énergie stockée chimiquement, qui

produit de la nourriture, du bois et la biomasse dont sont dérivés les combustibles fossiles.[6]

### **I .1.3Exploitation humaine**

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend tout d'abord de l'énergie électromagnétique (lumière visible, infrarouge, ultraviolet et autres rayonnements) émise par le Soleil et arrivant sur Terre, qui connaît des fluctuations décennales, saisonnières et ponctuelles. La latitude, la saison et l'heure influent ainsi sur la hauteur du Soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local. Enfin, cette nébulosité (nuages, brouillards, etc.) varie considérablement selon la géographie et les conditions météorologiques ; elle est forte à très forte dans les régions océaniques tempérées et subpolaires ainsi que dans les régions équatoriales, mais faible à très faible en période anticyclonique et dans les régions arides subtropicales ou polaires.

Ainsi le flux maximum d'énergie solaire reçu au sol terrestre se trouve-t-il sous les tropiques secs (ou arides), c'est-à-dire dans les déserts chauds où les conditions météorologiques et géographiques sont optimales : basse latitude, vaste espace, ensoleillement ininterrompu, ciel clair, grande sécheresse de l'air. Le Sahara, le plus grand désert chaud du monde, est la région de la Terre qui reçoit le plus amplement la chaleur et la lumière du Soleil[7]. C'est en effet la contrée du globe où la durée de l'insolation moyenne est la plus élevée (jusqu'à 4 300 h/an soit entre 97 et 98 % du jour)[8] et où l'irradiation solaire moyenne est la plus grande, qui atteint plus de 280 W/m<sup>2</sup> en moyenne sur l'année.

Or, les régions les plus ensoleillées sont rarement les plus consommatrices d'énergie. Le rapport solaire, défini comme l'énergie solaire reçue rapportée à l'énergie consommée localement, atteint ainsi à peine 100 pour les pays les plus consommateurs, mais plus de 10 000 pour certains pays du tiers monde. Si l'on tient compte de l'efficacité relativement faible des capteurs solaires, il ressort que

l'énergie solaire représente un gisement considérable pour les pays en développement, tandis qu'elle ne peut répondre que marginalement à la consommation des pays développés.

La collecte et le transport d'énergie depuis le Sahara vers les pays développés est donc envisagée. Elle bute néanmoins sur des obstacles techniques et politiques, et les projets comme Déserte ne sont pas encore d'actualité. Au contraire, les zones développées, à la consommation importante et disposant de la technique requise, voient des réalisations de plus en plus importantes apparaître à leurs confins. Ainsi, dans le désert des Mojaves (Californie et Arizona) se trouvent les plus grandes centrales solaires thermodynamiques au monde, notamment la centrale solaire SEGS, d'une puissance totale de 354 MW[9]. Par ailleurs, l'utilisation de traqueurs solaires permet d'augmenter considérablement le potentiel de l'énergie solaire dans des régions plus éloignées de l'équateur, tandis que la reconversion d'ombrières de parking en centrales électriques solaires et l'utilisation de toits d'habitations permet de répondre aux problèmes de place.

En 2000, le Programme des Nations unies pour le développement et le Conseil mondial de l'énergie ont publié une estimation de l'énergie solaire pouvant potentiellement être utilisée par les êtres humains chaque année, qui tient compte de facteurs tels que l'ensoleillement, la couverture nuageuse et les terrains utilisables par les humains. Selon elle, d'ici 2100, 70 % de l'énergie consommée sera d'origine solaire[10].



**Figure I.4 : Un héliostat de la centrale solaire Thémis.**



**Figure I.5 : La centrale solaire thermodynamique SEGS, dans le désert des Mojaves, en Californie.**

## **I.2 Conversion thermique de l'énergie solaire**

### **I.2.1 Principe de la conversion thermique.**

le principe de la **conversion thermique** de l'énergie solaire consiste à intercepter et absorber les photons solaires incidents par un matériau absorbant et le transformer en énergie thermique, celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz (dit « caloporteur ») qu'il transporte vers un réservoir de stockage de chaleur [11]

Deux modes de technologies sont envisageables :

#### **I.2.1.1 L'habitat solaire passif**

Leurs applications sont au chauffage et à la climatisation des locaux, l'architecture des bâtiments est conçue de telle sorte qu'ils optimisent naturellement ou « passivement » l'utilisation du solaire, sans faire appel à des fluides caloporteurs autres que l'air et à des dispositifs annexes de captation et de stockage.

#### **I.2.1.2 Capteurs plans**

Ils utilisent généralement l'effet de serre pour limiter les déperditions thermiques de l'absorbeur. Le verre est transparent pour le rayonnement visible, et laisse donc passer l'énergie solaire incidente, mais opaque pour le rayonnement infrarouge, ce qui a pour effet de piéger les calories absorbées.

Les températures de fonctionnement varient de 40 à 120 °C. L'absorbeur est composé d'une plaque métallique sur laquelle sont soudées des canalisations dans lesquelles circule le fluide caloporteur. Les déperditions thermiques vers la face avant du capteur sont réduites par un ou plusieurs vitrages et celles vers l'arrière par un isolant (Fig 4).

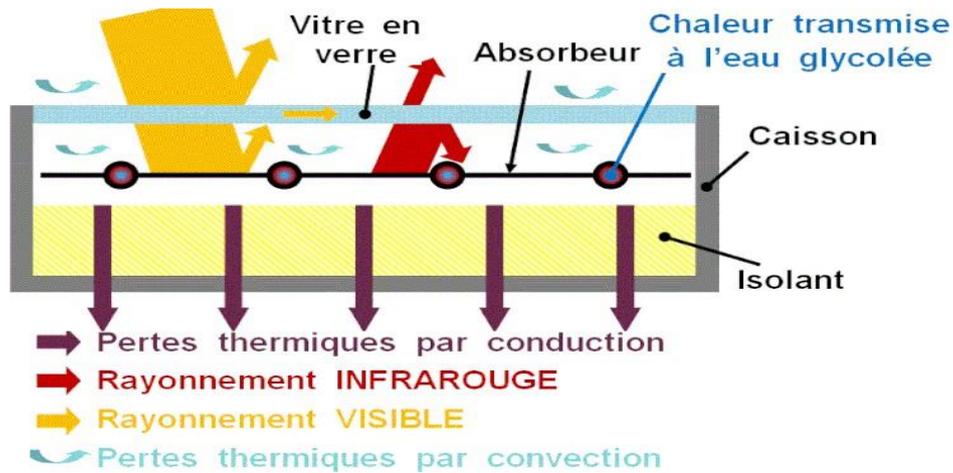


Figure I.6 Rayonnement Solaire

### I.2.1.3 Capteurs à concentration

Pour atteindre des températures supérieures à environ 120 °C, il est nécessaire de concentrer les rayons solaires par des éléments réfléchissants (miroirs) ou de lentilles.

La contrainte principale, outre le coût plus élevé des dispositifs, est le système de poursuite destiné à suivre le soleil dans sa course (Fig. 5 et 6)

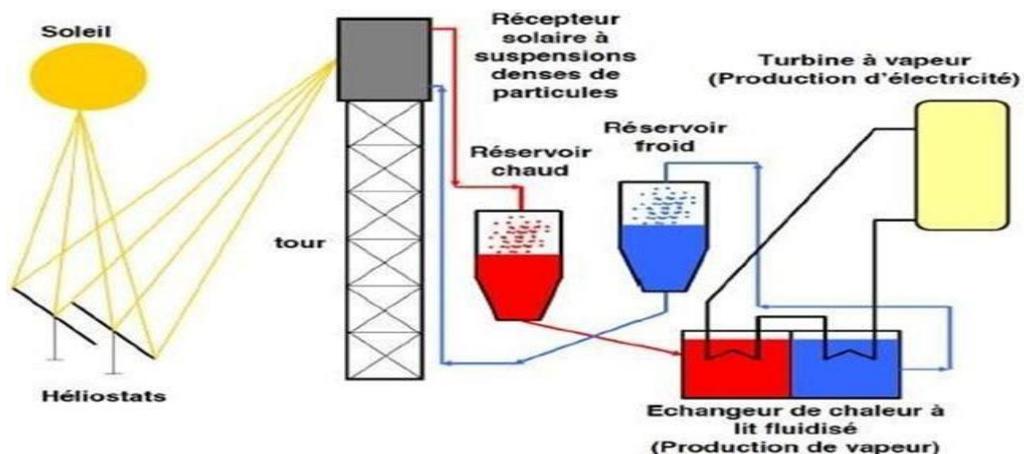
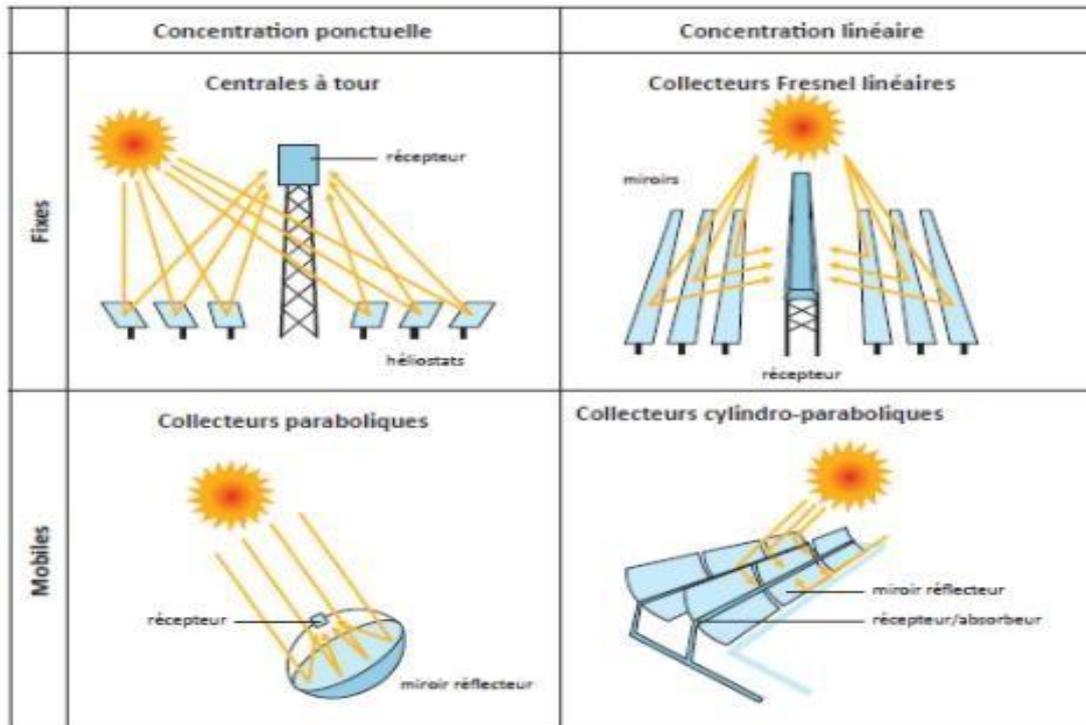


Figure I.7 Capteurs à concentration



**Figure I.8** Capteurs à concentration

### I.2.1.4 Capteurs sous vide

Un capteur solaire thermique plan sous-vide est composé:

- d'une série de tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air),
- d'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre,
- d'un tube en cuivre à l'intérieur du tube de verre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel) qui se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes (Fig. 7).

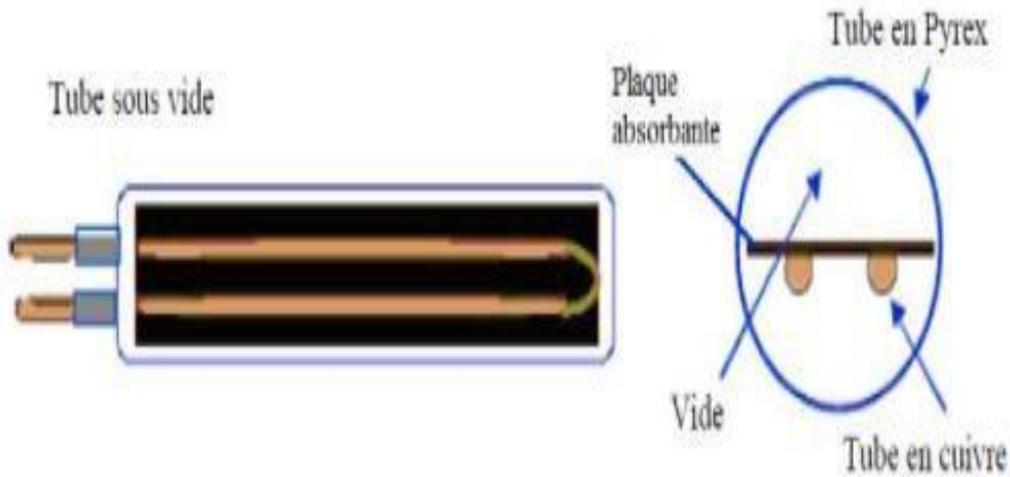


Figure I.9 Capteur solaire thermique plan sous vide

### I.2.1.5 Panneaux solaires thermiques domestiques

Est une surface qui capte les rayons du soleil pour réchauffer un fluide caloporteur placé sous les panneaux (Fig. 8).

Ce fluide chaud rejoint ensuite le ballon de stockage dans lequel il réchauffe l'eau chaude sanitaire utilisée dans vos robinets, lavabos, douches.

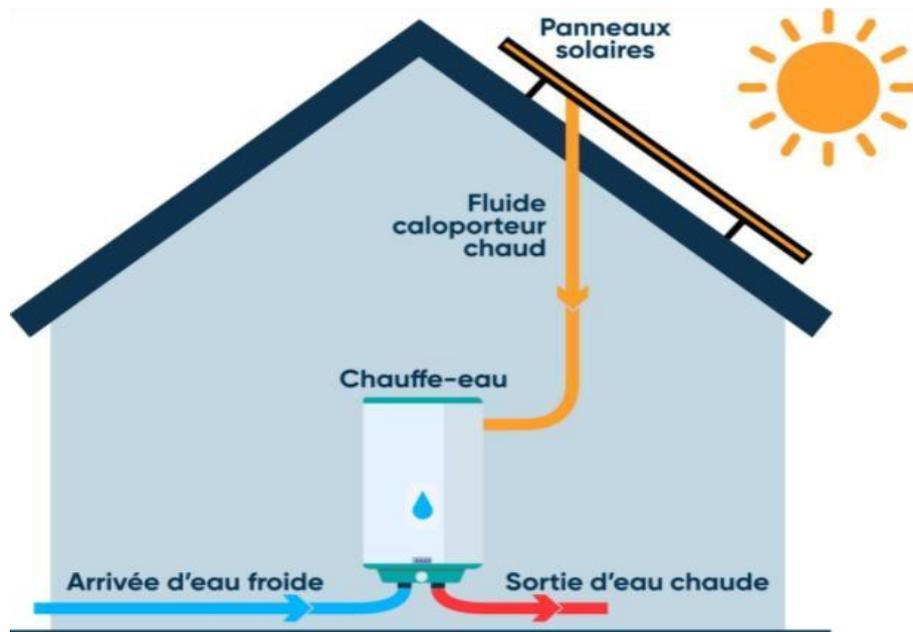


Figure I.10 Conversion thermique

## I.2.2 Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

### Introduction

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques. Effet photoélectrique : désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière[12] (Fig. 9).

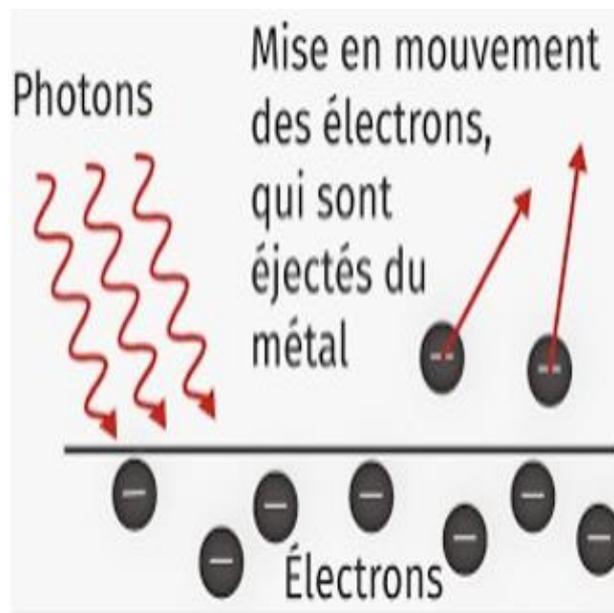


Figure I.11 Effet photoélectrique

### I.2.2.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " $\Delta E$ ".

L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  (en hertz), dont la longueur d'onde  $\lambda$  (en mètre) est égale à la célérité divisée par  $\nu$ , est exprimée par la relation :  $\Delta E = h \times \nu = (h \times c) / \lambda$   $h$  étant la constante de Planck c'est-à-dire  $6,63 \times 10^{-34}$  Joules par

seconde. Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

### I.2.2.2 Principe de la conversion Photoélectrique

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Fig. 10 L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit par la création d'une paire électron-trou. Ce qui entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. La jonction PN créée permet de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes (Fig. 10)

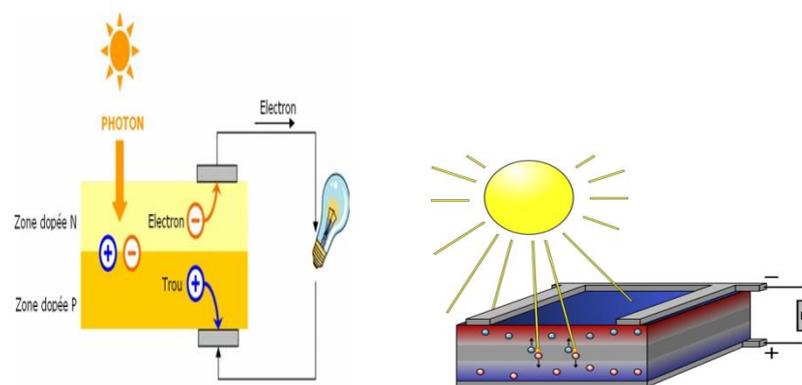
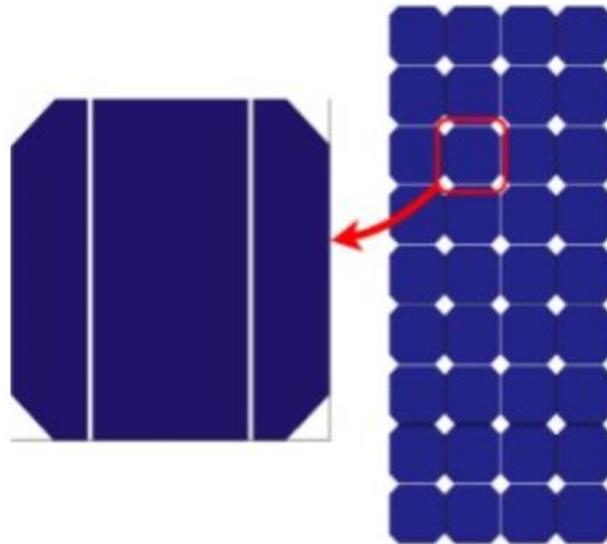


Figure I.12 Conversion photovoltaïque

### I.2.2.3 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière grâce à l'effet photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, à base de silicium (Si). Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour Une épaisseur de l'ordre du millimètre (Fig. 11).

- Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée (Fig. 12).
- Un panneau solaire photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement.
- Le rendement énergétique d'un panneau photovoltaïque est d'environ 10 à 20%



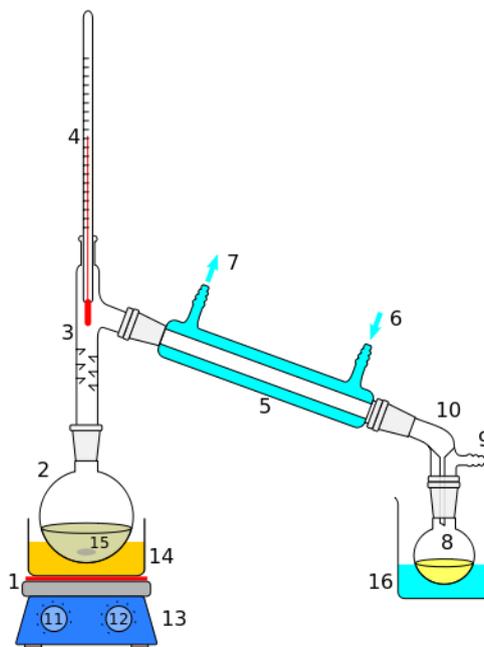
**Figure I.13 Cellule photovoltaïque**

### **I .3La Distillation**

La distillation est un procédé de séparation de mélange de substances liquides dont les températures d'ébullition sont différentes. Elle permet de séparer les constituants d'un mélange homogène. Sous l'effet de la chaleur ou d'une faible pression (loi des gaz parfaits), les substances se vaporisent successivement, et la vapeur obtenue est liquéfiée pour donner le distillat.

Dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, des opérations de « distillation » sont réalisées dans l'industrie pour obtenir entre autres du coke à partir de la houille, ou des gaz manufacturés[13]. Ces opérations doivent être plus justement appelées pyrolyse : le terme « pyrolyse » est apparu probablement au XIX<sup>e</sup> siècle[14] pour distinguer les opérations de décomposition ou thermolyse, d'un composé organique par la

chaleur pour obtenir d'autres produits (gaz et matière) qu'il ne contenait pas : dans la pyrolyse, le matériau est détruit. On peut supposer que par analogie, la cornue en verre utilisée dans les opérations de distillation donnera son nom aux cornues en matériau réfractaire utilisées dans les opérations de pyrolyse bien qu'il n'existe pas grand-chose de commun entre les deux.



**Figure I.14 : Distillation simple sans la colonne à fractionner, souvent utilisée par les chimistes.**

### **I .3.1 Histoire**

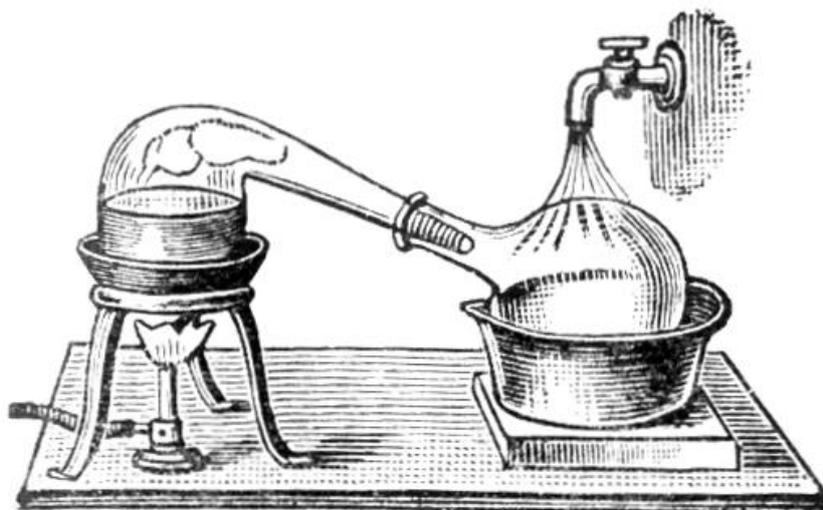
Au II<sup>e</sup> millénaire av. J.-C., la sublimation, qu'utilisent les Babyloniens pour préparer les parfums, est clairement attestée, mais la distillation n'est pas certaine[15]. L'eau produite par évaporation comme le dessalement de l'eau de mer est une technique envisagée et décrite par Aristote et Pline l'Ancien, puis par Alexandre d'Aphrodisie dès le III<sup>e</sup> siècle av. J.-C. Cependant, comme le souligne Forbes[16], il ne s'agit pas de la distillation au sens où on la conçoit actuellement (source de chaleur - séparation gaz/liquide - condensation) : elle n'apparaît qu'à l'aube du I<sup>er</sup> siècle de notre ère avec les alchimistes grecs. D'après Timée de Tauroménion, il semble que Denys l'ancien, tyran de Syracuse, adepte de la

boisson (qui aurait provoqué sa mort en 367 av. J.-C.), demandait un breuvage obtenu par une distillation.

Au Ier siècle, le grec Dioscoride décrit le procédé dans son ouvrage *De Materia Medica* : « L'huile de poix est obtenue en séparant la partie aqueuse qui se dépose sur le haut comme le fait le petit-lait. Cette partie aqueuse est enlevée lors de la cuisson de la poix en plaçant de la laine propre au-dessus d'elle. Cette laine devenue humide par l'action de la vapeur montante, est essorée dans un vaisseau et ceci dure tant que dure la cuisson de la poix ». D'autres méthodes sont appliquées, ainsi pour le mercure : « Le mercure est préparé à partir d'un produit appelé minium, qui est aussi appelé quoiqu'incorrectement cinabre. Une soucoupe de fer contenant du minium est placée dans un récipient en terre cuite et sur ce récipient est placée une flasque qui est mastiquée tout autour avec de la glaise. Un feu de charbon de bois est ensuite entretenu sous le récipient. Une fois que la suie qui s'est collée au couvercle a été grattée et refroidie, elle se transforme en mercure ». Mais c'est surtout la demande croissante en liqueurs au Bas-Empire qui entraîne le développement des distilleries<sup>6</sup>. La première description précise d'un alambic est due à Zosime de Panopolis au IVe siècle.



**Figure I.15 : Une colonne à distiller au musée Stella Matutinal de Saint Leu, à La Réunion.**



**Figure I.16 : Distillation à la cornue dans un alambic.**



**Figure I.17 : Une colonne à distiller dans un musée en Ukraine.**

### **I .3.2 Distillation à la cornue dans un alambic**

Une colonne à distiller dans un musée en Ukraine.

Au VIII<sup>e</sup> siècle, les alchimistes du Moyen-Orient usèrent de la distillation afin de purifier certains produits chimiques utilisés dans l'artisanat : des huiles ou esters (pour les parfums) et de l'alcool.

Parmi les premiers d'entre eux, on trouve Jabir ibn Hayyan (dit Geber en Occident) qui, vers l'an 800, mit au point de nombreux instruments et des méthodes chimiques toujours en usage aujourd'hui. En particulier, son alambic, précurseur des raffineries modernes, est le premier appareil utilisant une cornue pour purifier les substances : le bec de l'alambic est allongé (d'où le nom de cornue) afin d'améliorer le refroidissement et d'obtenir ainsi une plus grande quantité de produit distillé [réf. nécessaire]. Ce principe inspirera les micro-distilleries modernes comme la colonne Hickman.

La pratique de la distillation du pétrole est attestée vers 670, date à laquelle Calliniques de Byzance aurait produit une matière bitumineuse qui, mélangée à du salpêtre donne le redoutable feu grégeois dont l'usage militaire se répand rapidement. C'est également un autre alchimiste perse, Rhazès, qui au IX<sup>e</sup> siècle, distille le pétrole ou « bitume de Judée », d'où il tire du kérosène, tandis que

l'entraînement à la vapeur est une invention due à Avicenne au XI<sup>e</sup> siècle, pour l'extraction d'huile essentielle.

La distillation du vin est attestée en Occident dans la ville de Salerne dès le XII<sup>e</sup> siècle (alors que l'Asie centrale semble la pratiquer depuis le III<sup>e</sup> siècle et la Chine depuis le VII<sup>e</sup> siècle). On obtient ainsi l'alcool éthylique appelé « eau de vie » ou « eau ardente » au Moyen Âge. Outre son usage comme boisson forte, la médecine médiévale l'emploie comme remède.

Au XIV<sup>e</sup> siècle, l'introduction de dispositifs de refroidissement dans les diverses parties de l'alambic facilite la condensation et évite la surchauffe.

En 1500, l'alchimiste allemand Hiéronymes Brunschvicg publie le premier livre consacré à cette technique, le Liber de Artedestillandi, dont la seconde édition de 1512 sera fortement augmentée.

En 1651, le médecin John French (1616-1657) publie The Art of Distillation, le premier traité anglais sur la pratique de la distillation, bien qu'on ait pu remarquer qu'il empruntait beaucoup à l'ouvrage de Brunschvicg. Les diagrammes illustrant le livre insistent davantage sur le travail des ouvriers que sur le fonctionnement de l'installation.

À mesure que l'alchimie se constituait en science avec la chimie, les récipients appelés cornues équipèrent de plus en plus les appareils à distiller. Alambics et cornues sont des récipients munis d'un bec latéral allongé pointant vers le bas faisant condenseur à air : ils servent à condenser le distillat que l'on ne récupère goutte à goutte à la sortie du tube.

Plus tard, les alambics en cuivre firent leur apparition ; leurs joints rivetés étaient maintenus étanches par différents expédients, comme de la mie de pain obtenue à partir de farine de seigle. Ces alambics comportaient souvent un serpent traversé d'eau froide ajusté à l'extrémité du bec de la cornue qui, accélérant la condensation, augmentait le rendement de la distillation : c'est cet appareil que les Anglais appellent pot stills.

De nos jours, les cornues et les alambics ont été largement supplantés dans l'industrie par des méthodes de distillation beaucoup plus efficaces. Toutefois, l'alambic est toujours apprécié pour l'élaboration de fines et de liqueurs comme le cognac, le Scotch whisky et certaines vodkas. Les alambics, faits de différentes matières (bois, poterie, acier inox) sont également utilisés de par le monde par les petits producteurs. On vend encore de petits alambics pour la production familiale d'eau de fleur d'oranger ou d'huile essentielle.

Au début du XIXe siècle, les chimistes français jetèrent les bases de l'analyse chimique moderne, notamment en montrant l'importance du préchauffage et de la rétroaction, puis en 1830 un brevet anglais fut délivré à Aeneas Coffee pour une colonne de distillation de whiskey, qui fonctionnait en continu et que l'on peut considérer comme l'archétype des raffineries de pétrole modernes. En 1877, Ernest Solvay obtint un brevet américain (U.S. Patent) pour une tour de distillation d'ammoniaque, dont il appliqua le principe les années suivantes aux huiles et aux spiritueux.

La promotion du génie chimique en tant que discipline académique à la fin du XIXe siècle amena une étude proprement scientifique des procédés de distillation : ainsi, la distillation la plus simple, à l'application la plus connue (alambic), a été étudiée par le physicien John Rayleigh. Puis au début du XXe siècle, l'industrie pétrolière donna l'élan nécessaire pour développer des procédés détaillés comme la méthode McCabe-Thiele et l'équation de Fenske . Dans la course à l'amélioration du procédé de distillation pour séparer des constituants dont les points de fusion sont toujours plus proches, la colonne de distillation à bande tournante, permettant les distillations les plus performantes à ce jour, a été élaborée dans les années 1930.

### **I .3.3 Principe**

Le procédé utilise la différence de volatilité (capacité à s'évaporer selon la température) entre les constituants afin de les séparer : le composé le plus volatil

s'évaporeront plus facilement et composeront la majeure partie des vapeurs. Il est ainsi possible de créer une phase gazeuse ayant une composition différente du mélange initial. Par condensation de ces vapeurs, un liquide appelé distillat peut être récupéré avec une concentration élevée du composé le plus volatil.

Le distillat n'est pas un produit pur : il contient une certaine proportion des autres composés du mélange initial. Il faut dès lors répéter l'opération d'évaporation-condensation avec le distillat afin de concentrer davantage le composé le plus volatil. Pour ne pas répéter l'opération, et séparer proprement les composants du mélange en une seule passe, on utilise une colonne de distillation et ce procédé se nomme distillation fractionnée ou rectification.

En fonction des propriétés physiques des constituants, il arrive que des composés aient des volatilités constantes par rapport au mélange initial, et que les vapeurs d'un tel mélange gardent toujours la même composition même si on répète l'opération évaporation-condensation plusieurs fois. Il s'agit d'un mélange azéotropique qui nécessite des conditions spéciales afin de séparer les composants (voir distillation azéotropique).

La distillation peut être effectuée de plusieurs manières : discontinue, continue, sous vide.

### **I .3.4 Distillation discontinue**

Une distillation discontinue est une distillation où le mélange à séparer est chargé une fois dans l'installation et d'où les composants sont distillés les uns après les autres. Ceci implique un changement permanent de la composition du mélange initial et des profils de température.

### **I .3.5 Distillation continue**

Une distillation continue est une distillation où l'installation de distillation est continuellement alimentée avec le mélange à séparer. Ce type d'installation permet de travailler sans modification des profils de composition ainsi que de température.

### **I .3.6 Distillation sous vide**

Certains produits sont trop peu volatils à pression ambiante ou se décomposent avant de s'évaporer du fait de leur haut point d'ébullition. Dans ce cas, la pression de l'installation est réduite à l'aide d'une pompe à vide afin de réduire le point d'ébullition.

### **I .3.7 Distillation industrielle**

La distillation industrielle est un procédé de raffinage qui consiste à traiter le pétrole brut préalablement chauffé à 370 °C afin d'en séparer les différentes fractions. Après vaporisation, il est envoyé dans une tour de distillation atmosphérique. Chaque niveau de température correspond à une étape du fractionnement et donne un produit spécifique : les produits légers sont recueillis dans la partie supérieure de la tour (butane et propane, essence légère ou naphta), les produits moyens (essence lourde, kérosène et gazole) sont récupérés en soutirage latéral, et le résidu atmosphérique est recueilli au fond de la tour. Cette séparation n'est pas suffisante pour donner toutes les qualités requises à chacun des produits obtenus. Interviennent alors le craquage et le reformage pour les carburants.

En procédé industriel et dans le cas d'une distillation discontinue, les premières vapeurs qui passent en tête de colonne sont appelées « têtes de distillation », ensuite vient le cœur (souvent le cœur est la substance qui est recherchée dans le mélange introduit dans le distillateur), puis en fin de distillation apparaissent « les queues de distillation ».

Il existe aussi des techniques de distillation sous vide qui visent à abaisser les températures d'ébullition des différents constituants du mélange à distiller, et donc permettent ainsi d'éviter (ou de réduire) les risques de dégradation thermique. De même, des distillations peuvent être effectuées sous pression afin de permettre la séparation de composés très volatils (comme les gaz).

Lorsque les températures d'ébullition sont très voisines, on peut avoir intérêt à utiliser un processus de distillation fractionnée, qui consiste en plusieurs étapes de raffinements successifs. Il est également possible d'introduire une partie du distillat en tête de colonne (dans le cas d'une distillation continue) afin d'améliorer la pureté de la phase vapeur.



**Figure I.18 : Colonnes de distillation industrielles.**

#### **I .4 Association des procédés a distillation avec l'énergie solaire**

Pour leur fonctionnement, les procédés à distillation nécessitent pour la grande part de l'énergie thermique pour assurer le chauffage de l'eau salée. Pour l'eau de mer, par exemple, 100 à 50 thermies par m<sup>3</sup> d'eau produite suivant le rendement de l'installation. De plus cette énergie thermique doit être fournie à un niveau de température relativement faible, entre 120

et 60 °C suivant la technologie adoptée. La source de chaleur peut être fournie, dans la cas d'un accouplement solaire, par des capteurs solaires plans ou à concentration. Les procédés les plus utilisés et qui sont susceptibles d'être

accouplés à une source d'énergie solaire sont : - La distillation solaire direct à effet de serre qui constitue un procédé proprement solaire. - Les procédés à distillation classique tel le procédé à Multi-stage flash, à multiple-effets, à compression de vapeur.

#### **I .4.1 La distillation solaire direct à effet de serre**

Ce procédé consiste à chauffer de l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais son rendement est relativement faible, 4 à 5 litres/jours.m<sup>2</sup>. Ils existent cependant deux types de fabrications de distillateurs, ces derniers peuvent être construit soit : - Sous forme de produit modulable, il s'agit généralement d'un bac (plastic, tôle, bois... ) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage supérieurement. Plusieurs distillateurs peuvent être alimentés simultanément pour former une unité de distillation. Le nombre de distillateurs dépend de la capacité d'eau produite désirée. Ce modèle est utilisé seulement de très petites capacités, plusieurs dizaines de litres par jours. Il est pratique quand les besoins en eau distillée ne sont pas très importants (laboratoire d'analyse, parc auto ...). Ils existent cependant plusieurs variantes, on peut citer le distillateur plan, en cascade, à mèche, à multiple effets, sphérique... etc. - Quand les besoins sont plus importants, plusieurs centaines de litres/jour, les distillateurs sont construit en maçonnerie/béton sous de grands bassins vitrés. La surface dépend de la quantité d'eau distillée voulue. Un certain nombre d'applications sont effectuées généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles. L'analyse théorique est basée sur le bilan thermique du distillateur qui permet de déterminer son rendement en fonction des différents paramètres.

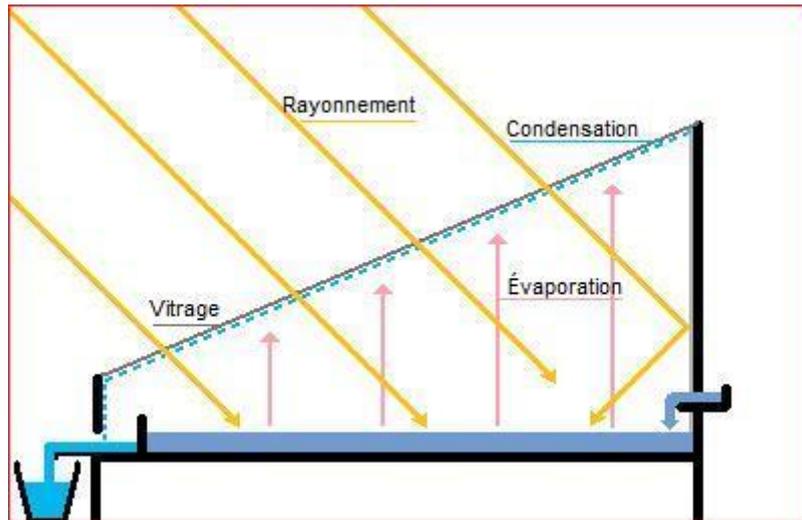


Figure I.19 : Etude expérimentale d'un distillateur solaire

#### I .4.2 La distillation à détente successives ou multi-étage flash (MSF)

Ce procédé, généralement rentable seulement pour de grandes capacités de production (plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup>), est très peu souple et nécessite une durée de mise en régime inadéquat pour une application solaire.

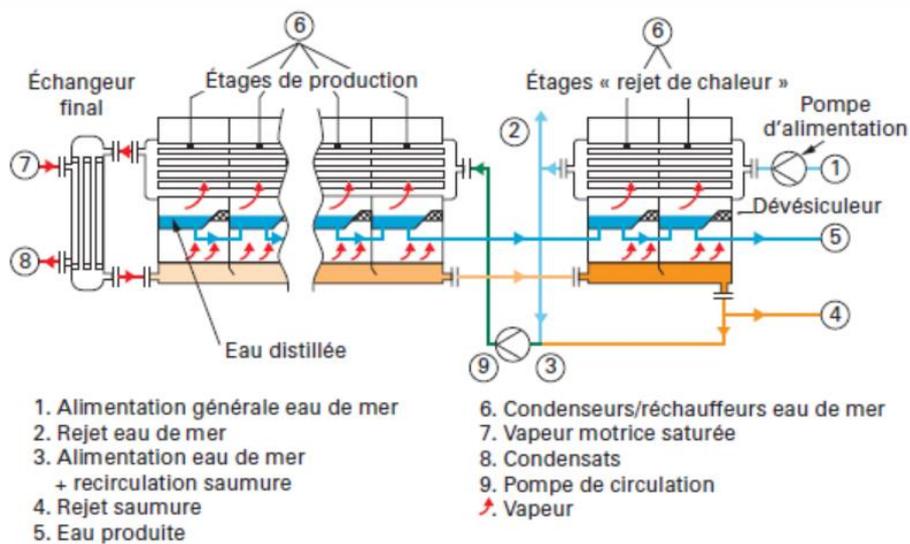


Figure I.20 : désodorisation - évaporateur d'eau de mer, distillation à détente étagée à recirculation ( MSF )

### I .4.3 La distillation par compression de vapeur

C'est un procédé qui comporte une série d'évaporateurs, ses performances sont cependant améliorées en recyclant la vapeur issue du dernier effet (au niveau thermique le plus bas) en la comprimant pour ensuite l'utiliser comme vapeur de chauffe au premier effet. Ce procédé peut utiliser de l'énergie solaire comme source de chaleur, mais nécessite une énergie supplémentaire pour assurer la compression de vapeur. Celle-ci s'effectue soit avec un compresseur mécanique (compression mécanique) ou un éjecteur de vapeur (thermocompression).

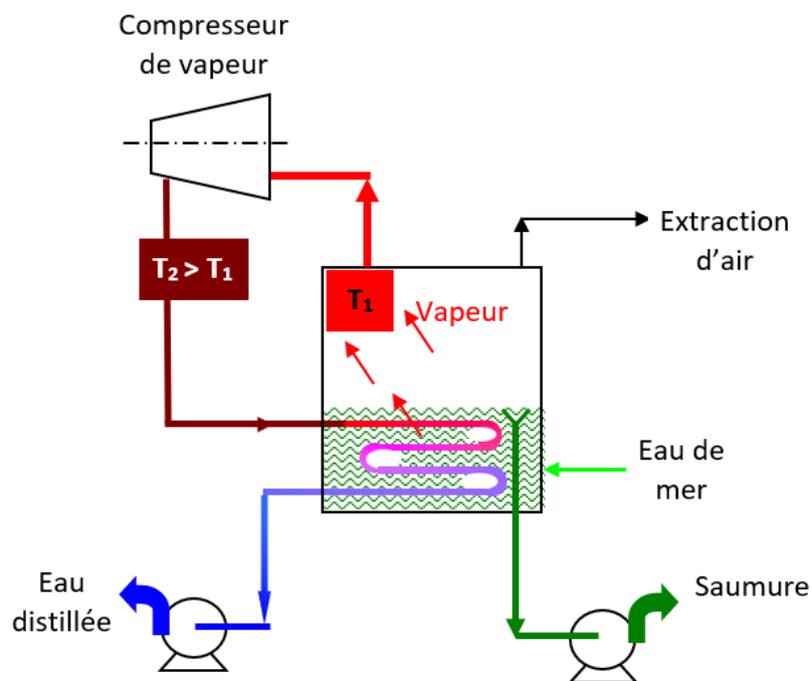


Figure I.21 : Distillation par compression de vapeur

### I .4.4 La distillation par multiple effets

Dans cette catégorie, on distingue deux de procédés :

Les uns utilisent des tubes verticaux, les autres des tubes horizontaux. L'avantage revient aux tubes horizontaux pour une puissance de pompage moindre et un coefficient global d'échange thermique plus important.

Ce procédé consiste à un ensemble d'effets successives où la vapeur produite dans un effet est utilisée pour chauffer l'eau de l'effet suivant en s'y condensant, l'apport thermique initial est fourni à l'effet de tête (bouilleur). De part sa simplicité et sa souplesse de fonctionnement, ce procédé est le mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire. Cette adaptation peut se faire : - soit avec des capteurs solaires plans pour les petites unités allant jusqu'à plusieurs m<sup>3</sup> /jour. - soit avec des capteurs à concentration pour des capacités plus importantes. Un stockage thermique est souvent utilisé, sous forme de réserve d'eau chaude, pour permettre d'avoir une certaine autonomie de fonctionnement en régime permanent ou intermittent.

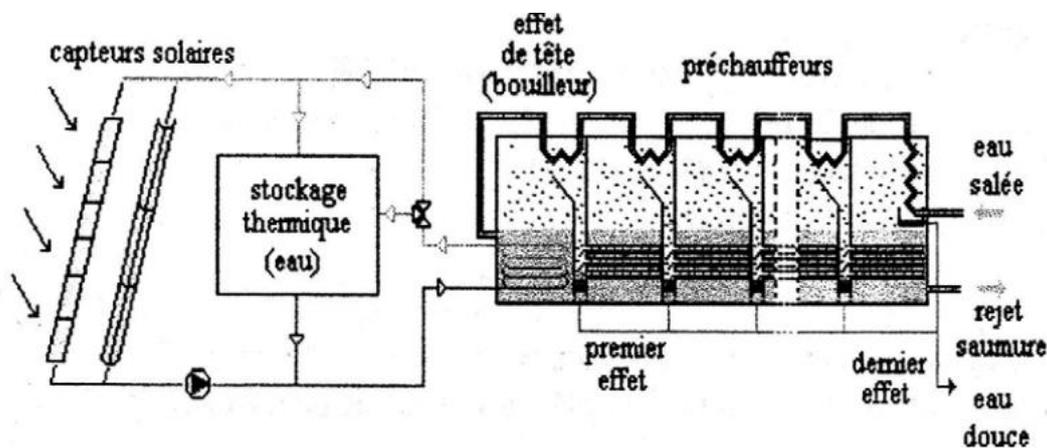


Figure I.22 : Schéma d'une installation de dessalement par Multiple-effets accouplés à des capteurs solaires[17]

#### I .4.5.Paramètres de conception

- capacité de l'installation : choix du procédé, choix du type de capteurs, choix du mode de fonctionnement (intermittent ou permanent), l'utilisation ou non d'un système de stockage, idée sur la température de tête de fonctionnement...
- nature de l'eau à traiter : choix du prétraitement, taux de conversion et rapport de performance
- nombres d'effets : considérations technico-économiques
- nature et situation socio-économique du site : choix des matériaux, degré d'automatisme du système

# **Chapitre II**

## **Les distillateurs solaires**

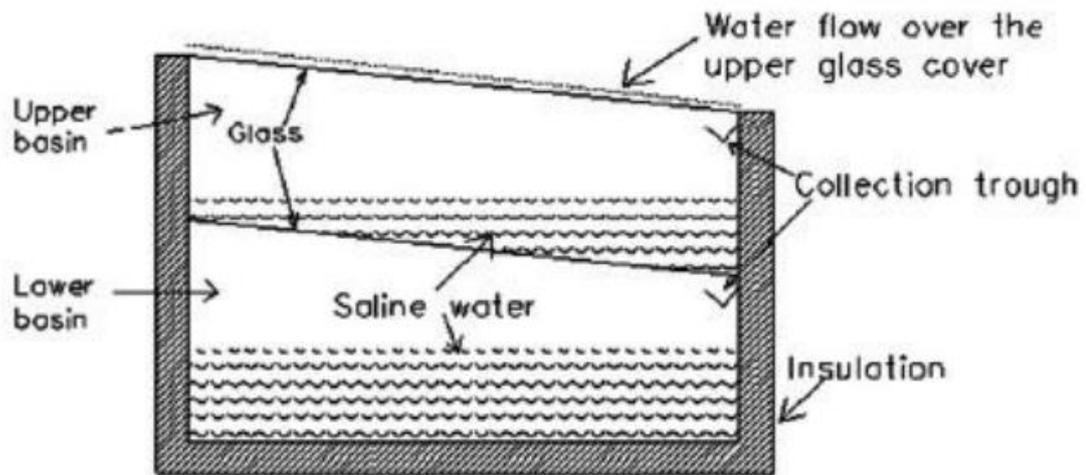
## **II .1 Classification des distillateurs solaires**

- **Distillateurs solaires passifs**
- **Distillateurs solaires actifs**

## **II .1.1 Distillateurs solaires passifs**

Dans ce type de distillateur solaire, la productivité est augmentée par l'augmentation du nombre d'effets (étages). Al Mahdi a effectué une étude sur l'effet du nombre de bassins sur la productivité journalière concernant ce type de distillateurs solaires où il a été constaté que le distillateur solaire à double bassin a donné un pic plus élevé dans la productivité. Cependant, les distillateurs solaires à triples et quadruples bassins continuent à produire des quantités appréciables de distillat durant la nuit, ce qui conduit à des productivités journalières plus élevées. Néanmoins, si on fournissait un bassin en plus que les quatre existants, cela ne donnerait aucun effet significatif sur la productivité. [17] ont présenté effectué une étude sur un distillateur solaire à double bassins à travers l'examen de ses performances et ce pour différents systèmes et conditions climatiques dont les résultats ont indiqué que le distillateur solaire à double bassins donne une performance plus supérieure à celle d'un seul bassin de l'ordre de 36 %. En outre, la productivité du même distillateur augmente rapidement avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant jusqu'à 4 cm, et au delà de cette valeur elle commence l'augmentation devient lente. Une Etude expérimentale [17] sur l'effet de la zone d'évaporation sur le rendement a montré un gain de l'ordre de 19,6 % lorsque la dite zone est multipliée par quatre, et un gain asymptotique (zone infinie) de l'ordre de 30,2% . L'étude suggère aussi que ces types de distillateurs solaires avec des surfaces d'évaporation élargies, peuvent utiliser l'énergie thermique à moindre coût et ce à partir de sources ayant des températures relativement faibles telles que les étangs solaires. Le principal facteur qui influe sur le taux de la production d'un distillateur solaire à double effet est la température de la surface de condensation de la vitre, où, en effet, la réduction de la température de la vitre conduit vers une augmentation de la productivité. Le processus de l'écoulement de l'eau au dessus de la couverture en verre induit un bon effet sur le rendement

et l'efficacité du système. Ainsi une faible température de la surface de la vitre fait augmenter la circulation de l'air à l'intérieur du distillateur solaire tout en améliorant le transfert de chaleur par convection et par évaporation entre l'eau du bassin et la vitre, de même qu'on peut constater que le refroidissement de la surface inférieure de la vitre fait augmenter la condensation.

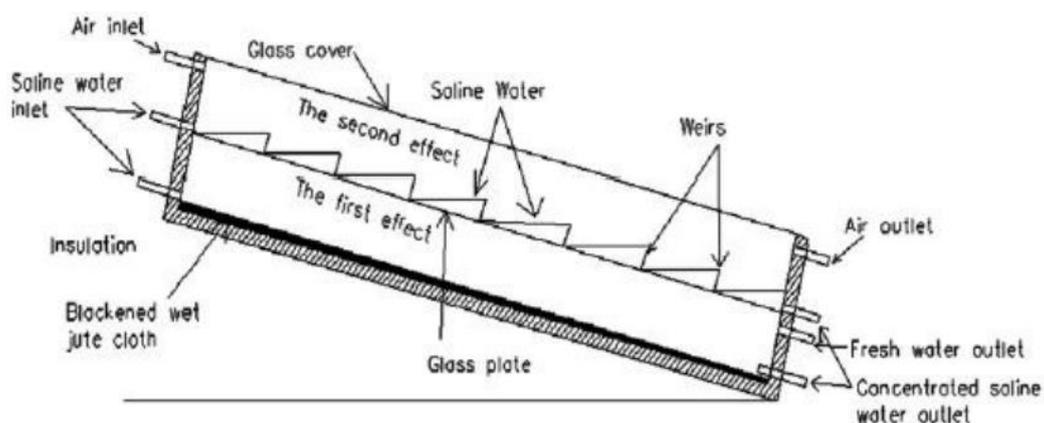


**Figure II.1: Distillateur solaire à double effets (l'eau s'écoule sur la couverture supérieure)**

La température de la couverture en verre est réduite et la productivité est augmentée soit par un écoulement continu ou par écoulement intermittent de l'eau de refroidissement non traitée (à l'état brut) sur la couverture. L'eau de refroidissement gagne de la chaleur latente à partir de la condensation de l'eau et la régénère dans le bassin. Certains résultats ont montré que l'écoulement de l'eau fait augmenter le taux de production de 20%. D'autres ont montré résultats que l'utilisation d'un film d'eau en écoulement fait augmenter l'efficacité du distillateur solaire de plus de 20%. Afin d'utiliser l'énergie thermique de l'eau en écoulement, une vitre supplémentaire est prévue au-dessus de la couverture principale, il se produit, par conséquent, un effet supplémentaire dans le distillateur solaire conduisant à une augmentation de la productivité. La Régénération de l'eau au niveau de ce type de distillateur solaire accompagnée

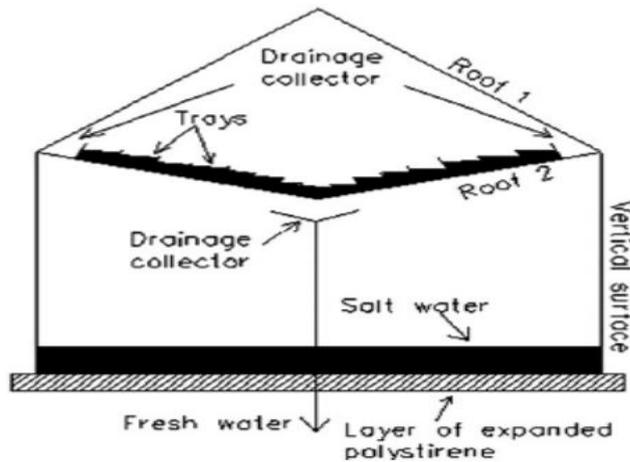
d'une faible profondeur d'eau conduit à une productivité plus élevée. Les chercheurs de la référence[17], ont étudié l'effet de rajout de colorant dans le distillateur solaire à double bassins, où ils ont constaté que l'addition du colorant fait augmenter l'efficacité du système de 10% et que le coefficient de transfert de chaleur par évaporation devient une fonction variable très fortement dépendante de la température, tandis que les coefficients de transfert de chaleur par convection et par rayonnement varient peu avec la température. La performance du type de distillateur à multiples bassins est quasiment une fonction fortement dépendante de la masse d'eau utilisée dans le bassin. La réduction de la masse d'eau dans le bassin fait augmenter la production de distillat. Ont étudié la performance d'un distillateur solaire à double bassin et ils ont constaté que sa production totale est fortement dépendante de la profondeur de l'eau au niveau du bassin inférieur. Pour une profondeur de l'eau amoindrie, le rendement a été amélioré, mais le processus de production de la distillation a cessé après le coucher du soleil. Pour plus grandes profondeurs d'eau, la production de distillat est réduite, mais le processus de distillation continue à fonctionner même après le coucher du soleil.

les résultats obtenus ont montré que la meilleure efficacité journalière maximale est revenue au distillateur à triple effets suivie par celle du distillateur à double effets et ensuite vient le distillateur à simple effet avec moins d'efficacité.



**Figure II.2 : Distillateur solaire à double effet surélevé [17]**

La figure montre le type de distillateur solaire à double effets, qui est conçu et étudié par Cappelletti[17].et dont le bassin supérieur ayant la forme ‘V’. L'eau condensée du bassin inférieur est recueillie à son milieu. Le résultat de cette expérience montre que l'efficacité obtenue est de l'ordre de 16%, en raison d'une faible température de l'eau au niveau du bassin (environ 50 °C)



**Figure II.3 : Distillateur solaire à double effets (bassin supérieur prend la forme d'un 'V').**

élaboré une étude comparative sur l'effet des paramètres qui influent sur un distillateur solaire de type asymétrique et à double effets, et sur un distillateur solaire symétrique à simple effet. Ils ont constaté que les paramètres optimums obtenus sont : une épaisseur de l'isolant de 0.10 m et un angle d'inclinaison de la couverture en verre de 23° et avec une valeur minimale de la profondeur de l'eau ont donnés des productions de l'ordre de 4.15kg/m<sup>2</sup> /jour et de 6 kg/m<sup>2</sup> /jour, pour respectivement les distillateurs solaires à simple et à double effet ont été obtenues

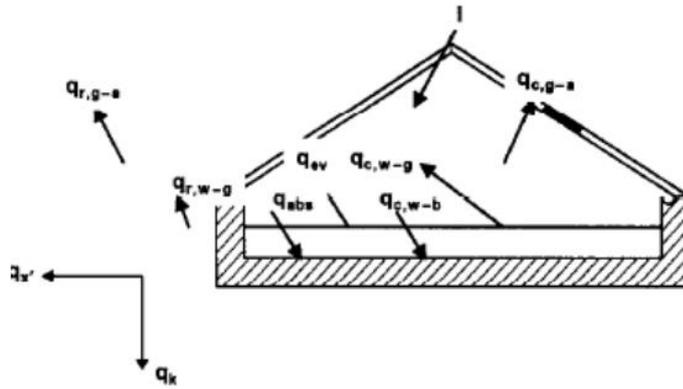


Figure II.4: Distillateur solaire symétrique à double pente

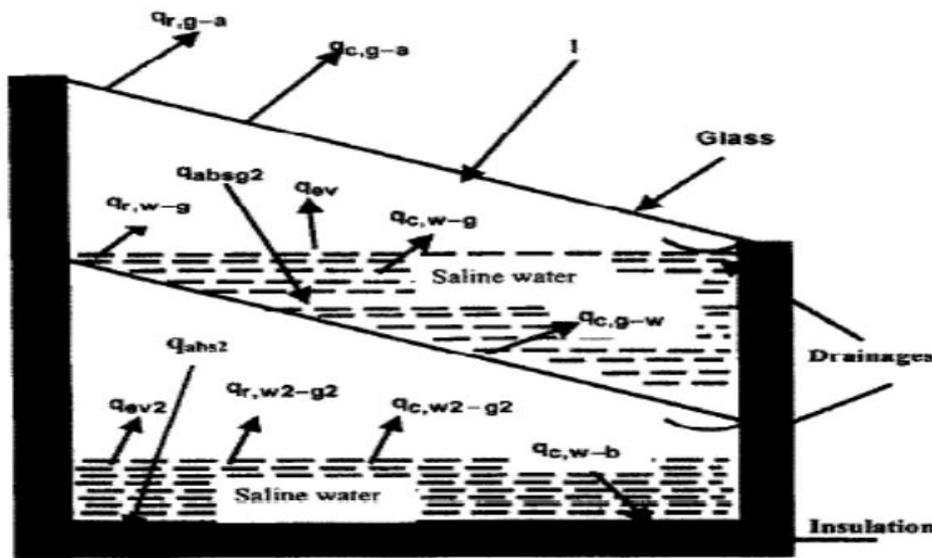


Figure II.5 : Distillateur solaire type asymétrique à double effets.[17]

D'autres ont mené une étude théorique sur un type de distillateur à multiple effets où ils ont conclu que l'utilisation de ce type de distillateur améliore la productivité. Dans une autre étude expérimentale sur la performance de deux types de distillateurs à simple bassin et à double bassins, les résultats ont montré qu'une augmentation du taux de la production est obtenue par le distillateur solaire à double effets, ils ont en plus constaté que l'isolation a un effet significatif sur la productivité, en particulier pour le type à double bassins. ont étudié l'effet d'un rajout d'un bassin supplémentaire au type de distillateur à double pente. Les résultats obtenus montrent que la température de l'eau et celle de la vitre diminuent

avec l'augmentation de la capacité thermique de la masse d'eau dans le bassin d'où le rendement diminue également. La production journalière augmente avec la diminution de la capacité calorifique de la masse d'eau dans le bassin supérieur grâce à une meilleure utilisation de la chaleur latente de vaporisation. Le rendement journalier du bassin inférieur est plus élevé que celui du bassin supérieur. L'efficacité du distillateur solaire à double bassins est sensiblement plus élevée que celle d'un distillateur solaire à bassin unique. Il existe une variation significative de l'efficacité avec l'augmentation de la température de l'eau du bassin inférieur de l'ordre de 30 °C à 38 °C.

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

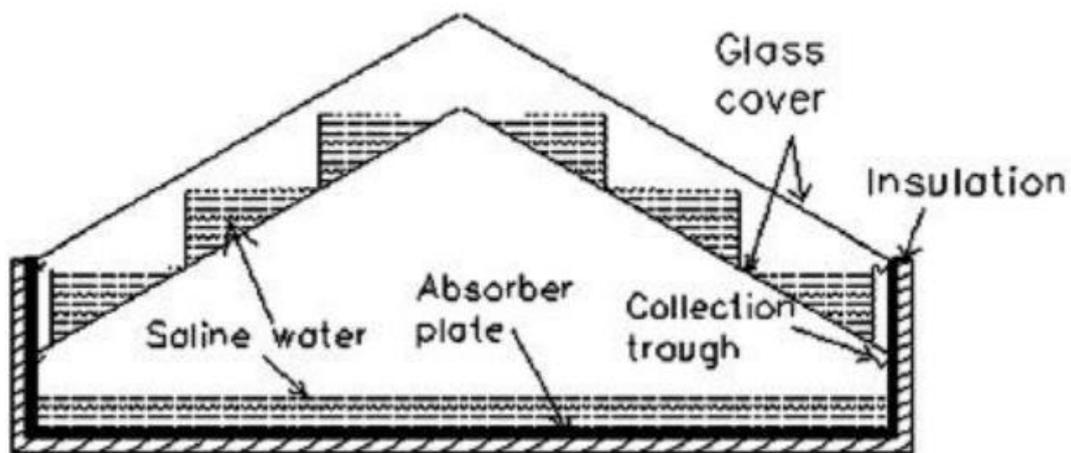


Figure II.6 : Distillateur solaire à double effet, à double pente.

## II .1.2 Distillateur solaire actif

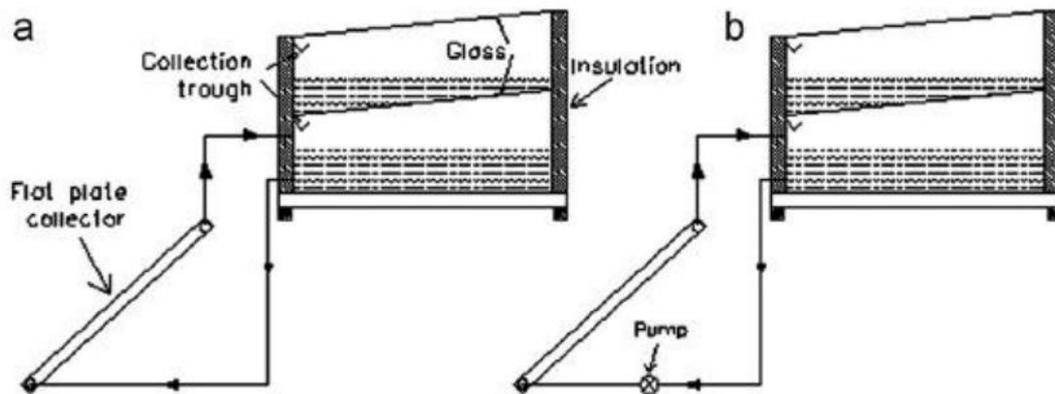
### II .1.2.1 Distillateur solaire actif à multiple bassin :

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

### II .1.2.2 Distillateur solaire Actif à multiple bassin muni d'un capteur plan :

Le chercheur de la référence[17] a étudié l'effet du distillateur solaire à double bassins avec de l'eau qui s'écoule sur la couverture en verre et utilisant un capteur

plan pour fournir de l'eau chaude au bassin inférieur. Il a constaté que l'utilisation d'un capteur plan donne un rendement plus élevé de 50% qu'un distillateur solaire normal et à double effets. Il a également observé que le rendement du distillateur reste élevé malgré la déconnexion du capteur pendant les heures non ensoleillées ce qui permet d'éviter les pertes de chaleur à travers le capteur. a réalisé un concept d'un distillateur solaire à double effets avec et sans capteur plan (thermosiphon et mode à circulation forcée) . Il a conclu que la performance du système en mode à circulation forcée est légèrement meilleure que celle à thermosiphon. Il a également suggéré d'utiliser le mode à thermosiphon dans les endroits où l'électricité n'est pas disponible



**Figure II.7 : Distillateur solaire type actif, couplé à un capteur par mode de circulation**

**a) à thermosiphon**

**b) à circulation forcée.**

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

écoulement. Ils ont obtenu un rendement élevé de 3,34 kg/m<sup>2</sup>/h dans le bassin inférieur à midi, en raison de la température de l'eau remarquablement élevée à cette heure (95 ° C)

Avec la diminution des masses d'eau dans le bassin inférieur, la température de l'eau d'exploitation est améliorée, ce qui fait augmenter le rendement et l'efficacité. Le rendement journalier augmente avec l'augmentation de la surface des capteurs, ce qui engendre une augmentation de l'énergie thermique dans le bassin. D'autres travaux ont conclu que l'intégration d'un capteur plan au distillateur solaire à double effets avec un débit d'eau circulant sur la couverture en verre de bassin supérieur produit un maximum de distillat. Le distillateur solaire fonctionnant en mode à double effet sans capteur plan n'améliore pas de manière significative la production journalière à cause des difficultés, raisonnables, dues au maintien d'un débit d'eau faible et uniforme sur la couverture en verre (10 ml / min). ont présenté une étude sur la performance d'un le distillateur solaire à triple bassins avec l'intégration d'un capteur solaire. Ils ont constaté alors que la productivité journalière a augmenté de 10,64 kg / jour à 24,48 kg / jour, lorsque le rapport de surface de l'élément chauffant était encore à l'unité malgré que la productivité journalière du distillateur solaire augmente avec l'augmentation de la surface de l'eau chauffée.

## **II .2 Les paramètre influant sur le fonctionnement du distillateur :**

- **Les paramètres externes.**
- **Les paramètres internes.**

## **II .2.1 Paramètres Internes :**

Il s'agit des :

### **II .2.1.1 Paramètres de construction :**

#### **II .2.1.1.1 Couverture :**

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature qui peut être en verre ou en plastique. Elle a deux rôles à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement émis ou réémis par l'intérieur du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une surface de condensation de la vapeur d'eau : une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. Pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur)[18].

#### **II .2.1.1.2 L'inclinaison :**

Son inclinaison par rapport à l'horizontale, pour déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et pour minimiser la distance entre la saumure et la vitre, l'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux. L'inclinaison influe aussi sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur. Elle dépend du fonctionnement du distillateur durant l'année :

- Fonctionnement estival :  $\beta = \Phi - 10^\circ$ .
- Fonctionnement hivernal :  $\beta = \Phi + 20^\circ$ .
- Fonctionnement annuel :  $\beta = \Phi + 10^\circ$ .

### **II.2.1.1.3 L'absorbeur :**

Les études faites dans ce domaine montrent que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou du bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et des dépôts minéraux.[18]

### **II .2.1.1.4 La hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller :**

L'épaisseur de l'eau saumâtre joue un rôle très important. La production est plus importante pour un distillateur à faible épaisseur de saumure, mais pour un distillateur de grande épaisseur de la saumure, le maximum de la production n'est observé que peu après le coucher de soleil.

### **II .2.1.1.5 L'isolation des faces latérales du distillateur :**

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

### **II .2.1.2 Paramètres thermo physiques**

Les paramètres thermo physiques sont représentés par :

- La couverture et la surface absorbante : la conductivité thermique, la Chaleur spécifique et la diffusivité thermique.
- La saumure : la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la Viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de Vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité Thermique.
- Le mélange air-vapeur : la conductivité thermique, la chaleur Spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, le Coefficient de dilatation thermique

### **II .2.1.3 Paramètres optiques :**

Ce sont les paramètres optiques (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité) de la surface de la couverture et de la surface absorbante.

Paramètre de fonctionnement :

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

### **II .2.1.4 Paramètres de position[18]**

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.

1. 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 après-midi : orientation Ouest.
- Fonctionnement durant toute la journée : orientation Sud.

2. L'inclinaison : elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année :

- Fonctionnement estival :  $\beta = \varphi - 10^\circ$ .
- Fonctionnement hivernal :  $\beta = \varphi + 20^\circ$ .
- Fonctionnement annuel :  $\beta = \varphi + 10^\circ$ .

### **II .2.2 Paramètres Externes :**

Les études faites par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus sont :

#### **II.2.2.1 Paramètres météorologiques**

a) Intensité du Rayonnement Solaire

b) La température ambiante de l'air et la vitesse du vent

Aux températures de saumure élevées, augmenter la différence de température Entre la saumure et la vitre en augmentant la vitesse de vent, en baissant là Température ambiante. Par contre, aux températures faibles de la saumure, et En augmentent la vitesse du vent revient à faire chuter le taux d'évaporation.

c) L'intermittence des nuages

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface dépend des paramètres A, Et B qui dépendent de la nature de ciel.

Cela revient à dire que le passage des nuages diminue l'absorptance effective Moyenne [18]

## **II .2.2.2 Paramètres Géographiques :**

Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur de soleil, sont à prendre en considération dans cette étude

# **Chapitre III**

## **Bilan thermique dans un distillateur solaire**

### **III.1.Description de la distillation solaire**

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau dans le bac s'évapore et la vapeur d'eau se condense sur la surface de la vitre. La condensation forme des gouttes d'eau pures qui coulent sur la vitre inclinée pour être récupérées dans un récipient propre [19].

### **III.2.Principe de fonctionnement de distillateur solaire**

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux [19].

### **III.3. Modélisation et calcul du billon thermique dans un distillateur solaire**

#### **III.3.1.Energie solaire absorbe**

La surface terrestre n'absorbe qu'environ 50% de l'énergie solaire incidente au sommet de l'atmosphère. L'autre partie est soit absorbée par les composants de l'atmosphère soit diffusée. L'énergie radiative incidente à la surface est transformée en énergie interne et réchauffe la Terre.

On remarque que la surface terrestre ne peut être considérée comme un corps noir puisqu'elle n'absorbe pas toute l'énergie incidente : sur les 55 W incidents, 4 sont réfléchis et 51 sont absorbés. On rappelle que par définition un Corps Noir absorbe toute l'énergie incidente.

La valeur de ce flux varie suivant le flux incident à la surface qui dépend notamment de la couverture nuageuse. Il dépend aussi de la nature de la surface : une surface gelée réfléchit plus la lumière visible si bien que l'énergie absorbée est plus faible. Ainsi, sur les  $340 \text{ W/m}^2$  (1/4 de la constante solaire) arrivant au sommet de l'atmosphère, seuls 51 % (soit  $173 \text{ W/m}^2$ ) sont absorbés.

Émission nette de la surface aux grandes longueurs d'ondes : Il s'agit du flux énergétique net émis sous forme de rayonnement énergétique (infrarouge) par la surface terrestre.

### III.3.2. Bilan thermique de l'absorbeur

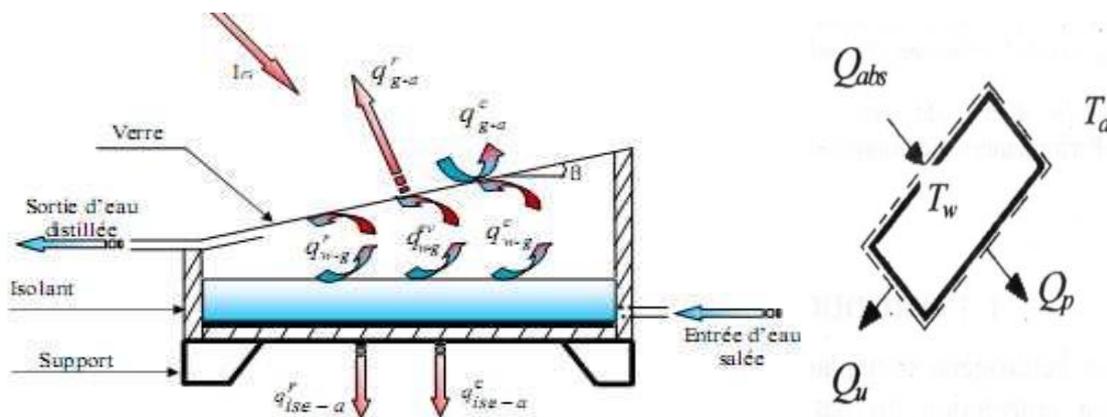


Figure III.1 Bilan énergétique d'un distillateur solaire plan

Au niveau de la vitre

Globalement, le distillateur est assimilé à une boîte noire contenant une charge d'eau saumâtre et fonctionnant entre deux sources de chaleur : la saumure (source chaude) à une température moyenne  $T_w$  et l'ambiance (source froide) à une température moyenne  $T_a$ . La fraction de la puissance solaire incidente ( $Q_{\text{inc}}$ ) et absorbée par la charge d'eau ( $Q_{\text{abs}}$ ) est utilisée comme chaleur utile ( $Q_u$ ) pour l'évaporation d'une quantité d'eau et la fraction restante ( $Q_p$ ) est perdue vers l'ambiance. L'application de la première loi de la thermodynamique à un volume

de contrôle (Fig. 1) délimitant la surface effective pertinente du système permet d'écrire le bilan d'équilibre thermique du système :

$$Q_u = Q_{abs} - Q_p = A_c [\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)]$$

$$Q_p = U_L A_c (T_w - T_a)$$

$$Q_{abs} = \alpha_t Q_{inc} = \alpha_t (A_c I_g)$$

$\alpha_t$  l'absorptivité effective totale de la saumure (rendement optique du distillateur), est donnée par l'expression suivante :

$$\alpha_t = \tau_g \cdot \alpha_w + \tau_g \cdot \tau_w \cdot \alpha_b$$

Le facteur des pertes globales  $U_L$  calculé par rapport à la surface d'évaporation en tenant compte des pertes thermiques avant, arrière et latérales est donné par la relation :

D'autre part, l'efficacité globale  $\eta_g$  et l'efficacité interne  $\eta_{in}$  du distillateur sont exprimées par les relations.

$$\eta_g = \frac{Q_u}{Q_{inc}} = \frac{\sum \dot{m} L_v}{\sum I_g A_c} = \alpha_t \eta_{in}$$

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

$$q_{eb} + q_{bis} = \tau \cdot A \cdot G$$

# **Références**

# **Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- [1] Climate Change 2001: The Scientific Basis , sur grida.no, 29 septembre 2007
- [2] Rayonnement global [archive], sur edfenr.com.
- [3] Smil, Vaclav, Energy at the Crossroads : Global Perspectives and Uncertainties, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006, 427 p. (ISBN 978-0-262-19492-1, p. 12.
- [4] World Consumption of Primary Energy by Energy Type and Selected Country Groups, 1980-200 4 (version du 23 mai 2011 sur l'Internet Archive), Energy Information Administration.
- [5] « Earth Radiation Budget » [archive], sur marine.rutgers.edu, Université Rutgers (consulté le 8 janvier 2021).
- [6] « Photosynthesis », sur photoscience.la.asu.edu, Université d'État de l'Arizona, 3 décembre 1998 (consulté le 8 janvier 2021).
- [7] (en) Thomas R. Sinclair et Albert Weiss, Principles of Ecology in Plant Production, CABI, 2010, 186 p. (lire en ligne [archive]), p. 71.
- [8] (en) James Riley, Marge Eberts et Peggy Gisler, Math Challenge : 190 Fun and Creative Problem for Kids : Level 2, Good Year Books, 2004, 192 p. (lire en ligne [archive]).
- [9] Claudine Mulard, « Une centrale solaire géante pour alimenter la Californie » [archive], Le Monde, 11 avril 2006.
- [10] « Survey of Energy Resources 2007 », sur Conseil mondial de l'énergie, 9 juin 2009 (consulté le 8 janvier 2021).
- [11] cours de l'énergie renouvelable chapitre III (Dr,Said Zergane )
- [12] cours de l'énergie renouvelable chapitre IV (Dr,Said Zergane )
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation\\_-\\_cite\\_ref-2](https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation_-_cite_ref-2)
- [14] Mémoires de la Société des sciences physiques et naturelles de Bordeaux. Gauthier-Villars, 1869 (Livre numérique Google [archive]).
- [15] Martin Levey, « Babylonian Chemistry: : A Study of Arabic and Second Millennium B.C. Perfumery », Osiris, vol. 12, 1956, p. 376-389
- [16] R.L. Forbes, Short History of the Art of Distillation, Leiden, E.J. Brill, 1948, 414 p. (ISBN 0-9824055-4-5).
- [17] THESE Etude et modélisation de deux distillateurs solaires Rev. Energ. Ren. : Chemss 2000 91-97 Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques A. Sadi Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger
- [18] Bait Omar: étude énergétique d'un distillateur solaire multi-étages Mémoire de Master: 25/09/2014
- [19] Le bilan radiatif de la Terre Article | 21/10/2003 Vincent Daniel ENS-Lyon Florence Kalfoun

