



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

**Département Génie des Procédés et Energétique**

## **MEMOIRE**

En vue d'obtention du diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Spécialité : Energétique et Développement Durable

Présenté par

**MANSEUR Ines**

**AYADI Ahlem**

## **Conception et Réalisation d'un Distillateur Solaire en Cascade à double pente**

Encadré par

**Dr. BOUDINAR Naouam**

**Dr. NEDJAH Nawel**

ENSTI Annaba

Membres du jury :

- |                       |   |                           |
|-----------------------|---|---------------------------|
| ▪ MCB. Amar AYAD      | Président                               | ENSTI Annaba              |
| ▪ MCB. Sarah CHAOUCHI | Examinateur                             | ENSTI Annaba              |
| ▪ MCB. Nassima MALLEM | Représentant CATI                       | ENSTI Annaba              |
| ▪ Sofiane BENDJEDDOU  | Représentant milieu<br>socio-économique | SIDER ELHADJAR/Groupe SNS |

Année 2025

# **Dédicace**

## **À nos parents chéris,**

*Pour votre amour inépuisable, vos sacrifices silencieux et votre soutien indéfectible tout au long de notre parcours. Ce travail vous est dédié avec gratitude et tendresse.*

## **À nos frères et sœurs, piliers de notre force,**

*Pour votre présence réconfortante, vos encouragements constants et vos sourires dans les moments de doute. Vous êtes notre force douce.*

## **À nos encadrantes,**

*Dr. BOUDINAR Naouam, pour votre rigueur, votre bienveillance et l'inspiration que vous nous avez apportée.*

*Dr. NEDJAH Nawel, pour votre accompagnement généreux, votre écoute attentive et votre soutien tout au long du projet.*

## **À toutes celles et ceux qui ont cru en nous, même dans nos silences.**

# **Remerciements**

*Louange à **Allah**, le Tout-Puissant, qui nous a accordé patience, espoir et force pour aller au bout de ce voyage.*

*À **nos parents**, ces âmes pures dont les prières silencieuses ont protégé chacun de nos pas. À leur amour infini, à leurs sacrifices quotidiens, à leurs nuits d'inquiétude et à leurs sourires rassurants... Ce travail, c'est un bout d'eux.*

*À **nos frères et sœurs**, qui nous ont soutenues dans les moments de doute, qui ont séché nos larmes et célébré nos petites victoires comme si elles étaient les leurs.*

*À **Dr. BOUDINAR Naouam**, nous manquons de mots... Vous êtes l'incarnation d'une enseignante au grand cœur, d'une guide attentive, d'une force tranquille. Votre présence dans notre vie académique fut un cadeau précieux. Vous nous avez tendu la main avec sincérité, et chaque mot, chaque conseil était une perle de savoir et d'humanité.*

*À **Dr. NEDJAH Nawel**, pour son soutien académique, sa gentillesse et ses encouragements qui nous ont aidées à garder le cap.*

*Enfin, à toutes les personnes, visibles ou discrètes, qui ont fait de ce chemin un peu plus doux, un peu plus lumineux.*

*Merci, du fond du cœur.*

## Résumé :

Ce travail porte sur l'étude, la conception et l'évaluation expérimentale de deux distillateurs solaires à double pente : un modèle simple et un modèle en cascade. L'objectif principal est de comparer leurs performances en termes de rendement thermique et de production d'eau distillée. La première partie est consacrée à une revue bibliographique sur les principes de la distillation solaire, les différents types de systèmes, leurs applications et leur impact environnemental. La partie expérimentale détaille la conception, la fabrication, les matériaux utilisés et les instruments de mesure pour les deux prototypes à double pente. Deux campagnes expérimentales ont été effectuées dans des conditions climatiques différentes pour évaluer l'influence des paramètres extérieurs. Les résultats obtenus permettent une comparaison précise de l'efficacité thermique et de la productivité des deux systèmes. Le mémoire se conclut par une discussion critique des résultats et des suggestions pour optimiser la configuration en cascade.

**Mots clé :** Distillateur solaire, Eau distillée, Energie solaire, Distillation en cascade, Essais expérimentaux.

## Abstract:

This study focuses on the design, construction, and experimental evaluation of two double-slope solar stills: one single-unit and one cascade configuration. The main objective is to compare their thermal efficiency and distilled water production. The first section comprises a bibliographic review on solar distillation principles, various system types, applications, and environmental impact. The experimental part details the design, construction process, materials, and instrumentation used for both double-slope prototypes. Two experimental campaigns were conducted under varying climatic conditions to assess the effect of external parameters. The results enable a thorough comparison of thermal performance and water productivity between the two systems. The study concludes with a critical discussion and recommendations to optimize the cascade configuration.

**Keywords:** Solar still, Distilled water, Solar energy, Cascade distillation, Experimental tests.

## ملخص

يتناول هذا العمل دراسة وتصميم وتقييم أداء نوعين من أجهزة التقطير الشمسي مزدوجة الميل: جهاز بسيط وجهاز بنظام متدرج. يهدف المشروع إلى مقارنة النظامين من حيث الكفاءة الحرارية وإنتاجية الماء المقطر. يشمل الجزء النظري مراجعة لمبادئ التقطير الشمسي، أنواعه، تطبيقاته وآثاره البيئية. أما الجزء التجريبي، فيغطي مراحل التصميم، البناء، المواد المستخدمة وأجهزة القياس لكلا النموذجين مزدوجي الميل. أجريت تجربتان في ظروف مناخية مختلفة لتحليل تأثير العوامل الخارجية. أظهرت النتائج إمكانية مقارنة دقيقة للكفاءة الحرارية والإنتاجية للنموذجين. يختتم العمل بمناقشة النتائج وتقديم توصيات لتطوير وتحسين تصميم المتدرج.

**الكلمات المفتاحية:** التقطير الشمسي، الماء المقطر، الطاقة الشمسية، التقطير الشلالي، التجارب التجريبية.

# Table des matières

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 01 : Description de l'entreprise d'accueil du stage.</b> .....	<b>2</b>
1. Introduction:.....	2
2. Présentation de l'entreprise:.....	2
3. Données générales et techniques de la Divindus AMM :.....	2
4. Motivation du choix du stage :.....	3
5. Problématique: .....	3
<b>Chapitre 02 : Etude bibliographique et généralité sur la distillation solaire.</b> .....	<b>4</b>
1. Introduction:.....	4
1.1. Définition du distillateur solaire: .....	4
1.2. Importance du distillateur solaire: .....	4
2. Principe de fonctionnement: .....	4
2.1. Conversion de l'énergie solaire en chaleur : .....	4
2.2. Évaporation et condensation: .....	4
2.3. Collecte et stockage de l'eau distillée : .....	5
3. Types de distillateurs solaires: .....	5
3.1. Distillateur solaire à effet simple : .....	5
3.2. Distillateur solaire à effet multiple : .....	6
3.3. Distillateur solaire à circulation forcée : .....	7
4. Avantages et inconvénients: .....	7
4.1. Avantages du distillateur solaire:.....	7
4.2. Inconvénients du distillateur solaire: .....	7
5. Applications du distillateur solaire:.....	7
5.1. Utilisation dans les régions arides : .....	7
5.2. Production de l'eau potable:.....	8
5.3. Utilisation industrielle:.....	8
6. Facteurs influençant l'efficacité: .....	8
7. Impact environnemental: .....	8
7.1. Réduction de la consommation d'eau douce :.....	8
7.2. Réduction de la pollution de l'eau :.....	8
7.3. Réduction des émissions de gaz à effet de serre :.....	8
8. Les travaux antérieurs: .....	8
<b>Chapitre 03 : Etude expérimentale d'un distillateur solaire (Configuration et procédures expérimentales).</b> .....	<b>10</b>
1. Introduction:.....	10
2. Conception du distillation solaire:.....	10
2.1. Matériels nécessaires à la conception du distillateur solaire en cascade :.....	10
2.2. Etapes de la conception du distillateur en cascade : .....	12
2.3. Appareils de mesure : .....	15

2.4. Géolocalisation du distillateur solaire :	16
<b>Chapitre 04: Résultats et discussions.</b>	<b>17</b>
1. Introduction:	17
2. Méthodes et expériences :	18
2.1. Condition de l'expérience:	18
2.2. Interprétation et discussion des résultats :	18
3. Étude comparative de l'eau avant et après traitement par distillation :	26
4. Analyse comparative de la production d'eau distillée pour les deux distillateurs et les deux campagnes expérimentales :	27
4.1. Distillateur solaire en cascade :	27
4.2. Distillateur solaire simple :	27
4.3. Analyse et discussion:	27
5. Comparaison du rendement thermique entre le distillateur solaire simple et le distillateur en cascade :	28
<b>Conclusion Générale :</b>	<b>29</b>
<b>Références Bibliographiques:</b>	<b>30</b>
<b>Annex</b>	<b>31</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Distillateur à pente unique [2].....	5
<b>Figure 2:</b> Distillateur à double pente [3].....	6
<b>Figure 3:</b> Distillateur solaire à effet multiples [4]. ....	6
<b>Figure 4:</b> Localisation précise du distillateur solaire.....	16

## Liste des table

<b>Table 1:</b> Matériels de construction du distillateur solaire en cascade. ....	10
<b>Table 2:</b> Les étapes de construction du distillateur solaire à double pente en cascade. ....	12
<b>Table 3:</b> Les appareils de mesure. ....	15
<b>Table 4:</b> Conditions météorologiques des jours d'expériences. ....	17
<b>Table 5:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 1 <sup>er</sup> jour d'essai. ....	19
<b>Table 6:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 2 <sup>e</sup> jour d'essai. ....	19
<b>Table 7:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 3 <sup>e</sup> jour d'essai. ....	20
<b>Table 8:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 4 <sup>e</sup> jour d'essai. ....	21
<b>Table 9:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 1 <sup>er</sup> jour du 2 <sup>e</sup> essai. ....	22
<b>Table 10:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 2 <sup>e</sup> jour du 2 <sup>e</sup> essai. ....	23
<b>Table 11:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 3 <sup>e</sup> jour du 2 <sup>e</sup> essai. ....	24
<b>Table 12:</b> Évolution des paramètres principaux au cours du 4 <sup>e</sup> jour du 2 <sup>e</sup> essai. ....	24
<b>Table 13:</b> Mesures des propriétés de l'eau testée. ....	26
<b>Table 14:</b> Données sur l'accumulation journalière de l'eau distillée – Distillateur solaire en cascade– ....	27
<b>Table 15:</b> Données sur l'accumulation journalière de l'eau distillée – Distillateur solaire simple – ....	27
<b>Table 16:</b> Données comparatives du rendement thermique. ....	28

## **Introduction générale :**

L'eau potable est une ressource essentielle à la vie humaine, mais elle demeure inégalement répartie à travers le monde. Dans les régions arides et semi-arides, l'accès à une eau propre et salubre représente un défi majeur. Face à cette problématique, le recours aux énergies renouvelables pour le traitement de l'eau constitue une solution prometteuse, notamment à travers la distillation solaire, qui permet de produire de l'eau distillée à partir d'eau saumâtre ou légèrement salée, en utilisant uniquement l'énergie du soleil.

Ce travail s'inscrit dans cette optique. Il vise à étudier, concevoir, et expérimenter deux configurations de distillateurs solaires à double pente : un modèle classique et un autre en cascade. L'objectif principal est de comparer leurs performances thermiques et leur capacité de production d'eau distillée, afin d'évaluer l'impact du système en cascade sur l'efficacité globale.

Deux campagnes expérimentales ont été menées dans des conditions climatiques différentes afin d'analyser l'influence des facteurs externes sur le fonctionnement des deux dispositifs.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

**Chapitre 01 :** Ce chapitre présente l'entreprise où le stage a été réalisé, ses activités principales, ainsi que la problématique et les raisons du choix du sujet.

**Chapitre 02 :** Il contient les bases théoriques sur la distillation solaire, ses principes de fonctionnement, ses différents types, avantages, inconvénients, applications, et son impact environnemental.

**Chapitre 03 :** Ce chapitre décrit la conception pratique du distillateur solaire en cascade, les matériaux utilisés, les étapes de fabrication, les outils de mesure, et l'emplacement d'installation.

**Chapitre 04 :** Les résultats expérimentaux sont analysés et discutés, avec une comparaison des performances des deux distillateurs (simple et en cascade), avant et après traitement, en mettant l'accent sur le rendement thermique.

Ce travail se conclut par une synthèse des résultats obtenus, les perspectives d'optimisation du dispositif, et son potentiel d'application à grande échelle dans les zones à stress hydrique.

## **Chapitre 01 : Description de l'entreprise d'accueil du stage.**

### **1. Introduction:**

L'objectif de ce stage au sein de l'entreprise « Divindus AMM » était d'acquérir une expérience pratique dans le domaine dynamique de la menuiserie. Restez en contact avec le monde du travail et la découverte des différents équipements de production du bois.

### **2. Présentation de l'entreprise:**

- Filiale du groupe des industries locales DIVINDUS, actif dans le secteur de la production, Divindus AMM est une entreprise spécialisée dans l'ameublement, la literie et la menuiserie sur mesure.
- Créé en 2016 groupant ainsi 10 unités de fabrications, Divindus AMM est devenu un acteur majeur dans le secteur de l'industrie de l'ameublement, la literie et la menuiserie, en proposant des solutions sur mesure et de haute qualité pour les entreprises, collectivité locale et particuliers.
- Divindus AMM est composés de 10 unités répartis sur l'ensemble du territoire nationale. Sont dotées de variétés de machines spécifiques, adaptés à la fabrication de meubles et tout type de menuiserie en série ainsi qu'à la fabrication des matelas, sommiers et autres produits de literies à grand échelle et en grandes quantités.
- Chacune des unités a mis en place un showroom pour exposer les produits conçus et montrer aux clients les possibilités de personnalisation ainsi que la qualité des produits.
- Divindus AMM propose la fabrication d'une large gamme de produits répartis selon les activités des 10 unités en 4 catégories : Menuiserie, mobilier scolaire, ameublement et literie.

### **3. Données générales et techniques de la Divindus AMM :**

- Nom : Divindus Ameublement & Menuiserie.
- Adresse : Zone Industrielle. BP 174, El Tarf, Algérie.
- Email : [gme@divindusamm.dz](mailto:gme@divindusamm.dz)
- Téléphone : 038 30 14 19
- Fax : 038 30 12 26
- Nature de l'usine : Production et Fabrication et commercialisation.
- Forme juridique : SPA

#### **4. Motivation du choix du stage :**

Le choix d'effectuer notre stage de fin d'études au sein de l'entreprise DIVINDUS – AMM GME El Taref découle de plusieurs motivations. D'une part, cette entreprise correspond parfaitement à notre domaine de formation en Génie des Procédés et Énergétique, notamment à travers son activité de maintenance industrielle. D'autre part, cette opportunité nous permet de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises durant notre cursus universitaire, en particulier en mécanique, thermodynamique appliquée et gestion de la maintenance.

Travailler dans un environnement industriel réel nous offre également la possibilité d'acquérir une expérience professionnelle concrète, indispensable pour notre future carrière d'ingénieur.

#### **5. Problématique:**

Dans un contexte industriel où l'optimisation du temps d'arrêt des machines constitue un facteur clé de performance, l'entreprise est confrontée à plusieurs défis liés à la planification et à l'efficacité des opérations de maintenance.

Notre stage s'inscrit dans cette dynamique et porte plus spécifiquement sur l'amélioration des pratiques de maintenance préventive sur certains équipements critiques.

L'objectif est d'identifier les pannes récurrentes, d'en analyser les causes, et de proposer des solutions visant à accroître la fiabilité des équipements tout en réduisant les coûts et les arrêts non planifiés.

Ce travail implique à la fois une observation sur le terrain, une participation aux interventions techniques, ainsi que l'exploitation des données issues du système de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO).

## **Chapitre 02 : Etude bibliographique et généralité sur la distillation solaire.**

### **1. Introduction:**

La théorie du distillateur solaire étudie les principes, le fonctionnement et les applications de la distillation à l'énergie solaire. Ce travail présente les différents types de distillateurs, leurs avantages, leurs limites, et leurs usages, notamment en zones arides, pour la production d'eau potable ou dans l'industrie. Il analyse aussi les facteurs influençant leur efficacité, leur impact environnemental, ainsi que les perspectives d'amélioration et d'intégration dans les systèmes énergétiques.

#### **1.1.Définition du distillateur solaire:**

Le distillateur solaire est un système de purification de l'eau qui utilise l'énergie solaire pour évaporer l'eau, puis condenser la vapeur en eau distillée. Basé sur les principes d'évaporation et de condensation, il permet d'obtenir une eau de haute qualité en éliminant les impuretés. Ce dispositif représente une solution durable pour produire de l'eau potable, notamment dans les régions à accès limité à l'eau douce.

#### **1.2.Importance du distillateur solaire:**

Le distillateur solaire revêt une importance significative en raison de sa capacité à fournir de l'eau potable dans les régions arides où les ressources en eau douce sont rares. Elle permet de purifier l'eau en éliminant les sels, les métaux lourds et autres contaminants, offrant ainsi une source d'eau propre et sûre. De plus, le distillateur solaire peut être utilisée dans des applications industrielles pour produire de l'eau pure nécessaire à divers processus. En outre, cette technologie présente des avantages environnementaux, car elle réduit la consommation d'eau douce et la pollution de l'eau. Grâce à son utilisation, les émissions de gaz à effet de serre peuvent également être réduites. L'importance du distillateur solaire réside donc dans sa capacité à fournir une source d'eau propre, durable et respectueuse de l'environnement.

### **2. Principe de fonctionnement:**

Le principe de la distillation solaire est mis en œuvre comme suit :

#### **2.1.Conversion de l'énergie solaire en chaleur :**

Les rayons du soleil traversent le couvercle en verre jusqu'à l'eau salée au fond de la chambre du distillateur. La température de l'eau salée commence à augmenter et un transfert de chaleur est effectué entre l'absorbeur noir et l'eau saumâtre [1].

#### **2.2.Évaporation et condensation:**

L'eau commence à s'évaporer. La vapeur chaude atteint le verre froid. Cette vapeur se condense et forme des gouttelettes d'eau [1].

### 2.3. Collecte et stockage de l'eau distillée :

Les gouttelettes d'eau s'accumulent dans le récupérateur situé au coin du distillateur solaire. Par la suite, l'eau distillée est dirigée vers un réservoir de stockage, souvent en plastique ou en acier inoxydable, afin de prévenir toute contamination. Ce réservoir est ensuite placé à l'abri de la lumière et de la chaleur pour garantir la qualité de l'eau. [1].

### 3. Types de distillateurs solaires:

On peut les classer en deux catégories distinctes :

#### 3.1. Distillateur solaire à effet simple :

Le distillateur solaire à bassin est le modèle le plus répandu. Il se compose d'un bassin noir absorbant la chaleur solaire, recouvert d'un vitrage incliné pour condenser la vapeur et diriger l'eau distillée vers un réservoir. Une isolation thermique sous le bassin réduit les pertes de chaleur. Simple à construire et à entretenir, il offre cependant une efficacité moindre comparée aux distillateurs à effets multiples.

- **Distillateur solaire à pente unique :**

Il s'agit d'un distillateur à capteur unique, incliné à un angle ( $\beta$ ), également connu sous le nom de distillateur simple. Dans la boîte solaire, l'eau peut être ajoutée manuellement ou automatiquement grâce à un système à flotteur. L'énergie solaire pénètre par la vitre supérieure de la boîte, chauffant l'eau jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau qui se forme se condense sur la vitre, qui est relativement plus froide. Grâce à sa légère inclinaison, cette vitre conduit l'eau distillée vers un récipient de stockage [2].

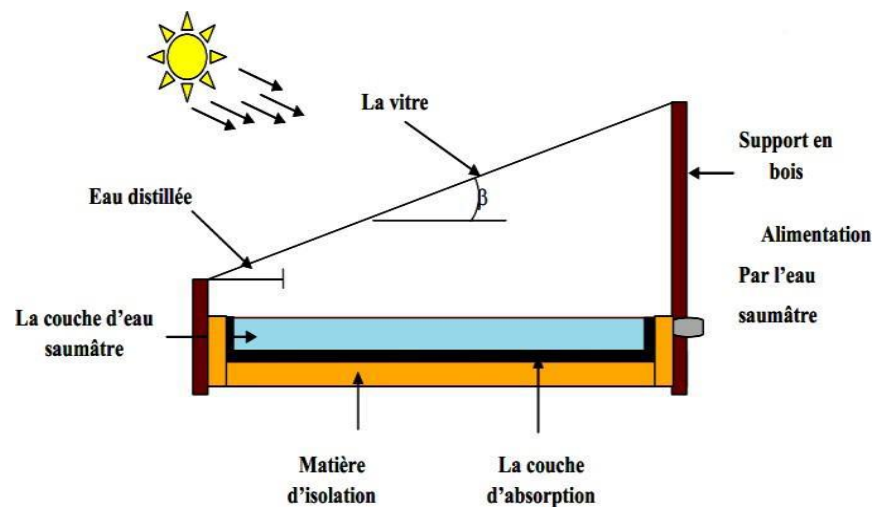
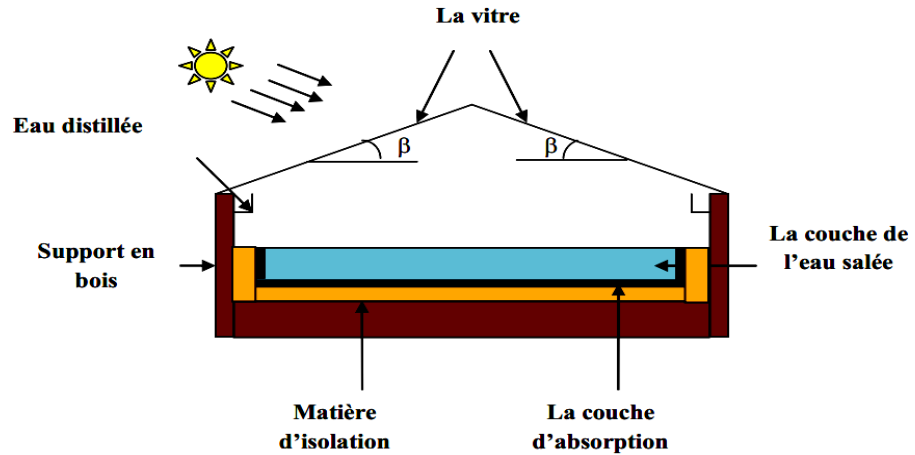


Figure 1: Distillateur à pente unique [2].

- **Distillateur solaire à double pente :**

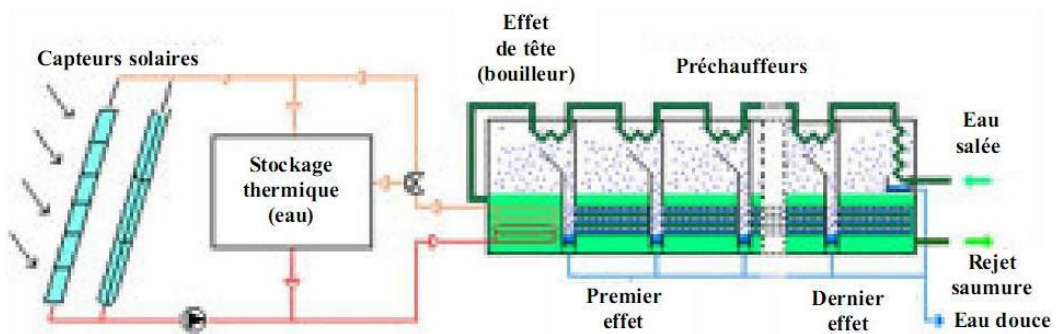
Il s'agit d'un distillateur à double capteurs, chacun incliné selon un angle ( $\beta$ ). Cette conception présente l'avantage d'exposer un capteur au soleil tout en maintenant l'autre à l'ombre, ce qui permet d'accélérer le processus de condensation [3].



**Figure 2:** *Distillateur à double pente [3].*

### 3.2. Distillateur solaire à effet multiple :

Dans ce type de distillateurs, plusieurs évaporateurs sont disposés en série, appelés "effets" (voir Fig. 3). L'eau qui s'évapore dans le premier effet se condense dans le deuxième, et l'énergie libérée par cette condensation est utilisée pour évaporer l'eau présente dans ce second effet. Le troisième évaporateur sert alors de condenseur pour les vapeurs provenant du second effet, et ce processus se poursuit ainsi. Il convient de noter que plus l'écart de température est faible, plus la surface d'échange nécessaire pour le transfert d'énergie doit être importante, ce qui entraîne un investissement légèrement plus élevé. Néanmoins, l'augmentation du nombre d'effets permet de diminuer la consommation spécifique, exprimée en énergie par mètre cube d'eau douce [4].



**Figure 3:** *Distillateur solaire à effet multiples [4].*

### **3.3. Distillateur solaire à circulation forcée :**

Le distillateur solaire à circulation forcée, grâce à l'intégration d'une pompe, assure un flux constant d'eau salée vers le bassin d'évaporation. Cette dynamisation optimise le transfert thermique en exposant plus rapidement l'eau à la chaleur solaire, ce qui accélère le processus de distillation. En favorisant une circulation active, la chaleur se répartit de manière homogène, évitant ainsi les variations de température qui pourraient nuire à l'efficacité globale. Cette approche améliore nettement la production d'eau distillée par rapport aux distillateurs solaires passifs, offrant ainsi une solution plus efficace pour obtenir de l'eau potable dans les régions où les ressources en eau sont limitées [5].

## **4. Avantages et inconvénients:**

### **4.1. Avantages du distillateur solaire:**

- Un distillateur solaire est un dispositif à la fois peu coûteux et facile à maintenir.
- Il ne produit aucun coût énergétique.
- Il peut fonctionner comme une ressource d'approvisionnement en eau pour les foyers.

### **4.2. Inconvénients du distillateur solaire:**

- Le processus de distillation prend un certain temps. On estime qu'il faut environ 6 litres d'eau pour chaque jour ensoleiller.
- Il ne peut pas servir de source unique d'approvisionnement en eau.
- L'énergie solaire est uniquement disponible pendant la journée.
- Les ressources requises ne sont pas disponibles partout, et il peut donc être compliqué de les acquérir dans certaines zones.

## **5. Applications du distillateur solaire:**

Le distillateur solaire est utilisé pour produire de l'eau potable dans les régions arides, reculées et en industrie.

### **5.1. Utilisation dans les régions arides :**

Dans ces régions, établir un réseau d'approvisionnement en eau potable peut s'avérer bien plus coûteux que l'installation de petites unités de distillation solaire, surtout en raison de la dispersion de la population. Cette constatation corrobore plusieurs études qui ont montré que la distillation solaire s'avère économiquement plus avantageuse lorsque la demande en eau potable reste modérée [6].

## **5.2. Production de l'eau potable:**

L'accès à l'eau potable dans les zones disposant de ressources énergétiques limitées représente un défi considérable. Dans ces contextes, les distillateurs solaires se sont révélés être une solution prisée et durable pour produire de l'eau pure. Ce procédé novateur s'appuie sur la chaleur du soleil pour chauffer l'eau, qui est ensuite condensée afin de donner naissance à de l'eau potable. L'analyse en cours souligne l'efficacité économique et la faible consommation énergétique d'un système de distillation solaire, tout en garantissant sa durabilité [7].

## **5.3. Utilisation industrielle:**

Dans le domaine industriel, certaines applications sont primordiales malgré leur caractère restreint, notamment dans le secteur agricole (le traitement de l'eau pour la production), pharmaceutique (la fabrication de médicaments) et textile (l'élimination des tissus contaminés).

## **6. Facteurs influençant l'efficacité:**

- Intensité et durée de l'ensoleillement.
- Surface de collecte d'énergie solaire.
- Température ambiante.
- Qualité de l'eau à distiller.

## **7. Impact environnemental:**

### **7.1. Réduction de la consommation d'eau douce :**

Le permet de produire de l'eau potable à partir d'eaux saumâtres ou polluées, réduisant la pression sur les ressources en eau douce.

### **7.2. Réduction de la pollution de l'eau :**

Élimine efficacement des polluants chimiques complexes (jusqu'à 99 %), surpassant d'autres méthodes comme l'ozonation [8].

### **7.3. Réduction des émissions de gaz à effet de serre :**

En utilisant l'énergie solaire, il diminue la dépendance aux combustibles fossiles et contribue à la lutte contre le changement climatique [9].

## **8. Les travaux antérieurs:**

- **Étude technico-économique des distillateurs simples en Algérie :** Cette étude propose une analyse approfondie des divers types de distillateurs solaires fabriqués et expérimentés en Algérie, en se concentrant particulièrement sur leur conception et leur efficacité [10].
- **Étude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche avec un réflecteur externe :** Cette étude examine trois types de distillateurs solaires : à mèche avec réflecteur, à

mèche sans réflecteur, et le modèle conventionnel. Les résultats montrent clairement que l'ajout d'un réflecteur augmente la productivité du distillateur [11].

- **Contribution à l'étude, réalisation et simulation d'un distillateur solaire à cascades** : Ce projet vise à concevoir et à tester un distillateur solaire à cascades, efficace et économique, destiné à la distillation des eaux salées pour les populations rurales [12].
- **L'effet du type d'isolant sur le rendement d'un distillateur solaire** : Cette étude explore l'utilisation de la fibre de palme en tant qu'isolant dans un distillateur solaire à simple pente, ainsi que son effet sur le rendement [13].
- **Effet des paramètres géométriques d'un réflecteur plan vertical sur les performances d'un distillateur solaire mono-incliné couplé à un condenseur séparé** : Cette étude examine comment les dimensions d'un réflecteur vertical impactent les performances d'un distillateur solaire, tout en prenant en considération l'effet d'ombre [14].
- **Étude expérimentale d'un distillateur solaire plan amélioré** : Ce projet a pour objectif d'optimiser la production d'eau distillée en apportant des modifications à un modèle de distillateur plan utilisant un effet de serre. Pour ce faire, nous intégrons un réflecteur plan et un absorbeur ondulé [15].
- **Étude expérimentale d'un distillateur solaire à quatre vitres** : Cette étude a pour objectif d'optimiser la production d'un distillateur à simple pente en intégrant quatre vitrages supplémentaires, ce qui devrait permettre d'augmenter significativement les rendements par rapport à un distillateur traditionnel [16].

## Chapitre 03 : Etude expérimentale d'un distillateur solaire (Configuration et procédures expérimentales).

### 1. Introduction:



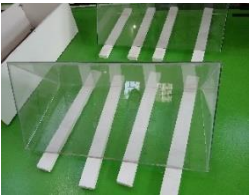
La distillation solaire offre une solution innovante et durable pour l'accès à l'eau potable dans les régions touchées par la pénurie. L'énergie solaire, abondante et accessible partout dans le monde, est employée par les distillateurs solaires pour purifier l'eau. Ce chapitre se concentre sur la conception d'un distillateur solaire à deux pentes en cascade, un modèle particulièrement efficace. Le principe repose sur l'utilisation de la chaleur solaire pour chauffer l'eau contaminée, puis pour recueillir la vapeur d'eau condensée et purifiée.

### 2. Conception du distillation solaire:



#### 2.1. Matériels nécessaires à la conception du distillateur solaire en cascade :

Ces composants ont été choisis de façon constructive (dimensions proportionnelles à la taille de futur système) et selon la disponibilité sur le marché. Ces composants sont résumés dans le tableau suivant :

**Table 1:** *Matériels de construction du distillateur solaire en cascade.*

Photo	Nom	Quantité	Dimensions
	Bassin en acier	2	Longueur : 1m Largeur : 0.5m Hauteur : 0.3m
	Coffre en bois: planchettes de bois	2	Longueur : 1.13m Largeur : 0.625m Hauteur : 0.33m Epaisseur : 0.017m
	Couvercle en verre	2	Longueur : 1.045m Largeur : 0.535m Hauteur : 0.425m Epaisseur: 0.005m



	<p>Cascade à étages en tôle d'acier galvanisé ( 5 niveaux )</p>	<p>1</p>	<p>5 bacs:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Longueur: 1m</li> <li>· Largeur: 0.1m</li> <li>· Hauteur: 0.1m</li> <li>· Epaisseur: 1mm</li> </ul>
	<p>Tuyau PVC</p>	<p>2</p>	<p>Longueur: 1m Diamètre: 0.4m</p>
	<p>Tube de silicone transparent</p>	<p>6</p>	<p>Volume: 280ml</p>
	<p>Boite de peinture noire anticorrosion</p>	<p>1</p>	<p>Volume :800ge</p>
	<p>Feuilles de polystyrene expansé</p>	<p>2</p>	<p>Longueur: 1m Largeur: 2m Epaisseur: 0.3m</p>

	Tuyaux en plastique transparents	4	Longueur: 1m Diamètre: 0.008m
	Réservoirs de collection	4	Volume: 1l

## 2.2. Etapes de la conception du distillateur en cascade :

Le tableau 2.2 présente les différentes étapes de la conception de notre distillateur solaire à double pente.

**Table 2:** Les étapes de construction du distillateur solaire à double pente en cascade.

Etapes	Explication
	<p><b>Traitement de surface du bac en acier</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Application, à l'aide d'un pinceau fin, d'une première couche de peinture noire antirouille sur la paroi interne du bac en acier.</li> <li>○ Séchage complet de la première couche.</li> <li>○ Application d'une seconde couche de peinture pour renforcer la protection contre la corrosion et améliorer l'absorption thermique.</li> </ul>
	<p><b>Traitement de surface de la cascade en acier</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Une première couche de peinture noire antirouille est appliquée sur l'ensemble de la surface de la cascade à l'aide d'un pinceau fin.</li> <li>○ Après séchage complet, une seconde couche est appliquée afin de renforcer la protection contre l'oxydation et d'améliorer l'absorption du rayonnement solaire.</li> </ul>

	<p><b>Fabrication du coffre en bois</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les planches de bois sont d'abord mesurées avec précision, puis découpées à l'aide d'une meuleuse selon les dimensions requises.</li> <li>○ L'assemblage du coffre est ensuite réalisé à l'aide de coins métalliques et de vis, assurant ainsi une structure rigide et stable.</li> </ul>
 	<p><b>Mise en place de l'isolant thermique (polystyrène expansé)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les dimensions intérieures du coffre en bois (longueur, largeur et profondeur) sont relevées avec précision afin de définir les mesures des feuilles de polystyrène expansé nécessaires.</li> <li>○ Les panneaux d'isolant sont découpés selon ces dimensions en tenant compte de l'épaisseur requise pour assurer une isolation thermique optimale.</li> <li>○ Les feuilles de polystyrène sont ensuite positionnées et pressées fermement contre les parois encollées afin de garantir une bonne adhérence.</li> <li>○ Enfin, les deux bacs -l'un simple et l'autre en cascade, tous deux en acier- sont insérés à l'intérieur du coffre isolé, assurant un bon ajustement et un maintien thermique efficace.</li> </ul>
	<p><b>Intégration du système de collecte de l'eau distillée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Un tuyau en PVC est découpé longitudinalement en deux moitiés à l'aide d'une meuleuse.</li> <li>○ Un petit orifice est percé à l'extrémité de l'une des moitiés à l'aide d'une perceuse, permettant l'insertion d'un tuyau en plastique transparent.</li> <li>○ Le tuyau transparent est introduit dans l'orifice percé afin d'assurer l'évacuation de l'eau condensée.</li> </ul>



- Les demi-tuyaux en PVC sont fixés sur les parois internes inférieures du bac en acier à l'aide d'un adhésif silicone, de manière à recueillir l'eau distillée qui ruisselle le long des surfaces vitrées.
- Un trou traversant est réalisé dans le bac en acier et le châssis en bois pour permettre la sortie du tuyau transparent vers l'extérieur.
- Un second orifice est percé pour permettre l'introduction des capteurs de température à l'intérieur du bac.
- Un test d'étanchéité est ensuite effectué afin de vérifier l'absence de fuites au niveau des jonctions collées et des perçages.
- Enfin, les extrémités des tuyaux transparents sont insérées dans de petites bouteilles servant de réservoirs de récupération de l'eau distillée.



### Assemblage final du système

- Un capteur de température est installé sur chaque face, intérieure et extérieure, des pentes vitrées afin de mesurer la température des surfaces d'absorption et d'évaluer les pertes thermiques à travers le verre. Un capteur supplémentaire est inséré dans l'isolant en polystyrène pour suivre les déperditions thermiques au niveau de l'isolation. Un autre capteur est positionné dans l'air à l'intérieur du distillateur pour mesurer la température ambiante interne.

De plus, un capteur est placé dans l'eau saumâtre afin d'en suivre l'évolution thermique, tandis qu'un dernier capteur est installé au fond du cascade.

- Un orifice a été prévu sur la structure afin d'y connecter un manomètre pour la mesure de la pression interne.
- La cascade est ensuite remplie avec 5 litres d'eau du robinet à chaque niveau (25 litres au total).






- Le couvercle en verre est mis en place avec précision et correctement aligné sur la structure.
- Un joint d'étanchéité en silicone est appliqué sur le pourtour du cadre du bac pour assurer une fermeture hermétique entre le verre et le châssis.

### 2.3.Appareils de mesure :

Le tableau 3.1 présente l'ensemble des instruments utilisés pour la mesure des différents paramètres et performances du distillateur solaire à double pente en cascade.

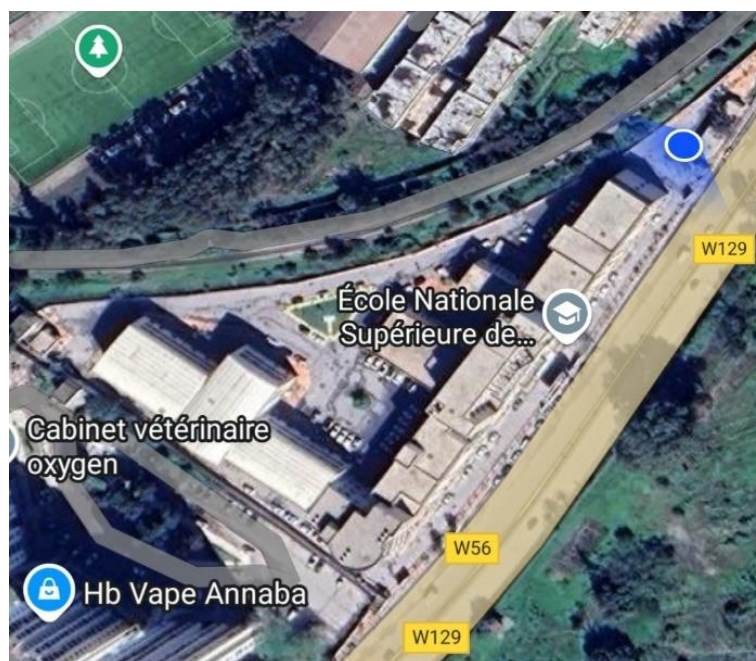
**Table 3:** *Les appareils de mesure.*

Photo	Nom	Fonction	Quantité
	Thermocouples et multimètre numérique.	<p>Mesurer la température sur 4 parties du distillateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La surface extérieure et intérieure du vitrage.</li> <li>• L'eau à l'intérieur du bac.</li> <li>• L'air à l'intérieur du distillateur.</li> <li>• L'isolant thermique.</li> </ul>	6 Thermocouples 2 Multimètres
	Manomètre	Mesure la pression de la vapeur d'eau.	1
	Anémomètre numérique.	Mesurer la vitesse du vent.	1
	Luxmètre numérique.	Mesurer l'intensité lumineuse.	1

	<p>Testeur d'eau.</p>	<p>Mesurer divers paramètres de qualité de l'eau :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le PH.</li> <li>• La conductivité.</li> <li>• Le taux de salinité.</li> <li>• Le TDS (Total des Solides Dissous).</li> <li>• La température.</li> </ul>	<p>1</p>
	<p>Pichet gradué.</p>	<p>Mesurer le volume de l'eau distillée produite.</p>	<p>1</p>

#### 2.4.Géolocalisation du distillateur solaire :

Notre distillateur solaire est installé de manière stratégique aux coordonnées 36°809 N de latitude et 7°7187 E de longitude, dans la commune de Sidi Amar, à Annaba (Algérie). Il se trouve plus précisément à proximité du premier poste de garde, à l'intérieur de l'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie (ENSTI).



**Figure 4:** Localisation précise du distillateur solaire.

## Chapitre 04: Résultats et discussions.

### 1. Introduction:

Deux campagnes expérimentales ont été réalisées dans le cadre de cette étude, au sein de l'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie (ENSTI), située à Sidi Amar, dans la wilaya de Annaba, au nord de l'Algérie.

Le dispositif principal étudié est un distillateur solaire à double pente avec système en cascade, comparé à un distillateur solaire simple de mêmes dimensions.

Les deux expériences ont été menées dans des conditions identiques pour les deux distillateurs (simple et en cascade), placés côte à côte afin d'assurer une comparaison fiable des performances.

La première expérience a été réalisée au cours du mois de mai, en utilisant de l'eau non-potable versée directement dans le bassin du distillateur. Cette phase a été marquée par de fortes fluctuations climatiques, avec des variations importantes de température, de rayonnement solaire et de vitesse du vent.

La deuxième expérience s'est déroulée durant le mois de juin, avec une eau légèrement saumâtre, également placée dans le bassin. Les conditions météorologiques étaient plus stables, ce qui a permis un meilleur suivi des performances.

Lors des deux essais, les paramètres mesurés comprenaient les températures en plusieurs points clés des deux systèmes (eau dans le bassin, surface vitrée, parois internes, etc.), ainsi que la vitesse du vent et l'irradiance solaire reçue par la surface vitrée des distillateurs.

Les conditions météorologiques relevées durant les deux essais expérimentaux sont résumées dans le tableau 3.1. Le premier essai a été réalisé du 11 au 17 mai, tandis que le second a eu lieu du 11 au 15 juin.

**Table 4:** Conditions météorologiques des jours d'expériences.

	Lever de soleil	Coucher de soleil	Température ambiante (°C)	Humidité (%)	Vitesse du vent (km/h)
11/05/2025	05 : 24	19 : 26	17 – 25	69.4	23
12/05/2025	05 : 23	19 : 27	15 – 23	65.4	24
13/05/2025	05 : 22	19 : 28	14 - 24	63.7	20
14/05/2025	05 : 22	19 : 28	15 - 24	68.3	29
11/06/2025	05 : 31	19 : 57	18 – 29	58	17.1
12/06/2025	05 : 32	19 : 57	18 – 29	54.7	17.4
14/06/2025	05 : 33	19 : 57	27 – 34	47.1	21.1
15/06/2025	05 : 33	19 : 58	28 – 35	44.3	20.9

## **2. Méthodes et expériences :**

Deux essais expérimentaux ont été réalisés sur deux périodes distinctes, chacun durant plusieurs jours consécutifs, dans les mêmes conditions de lieu, d'orientation et d'exposition. Le premier essai, effectué en mai, a utilisé de l'eau non-potable, tandis que le second, réalisé en juin, a été mené avec une eau légèrement saumâtre.

### **2.1. Condition de l'expérience:**

La première expérience s'est déroulée sur une période de quatre jours, du 11 au 14 mai 2025, avec de l'eau non potable utilisée dans les bacs des distillateurs. Cette campagne a été marquée par une forte instabilité climatique, caractérisée par des fluctuations de température, d'irradiation solaire et de vitesse du vent. Le jeudi 15 mai, en particulier, a connu de fortes précipitations, nous contraignant à interrompre les essais à 13h15.

La deuxième expérience, quant à elle, a été réalisée du 11 au 15 juin 2025 (sauf le 13 juin), dans des conditions météorologiques plus stables. Elle a été effectuée en utilisant une eau légèrement saumâtre, afin d'évaluer l'impact de la salinité sur les performances thermiques et productives du système.

Les essais ont été menés chaque jour de 8h00 à 17h00, soit environ neuf heures d'ensoleillement quotidiennes. Au cours de chaque journée, des relevés ont été effectués toutes les quinze minutes, incluant la température en plusieurs points du système, l'intensité du rayonnement solaire et la vitesse du vent.

L'objectif principal de ces deux campagnes est d'identifier les paramètres influençant la productivité de l'eau distillée et d'optimiser les performances du distillateur, en comparant le comportement des deux modèles (simple et en cascade) dans des conditions réelles mais contrastées.

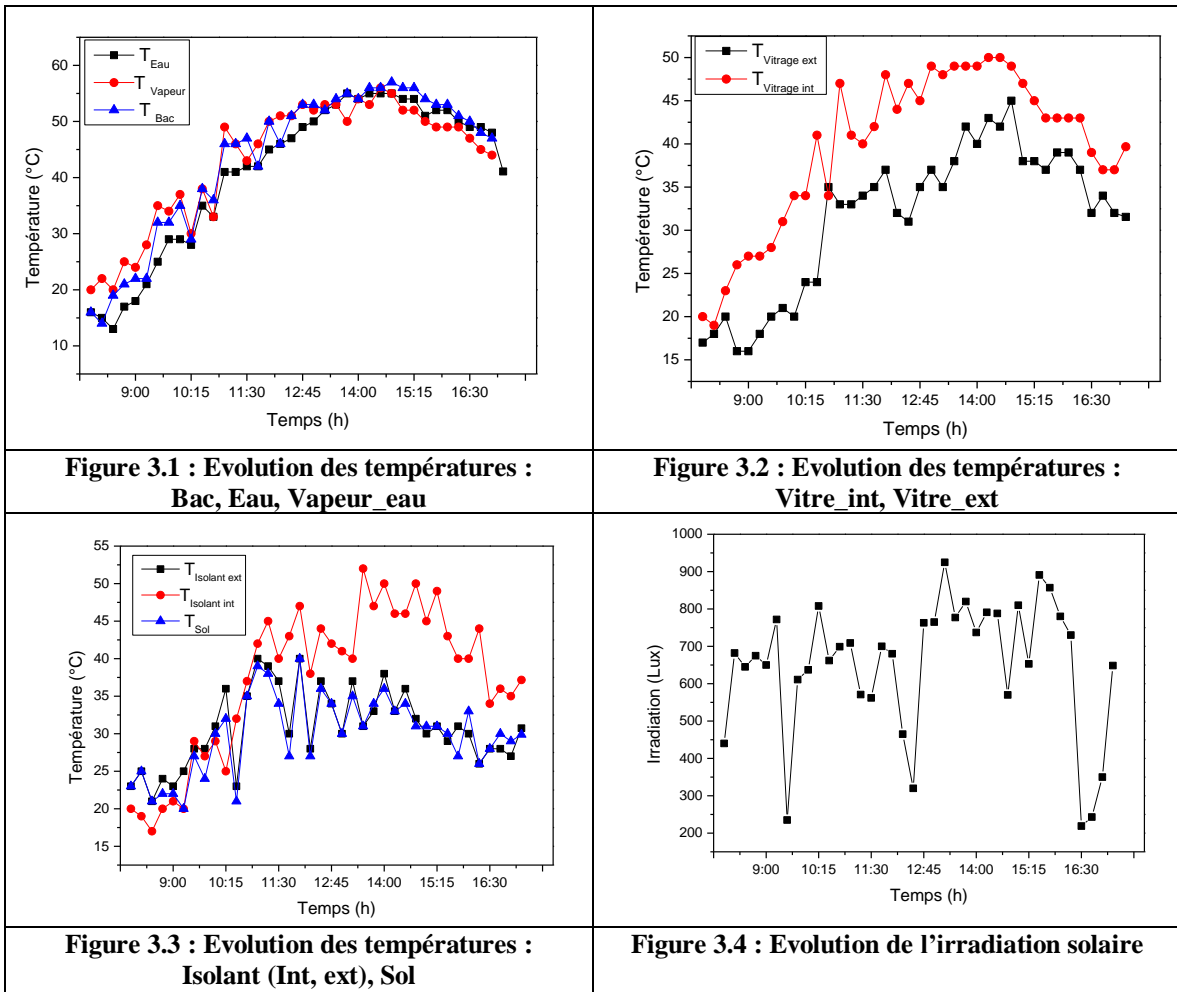
### **2.2. Interprétation et discussion des résultats :**

Les figures présentées dans cette section illustrent les évolutions de plusieurs grandeurs physiques mesurées lors des deux campagnes expérimentales réalisées sur le terrain.

Il s'agit notamment du rayonnement solaire, de la température ambiante, des températures relevées sur les faces extérieure et intérieure du vitrage, de la température de la vapeur d'eau, de la température de l'eau dans l'absorbeur, ainsi que de celle de l'absorbeur lui-même, des températures de l'isolant (interne et externe), et de la température du sol.

## 2.2.1. Etude de l'évolution des principaux paramètres au cours du premier essai :

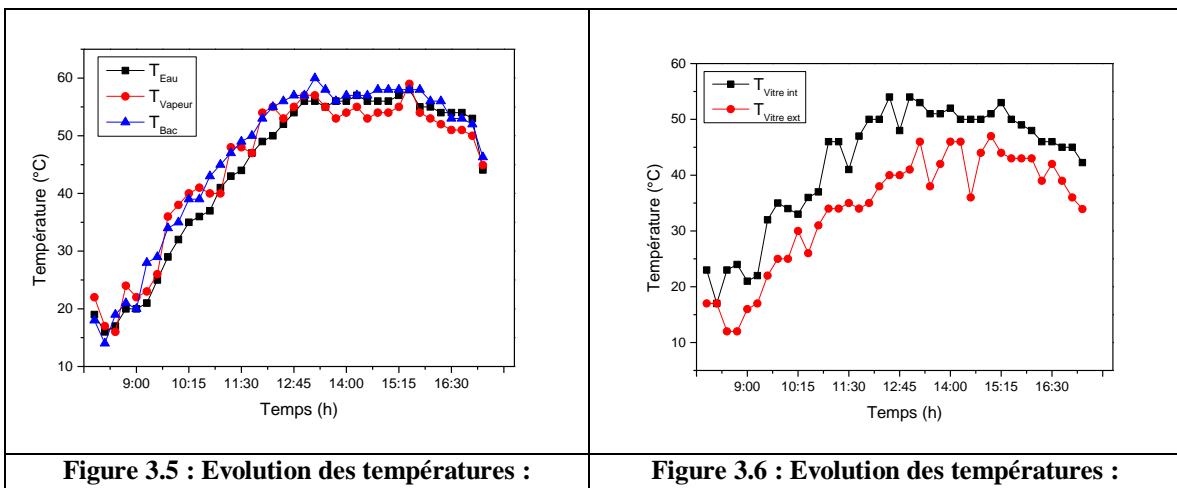
**Table 5:** *Évolution des paramètres principaux au cours du 1er jour d'essai.*



	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B	38	0,8273	0,86445	31,4373	0	0,6	4,12

Variation de la vitesse du vent

**Table 6:** *Évolution des paramètres principaux au cours du 2<sup>e</sup> jour d'essai.*



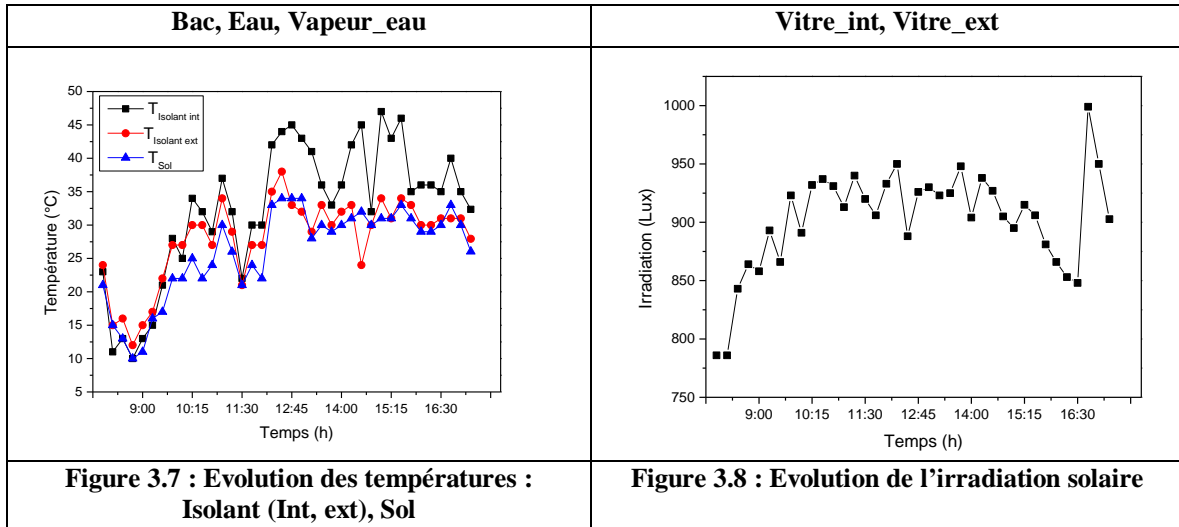


Figure 3.7 : Evolution des températures :  
Isolant (Int, ext), Sol

Figure 3.8 : Evolution de l'irradiation solaire

	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B	38	0,80189	0,51121	30,47189	0,2	0,7	2,36

Variation de la vitesse du vent

Table 7: Evolution des paramètres principaux au cours du 3<sup>e</sup> jour d'essai.

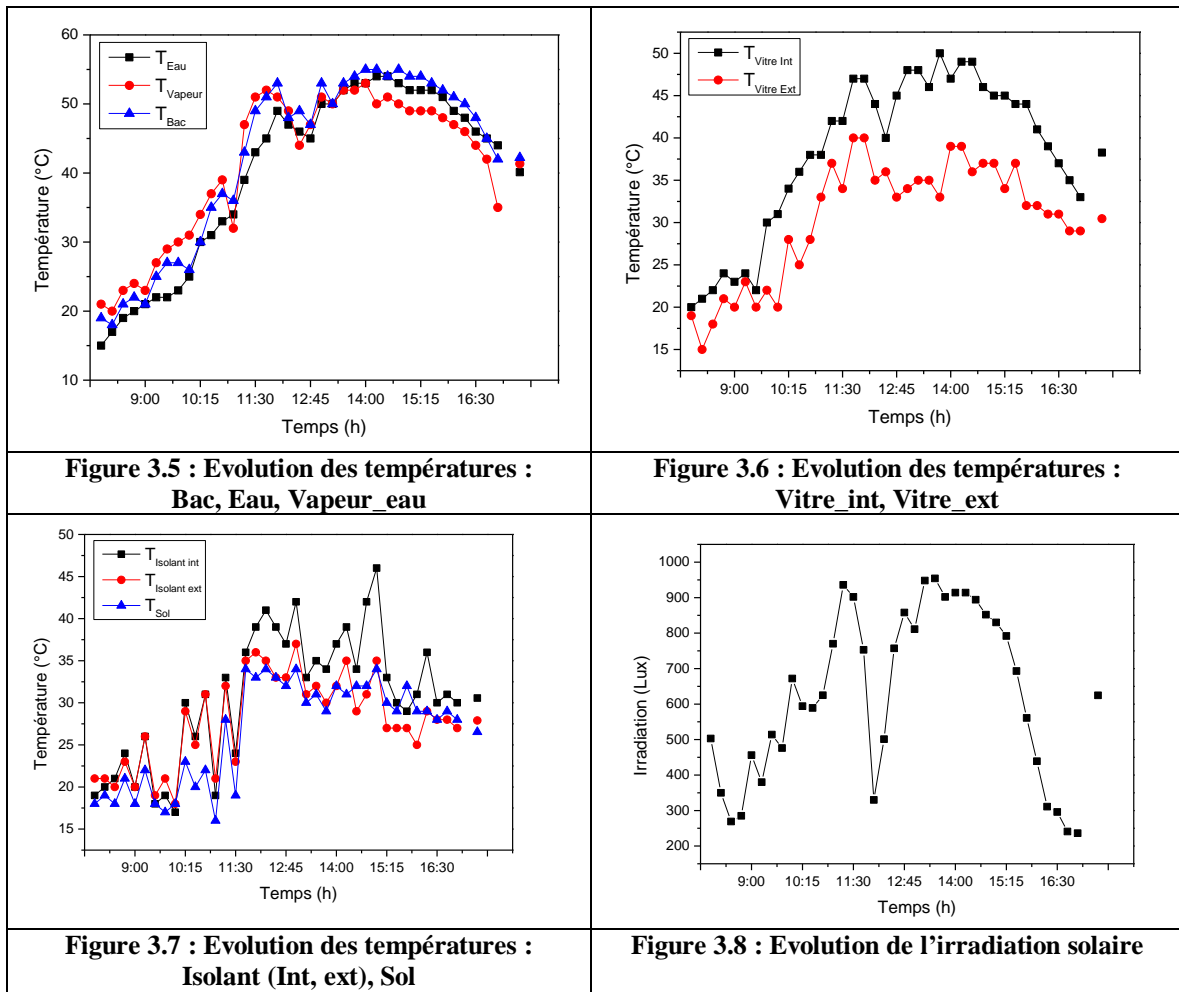


Figure 3.5 : Evolution des températures :  
Bac, Eau, Vapeur\_eau

Figure 3.6 : Evolution des températures :  
Vitre\_int, Vitre\_ext

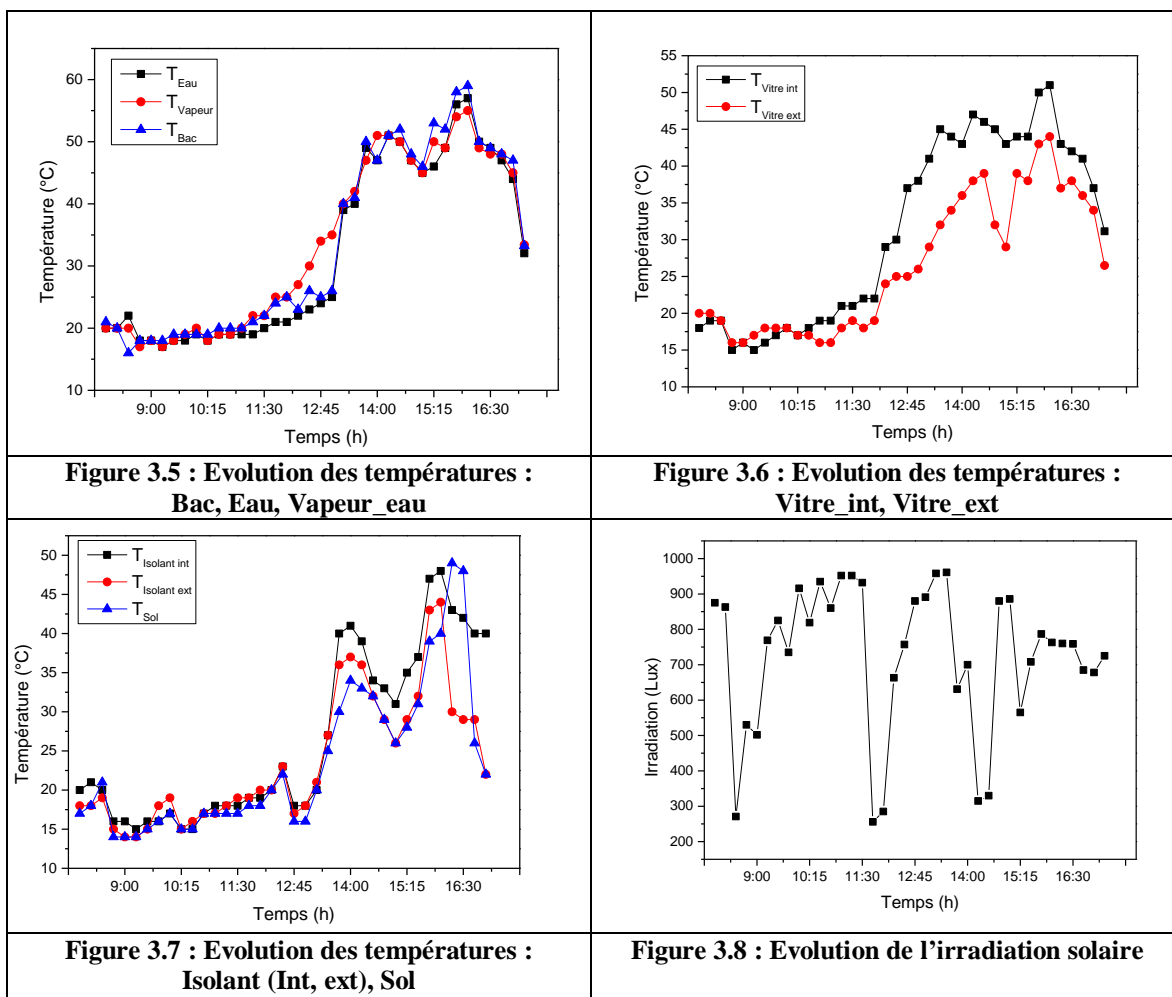
Figure 3.7 : Evolution des températures :  
Isolant (Int, ext), Sol

Figure 3.8 : Evolution de l'irradiation solaire

	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B	38	0,79351	0,60406	30,15351	0	0,6	2,71

Variation de la vitesse du vent

**Table 8:** Évolution des paramètres principaux au cours du 4<sup>e</sup> jour d'essai.



	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B	38	0,73324	0,84108	27,86324	0	0,5	3,15

Variation de la vitesse du vent

➤ **Températures du bac, de l'eau et de la vapeur :**

La température de l'eau démarre chaque matin autour de 18 °C et augmente progressivement jusqu'à 50–55 °C en début d'après-midi.

La température du bac est constamment légèrement plus élevée que celle de l'eau, ce qui confirme un transfert de chaleur efficace depuis l'absorbeur.

La température de la vapeur montre une progression parallèle, avec des pics atteignant 60–65 °C durant les jours les plus ensoleillés (notamment les 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> jours).

L'évolution thermique sur l'ensemble des 4 jours reste ascendante et cohérente, démontrant une bonne inertie thermique du système.

➤ **Températures du vitrage (intérieur/extérieur) :**

La température intérieure du vitrage ( $T_{\text{vitrage.int}}$ ) est systématiquement supérieure à celle du vitrage extérieur ( $T_{\text{vitrage.ext}}$ ) pendant toute la période active (10h00–16h00). Cet écart thermique met en évidence un effet de serre efficace, essentiel pour l'élévation thermique

à l'intérieur du distillateur. Les pics de  $T_{\text{vitrage.int}}$  atteignent jusqu'à  $65^{\circ}\text{C}$ , renforçant le réchauffement global du volume d'air interne.

➤ **Températures de l'isolant, du sol :**

La température de l'isolant intérieur est toujours supérieure à celle de l'isolant extérieur, montrant une bonne isolation thermique du distillateur et limitant les pertes de chaleur.

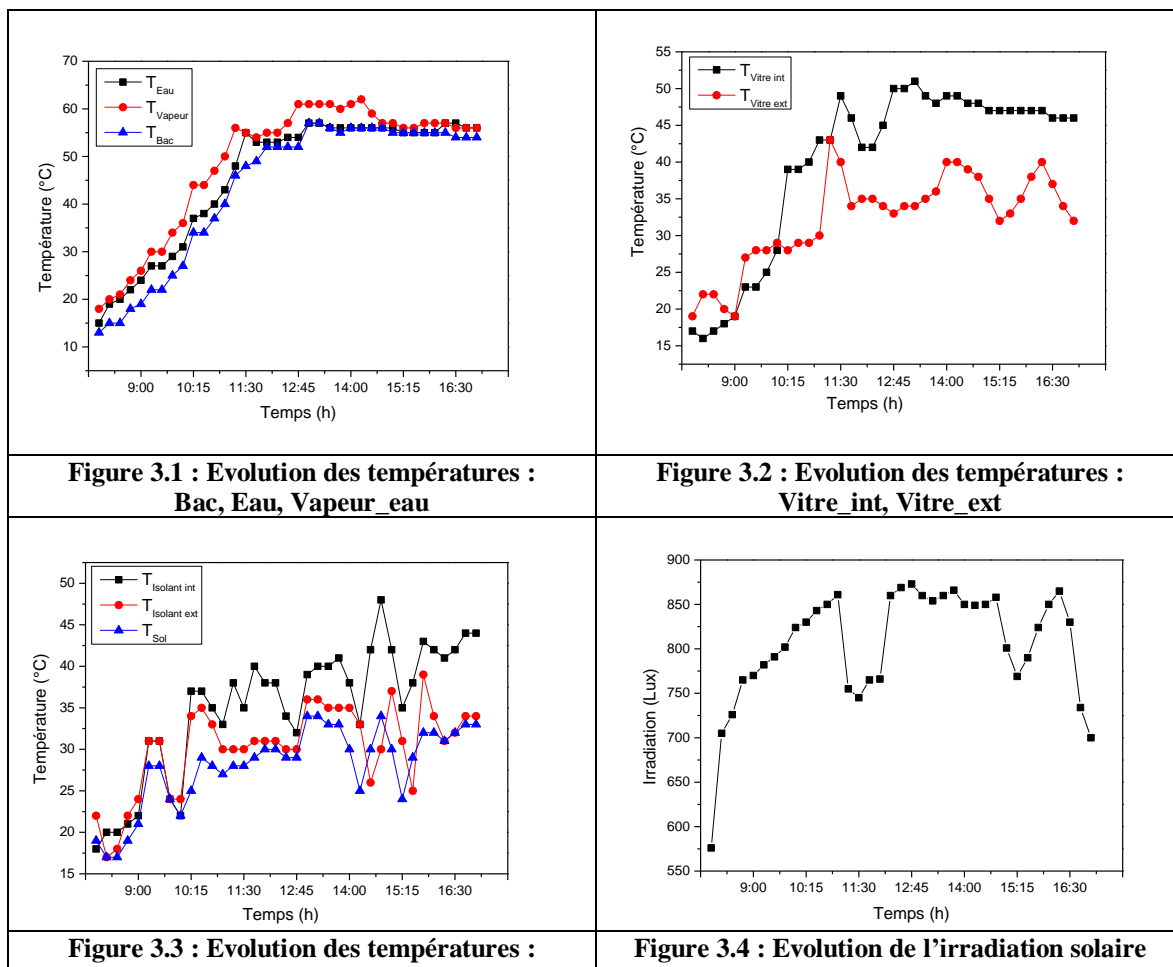
La température du sol reste plus faible et moins variable, ce qui indique qu'il joue un rôle thermique secondaire, principalement en maintenant une base stable sans influencer fortement la dynamique thermique.

➤ **Irradiation solaire:**

La courbe d'irradiance solaire montre des pics réguliers entre 11h00 et 14h30, dépassant parfois 900 Lux, ce qui correspond aux périodes de chauffe maximale du système. Les variations d'ensoleillement influencent directement les températures internes du distillateur, confirmant la forte dépendance du rendement thermique à l'irradiance reçue.

**2.2.2. Etude de l'évolution des principaux paramètres au cours du deuxième essai :**

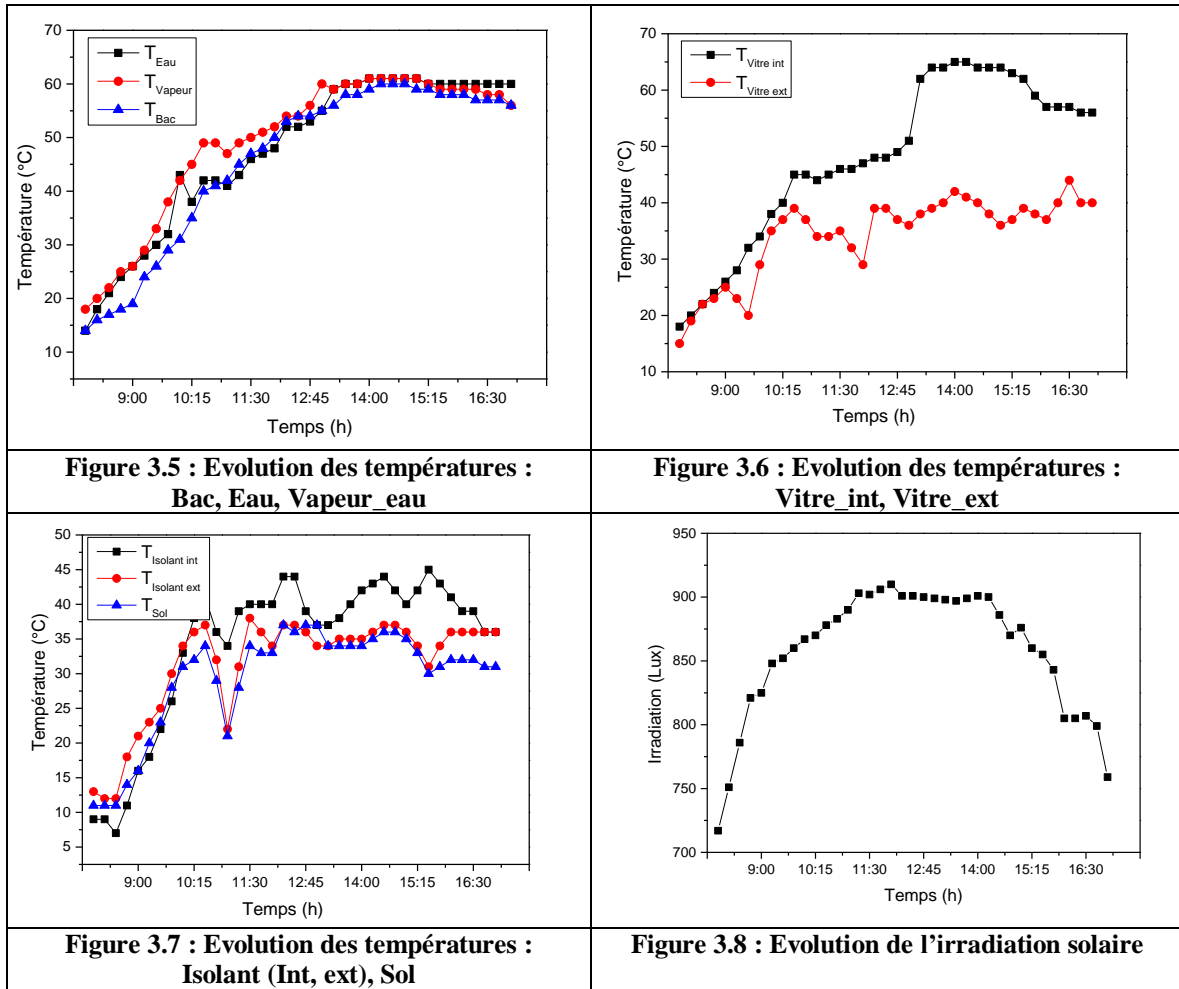
*Table 9: Évolution des paramètres principaux au cours du 1er jour du 2<sup>e</sup> essai.*



Isolant (Int, ext), Sol		N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B		37	0,89351	0,78075	33,06	0	0,8	2,8

Variation de la vitesse du vent

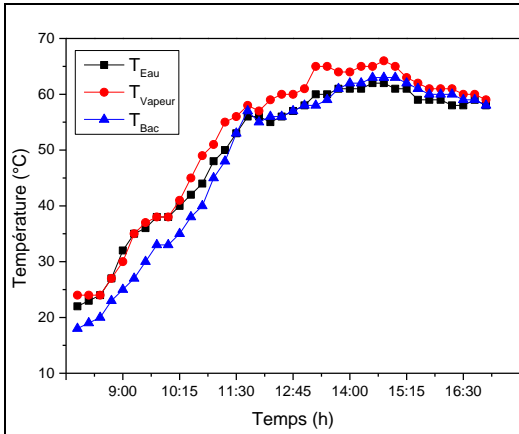
**Table 10:** Évolution des paramètres principaux au cours du 2<sup>e</sup> jour du 2<sup>e</sup> essai.



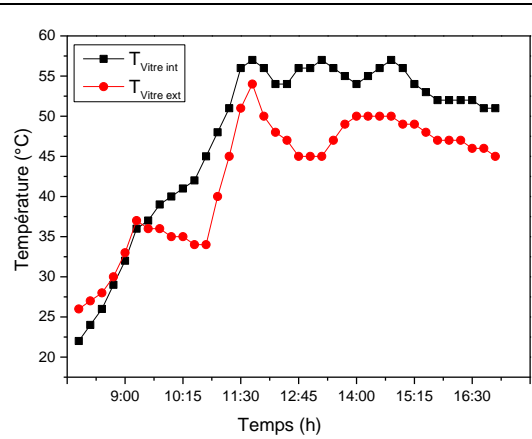
	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B	37	0,86649	0,65683	32,06	0,2	1	3,77

Variation de la vitesse du vent

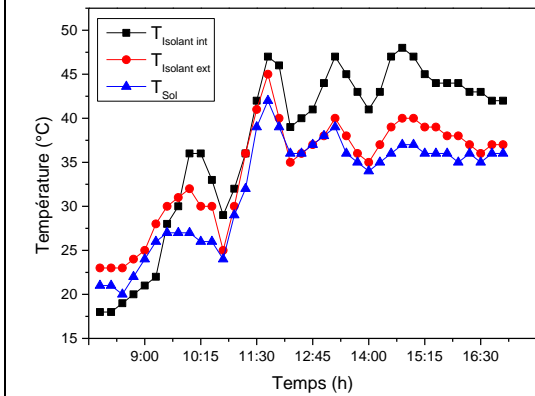
**Table 11:** *Évolution des paramètres principaux au cours du 3<sup>e</sup> jour du 2<sup>e</sup> essai.*



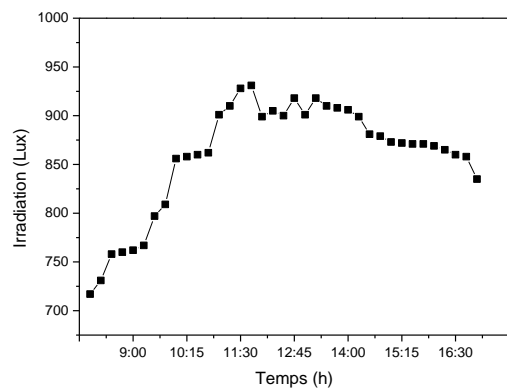
**Figure 3.5 :** Evolution des températures : *Bac, Eau, Vapeur\_eau*



**Figure 3.6 :** Evolution des températures : *Vitre\_int, Vitre\_ext*



**Figure 3.7 :** Evolution des températures : *Isolant (Int, ext), Sol*

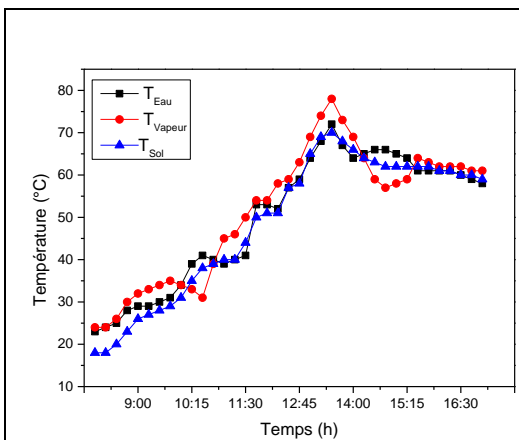


**Figure 3.8 :** Evolution de l'irradiation solaire

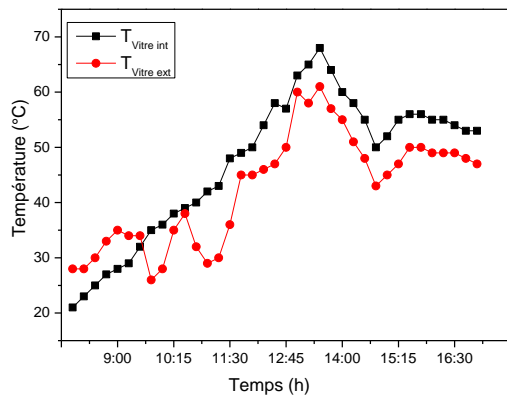
	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B	37	0,72595	0,51556	26,86	0	0,8	2

Variation de la vitesse du vent

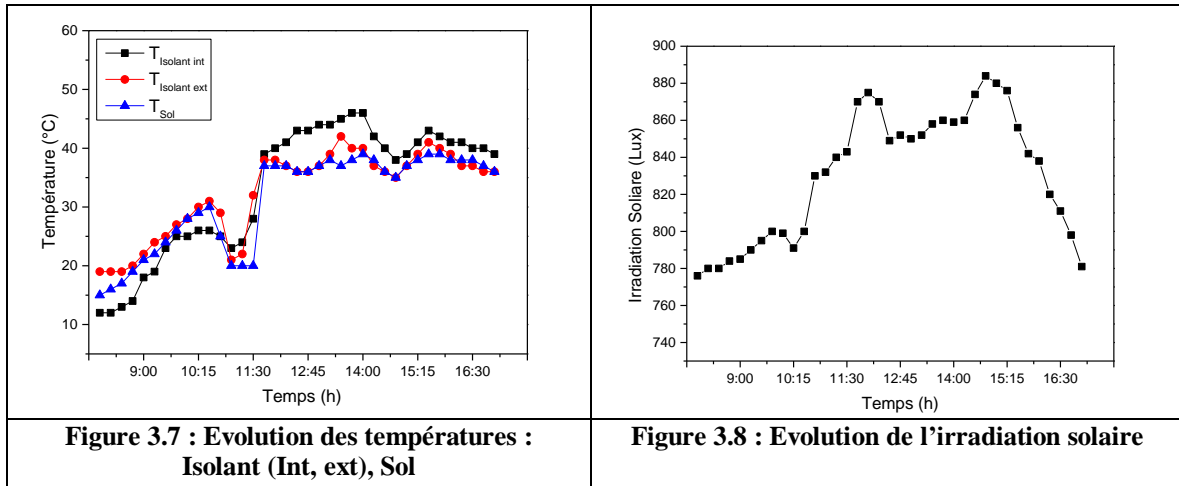
**Table 12:** *Évolution des paramètres principaux au cours du 4<sup>e</sup> jour du 2<sup>e</sup> essai.*



**Figure 3.5 :** Evolution des températures : *Bac, Eau, Vapeur\_eau*



**Figure 3.6 :** Evolution des températures : *Vitre\_int, Vitre\_ext*



**Figure 3.7 : Evolution des températures :  
Isolant (Int, ext), Sol**

**Figure 3.8 : Evolution de l'irradiation solaire**

	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
B	37	0,78297	0,38155	28,97	0,2	0,8	1,86

Variation de la vitesse du vent

➤ **Températures du bac, de l'eau et de la vapeur :**

Les températures internes suivent une évolution parallèle et stable durant les quatre jours d'essai. La température de l'eau augmente de 15 °C le matin jusqu'à 60 °C l'après-midi, tandis que celle du bac reste légèrement plus élevée. La vapeur atteint jusqu'à 68 °C, en particulier lors des journées les plus ensoleillées. Ces valeurs traduisent un bon transfert thermique et une forte exposition solaire. Les courbes sont uniformes, sans fluctuations majeures, ce qui indique des conditions météorologiques stables.

➤ **Températures du vitrage (intérieur/extérieur) :**

Une différence constante est observée entre  $T_{\text{vitrage-int}}$  et  $T_{\text{vitrage-ext}}$ , surtout entre 10h00 et 16h00.  $T_{\text{vitrage-int}}$  dépasse souvent 50 °C, tandis que  $T_{\text{vitrage-ext}}$  reste plus basse d'environ 10 °C. Cela confirme un effet de serre efficace et un bon maintien de la chaleur interne.

➤ **Températures de l'isolant, du sol :**

La température de l'isolant intérieur est supérieure à celle de l'extérieur, montrant une bonne isolation thermique.

Le sol reste thermiquement stable, avec un impact limité sur les transferts de chaleur internes.

➤ **Irradiation solaire:**

L'irradiance solaire présente des pics marqués entre 11h00 et 14h30, atteignant parfois 900 Lux. Elle reste stable et intense tout au long de la campagne, ce qui favorise une élévation thermique régulière dans l'ensemble du distillateur.

Ces résultats concordent bien avec des études précédentes [17-19].

- ❖ Au cours des essais, la vitesse du vent a fluctué entre 0,2 m/s et 4,12 m/s.
- ❖ La pression interne d'un distillateur solaire est cruciale pour son efficacité, étant influencée par sa conception (étanchéité, surface de condensation) et les conditions environnementales (température, vent). Ce paramètre est essentiel car il intervient directement dans les processus de changement des phases de l'eau (évaporation-condensation). Notons que la réduction de la pression interne favorise l'évaporation et augmente la production du distillat [20].

Nos observations ont montré que la pression à l'intérieur des deux distillateurs (simple et en cascade) est généralement maintenue à un niveau bas de 0.4 psi à 0.9 psi pour les deux distillateurs respectivement, souvent proche ou légèrement inférieur à la pression atmosphérique. Ces observations confirment les données déjà établies.

### 3. Étude comparative de l'eau avant et après traitement par distillation :

L'eau utilisée au cours de l'expérience est une eau douce provenant du robinet. Le tableau 3.2 présente les différentes grandeurs physico-chimiques mesurées avant et après le processus de distillation, à savoir : le TDS (Total Dissolved Solids), le pH, la conductivité et la salinité.

**Table 13:** Mesures des propriétés de l'eau testée.

	TDS (mg/l)		PH		Conductivité (µS/cm)		Salinité (%)	
	Avant la distillation	Après la distillation	Avant la distillation	Après la distillation	Avant la distillation	Après la distillation	Avant la distillation	Après la distillation
11/05/2025	256	80	7.64	7.50	515	160	0.02 %	0.00 %
12/05/2025		32		7.25		63		0.00 %
13/05/2025		25		7.08		58		0.00 %
14/05/2025		55		6.90		107		0.00 %
17/05/2025		49		6.99		104		0.00 %
11/06/2025	232	85	7.63	7.33	1287	172	0.02 %	0.00 %
12/06/2025		52		7.44		98		0.00 %
14/06/2025		42		7.32		79		0.00 %
15/06/2025		40		7.15		79		0.00 %

Après distillation, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau ont connu des changements significatifs :

- **TDS (Total des Solides Dissous)** : On remarque une réduction importante du Total des

Solides Dissous, avec un taux moyen de diminution d'environ 78,3 % en ppm. Cette baisse témoigne de l'efficacité du procédé de distillation à éliminer les impuretés dissoutes dans l'eau.

- **pH** : le pH présente une valeur d'un eau distillée dans les normes, lors des expériences on a observé une légère diminution du pH, de l'ordre de 0,3 à 0,7 unités, en moyenne, ce qui s'explique par la perte des substances alcalines et minérales lors de la distillation.
- **Conductivité électrique** : la conductivité électrique a également diminué de manière significative, avec un taux moyen de réduction de 81,3 %, indiquant une nette baisse de la concentration en ions dissous (sels inorganiques).
- **Salinité** : La salinité est passée de **0.02 % à 0.00 %** dans tous les cas, ce qui reflète l'élimination complète des sels dissous dans l'eau distillée.

#### **4. Analyse comparative de la production d'eau distillée pour les deux distillateurs et les deux campagnes expérimentales :**

##### **4.1. Distillateur solaire en cascade :**

**Table 14:** *Données sur l'accumulation journalière de l'eau distillée – Distillateur solaire en cascade–*

/	<b>Le premier essai (11-14 mai)</b>	<b>Le deuxième essai (11-15 juin)</b>
Volume d'eau distillée (ml)	1510	4280

##### **4.2. Distillateur solaire simple :**

**Table 15:** *Données sur l'accumulation journalière de l'eau distillée – Distillateur solaire simple –*

/	<b>Le premier essai (11-14 mai)</b>	<b>Le deuxième essai (11-15 juin)</b>
Volume d'eau distillée (ml)	800	3510

##### **4.3. Analyse et discussion:**

Les résultats obtenus sur les deux distillateurs montrent une nette supériorité du distillateur solaire en cascade par rapport au modèle simple. Lors du premier essai (11–14 mai), avec de l'eau non potable et des conditions météorologiques instables, le distillateur en cascade a produit 1510 ml d'eau distillée contre seulement 800 ml pour le distillateur simple. Cette différence significative peut être attribuée à une meilleure récupération thermique grâce à l'effet de cascade.

Lors du deuxième essai (11–15 juin sauf le 13 juin), effectué avec une eau légèrement saumâtre et sous un climat plus stable, la performance globale des deux systèmes s'est améliorée. Le distillateur en cascade a atteint une production de 4280 ml, tandis que le distillateur simple a produit 3510 ml. L'écart reste en faveur du modèle en cascade, bien que

le distillateur simple ait notablement augmenté son rendement.

Ces résultats confirment que le système en cascade optimise l'utilisation de la chaleur solaire, tout en montrant l'influence notable de la qualité de l'eau et des conditions climatiques sur les performances globales des distillateurs.

## 5. Comparaison du rendement thermique entre le distillateur solaire simple et le distillateur en cascade :

**Tableau 16 :** *Données comparatives du rendement thermique.*

$\eta$	Le premier essai (11-14 mai)		Le deuxième essai (11-14 juin)	
	Le distillateur simple	Le distillateur en cascade	Le distillateur simple	Le distillateur en cascade
	5.49%	7.89%	20.97%	22.38%

- ❖ Lors du premier essai (11–14 mai), le distillateur en cascade a montré un rendement légèrement supérieur (7,89 %) par rapport au distillateur simple (5,49 %), ce qui confirme déjà l'effet bénéfique de la configuration en cascade.
- ❖ Lors du deuxième essai (11–14 juin), une amélioration notable a été observée pour les deux systèmes, probablement en raison d'un ensoleillement plus intense ou de meilleures conditions expérimentales. Le rendement du distillateur simple est passé à 20,97 %, tandis que celui du distillateur en cascade a atteint 22,38 %, conservant ainsi une performance supérieure.

Ces résultats confirment que la configuration en cascade améliore le rendement thermique, notamment en exploitant mieux la chaleur latente et en favorisant l'évaporation sur plusieurs niveaux, surtout lorsque les conditions solaires sont favorables.

## **Conclusion Générale :**

Dans ce travail, nous avons étudié, conçu et testé expérimentalement deux configurations de distillateurs solaires à double pente : l'un de type classique et l'autre en cascade. L'objectif principal était de comparer leurs performances thermiques et leur productivité en eau distillée, tout en évaluant l'impact du système en cascade sur l'efficacité globale du processus.

Les résultats obtenus à travers deux campagnes expérimentales distinctes ont permis de confirmer l'intérêt du distillateur solaire en cascade. Lors du premier essai, une amélioration du rendement thermique a été observée, passant de 5,49 % pour le modèle classique à 7,89 % pour le modèle en cascade, soit un gain notable. Cette tendance a été confirmée lors du deuxième essai, où le rendement est passé de 20,97 % à 22,38 %, ce qui souligne la régularité et la fiabilité des performances du système en cascade dans des conditions climatiques différentes.

Ces résultats montrent que l'intégration d'un système en cascade dans une configuration à double pente permet d'optimiser l'absorption de la chaleur et la récupération d'eau distillée, en favorisant une meilleure répartition thermique et une surface d'évaporation accrue.

En conclusion, ce travail ouvre des perspectives prometteuses pour l'amélioration des distillateurs solaires. Plusieurs pistes peuvent être envisagées afin d'optimiser davantage les performances du système. L'intégration de matériaux à changement de phase permettrait de stocker l'énergie thermique et de prolonger le fonctionnement du distillateur au-delà des heures d'ensoleillement. De plus, l'ajout de dispositifs d'automatisation, à l'aide de capteurs et de systèmes de contrôle intelligents, faciliterait un fonctionnement autonome et plus efficace. Ainsi, ce projet constitue une base pour le développement de distillateurs solaires intelligents, performants et adaptés aux enjeux environnementaux actuels, contribuant pleinement à un développement durable.

## Références Bibliographiques:

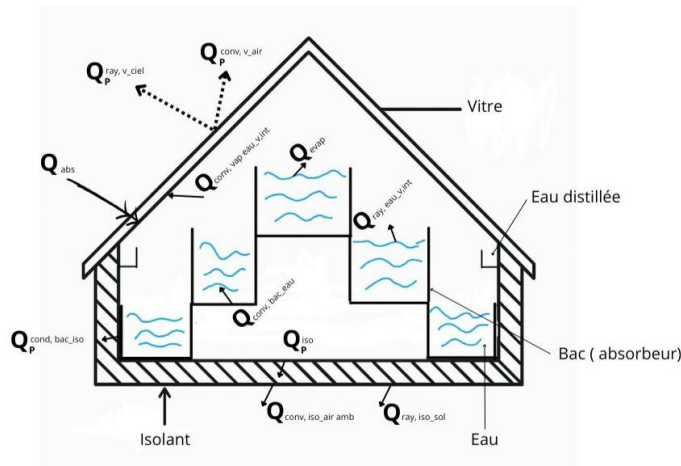
- [1] ATTIA, Mohammed El Hadi, DRISS, Zied, MANOKAR, A. Muthu, et al, Effect of aluminum balls on the productivity of solar distillate. Journal of Energy Storage, vol.2020
- [2] BEN HORMA Hanane, DAOUDI Kaouther, BERDJI Hana, Distillation solaire de l'eau en présence de différents types de charbon », Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [3] LAIB Aymen - MENNANA Tedjani ; Contribution à l'amélioration d'un distillateur simple pente : prédiction par la méthode des réseaux de neurones artificiels ; Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued ; 2018.
- [4] P. Hunkyun, Low-Cost Multi-Effect Solar Still: Alternative Appropriate Technology for Personal Desalination, in: T. Yonar (Ed.), Desalination, Intech Open, Rijeka, 2017.
- [5] <https://www.researchgate.net/profile/Vishwanath-Panangipalli>
- [6] MILIANA, Khemis. Etude des Performances d'un Distillateur Solaire sous les Conditions Climatiques.
- [7] WIENER, Jakub, KHAN, Muhammad Zaman, et SHAH, Kaushal. Performance enhancement of the solar still using textiles and polyurethane rollers. Scientific Reports, 2024.
- [8] DAS, Dudul, BORDOLOI, Urbashi, KALITA, Pankaj, et al. Solar still distillate enhancement techniques and recent developments. Groundwater for sustainable development, 2020, vol. 10, p. 100360.
- [9] <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-solaire/energie-solaire-comment-reduit-emissions-carbone/>
- [10] Kerfah Rabah1, Noura Belkheir, Belaid Fatima Zahra, Laboratoire FIMA, université de Djillali Bounaama- Khemis Miliana, route de theniet el had, Khemis miliana, Algérie \_
- [11] DEGHEFEL, Fadila ; CHAGRA, Sara \_ Étude expérimentale d'un distillateur solaire à mèche avec un réflecteur externe\_ 2019\_ UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [12] Tabet, I., & Bellel, N. (2010). CONTRIBUTION A L'ETUDE, REALISATION ET SIMULATION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE À CASCADES. Sciences & Technology. A, Exactes Sciences\_
- [13] BOUNEGAB Brahim, DJABALLAH Othmane, KHELIEL Sadok, SAOUD Abdesselam, L'effet de type de l'isolant sur le rendement d'un distillateur solaire, 2021/2022, Université Echahide Hamma Lakhdar d'El Oued Faculté de Technologie
- [14] Mohammed Benhammou 1, Belkacem Draoui 2 ,1 Division Thermique & Thermodynamique, Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Adrar, Algeria,2Laboratoire d'Energétique en Zones Arides, Université de Bechar, Bechar, Algeria, Article history : Received 20 July 2013, Received in revised form,15 August 2014, Accepted 19 December 2014
- [15] Retiel N, Abdessamed F, Bettahar M, Etude Expérimentale D'un Distillateur Solaire Plan Amélioré, 2008-12-31, Revue des Energies Renouvelables Volume 11, Pages 635-642
- [16] DJEGHAM, Ali, Etude expérimentale d'un distillateur solaire à quatre vitres,2016, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [17] Chakib. Arslen. BOUSSOUF et Mohamed. HANIFI, Etude et conception d'un distillateur solaire à double pente. Mémoire de PFE, 2024, Ecole Nationale supérieure de technologie et d'ingénierie, Annaba.
- [18] Rajaseenivasan, T., Elango T., and Murugavel K. K. Comparative study of double basin and single basin solar stills. 2013. 309: p. 27-31.
- [19] Khalifa, A.J.N. and A.M.J.D. Hamood, Performance correlations for basin type solar stills. 2009. 249(1): p. 24-28.
- [20] Sriram. V., Samuel. R. H, Kalidasa. M. K, "Experimental Study on a Low-Pressure Solar Still", in Appl. Sol. Energy, Vol. 49, no.3, July 2013, pp. 137-141.

[21] Benhammou. M, Belkacem. D. Division Thermique & Thermodynamique, Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Adrar, Algeria, December 2014

## Annex

### Le bilan énergétique d'un distillateur solaire :

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



*Bilan énergétique d'un distillateur solaire à double pont en saccade.*

#### Bilan du vitrage :

La chaleur absorbée par la vitre est transférée par conduction à travers celle-ci.

La vitre possède deux faces, intérieure et extérieure, par lesquelles la chaleur peut être transférée.

#### Face extérieure:

$$\frac{M_v C_{p,v}}{2S_v} \cdot \frac{dT_{v,ext}}{dt} = \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{v,int} - T_{v,ext}) - Q_p ray,v\_ciel - Q_p conv,v\_air + \frac{Q_{abs,v}}{2}$$

$M_v$  : Masse de la vitre.

$C_{pv}$  : Capacité thermique massique de la vitre.

$S_v$  : Surface de la vitre.

$\lambda_v$  : Conductivité thermique de la vitre.

$e_v$  : Épaisseur de la vitre.

$T_v$  : Température de la vitre.

$Q_p ray,v\_ciel$  : Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

$Q_p conv,v\_air$  : Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur.

$Q_{abs,v}$  : Flux absorbé par la vitre.

$\frac{1}{2}$  : Facteur indique que la vitre à deux faces

Avec:

$$Q_{p\ ray,v\_ciel} = h_{ray,v\_ciel} \cdot (T_{v,ext} - T_{ciel})$$

$h_{ray,v\_ciel}$  : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{ray,v\_ciel} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot (T_{v,ext}^2 - T_{ciel}^2) \cdot (T_{v,ext} + T_{ciel})$$

$\varepsilon_v$  : Émissivité de la vitre.

$\sigma$  : Constante de Steffan – Boltzman.

$$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$T_{ciel}$  : Température du ciel, donnée par la relation suivante :

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5}$$

$$Q_{p\ conv,v\_air} = h_{conv,v\_air} \cdot (T_{v,ext} - T_{amb})$$

$h_{conv,v\_air}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

$$h_{conv,v\_air} = 7.5 + 3.8 V$$

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

$$Q_{abs,v} = \alpha_v \cdot \tau_v \cdot S_v \cdot G$$

$\alpha_v$  : Absorbance de la vitre.

$\tau_v$  : Transmissivité de la vitre.

G: Irradiance solaire (W/m<sup>2</sup>).

### Face intérieure:

$$\frac{M_v C_{pv}}{2S_v} \cdot \frac{dT_{v,int}}{dt} = - \frac{\lambda_v}{e_v} (T_{v,int} - T_{v,ext}) + Q_{ray,eau\_v,int} + Q_{conv,vap\ eau\_v,int} + Q_{evap} + \frac{Q_{abs,v}}{2}$$

$Q_{ray,eau\_v,int}$  : Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et la vitre intérieure.

$Q_{conv,vap\ eau\_v,int}$  : Flux thermique par convection entre le film d'eau et a vitre intérieure.

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

Avec:

$$Q_{ray,eau\_v,int} = h_{ray,eau\_v,int} \cdot (T_{eau} - T_{v,int})$$

$h_{ray,eau\_v,int}$  : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre intérieure.

$$h_{ray,eau\_v,int} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot (T_{eau}^2 - T_{v,int}^2) \cdot (T_{eau} + T_{v,int})$$

$\varepsilon_{eff}$  : Émissivité effectif.

$$\varepsilon_{eff} = \left( \frac{1}{\varepsilon_{eau}} + \frac{1}{\varepsilon_{vitre}} - 1 \right)^{-1}$$

$$Q_{conv,vap\ eau\_v,int} = h_{conv,vap\ eau\_v,int} \cdot (T_{eau} - T_{v,int})$$

$h_{conv,vap\ eau\_v,int}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et la vitre intérieure.

$$h_{conv,vap\ eau\_v,int} = 0.884 \left[ T_{eau} - T_{v,int} + \frac{(T_{eau} - T_{v,int})(T_{eau} + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - Pr_{eau}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$Pr_{eau}$  : La pression d'eau

$$Q_{evap} = h_{evap} \cdot (T_{eau} - T_{v,int})$$

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

$$h_{evap} = 16.273 \cdot 10^3 \cdot h_{conv,vap\ eau\_v,int} \cdot \left( \frac{Pr_{eau} - Pr_{v,int}}{T_{eau} - T_{v,int}} \right)$$

**Bilan de l'eau:**

$$\frac{M_{eau} C_{p,eau}}{S_{eau}} \cdot \frac{dT_{eau}}{dt} = Q_{conv,bac\_eau} - Q_{conv,eau\_v,int} - Q_{evap} - Q_{ray,eau\_v,int} + Q_{abs,eau}$$

$Q_{conv,bac\_eau}$  : Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$Q_{abs,eau}$  : Flux absorbé par la nappe d'eau, dans la plupart des cas est considéré comme négligeable.

Avec:

$$Q_{conv,bac\_eau} = h_{conv,bac\_eau} \cdot (T_{bac} - T_{eau})$$

$h_{conv,bac\_eau}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$$h_{conv,bac\_eau} = \frac{Nu \cdot \lambda_{eau}}{L}$$

**Bilan du bac:**

$$\frac{M_{bac} C_{p,bac}}{S_{bac}} \cdot \frac{dT_{bac}}{dt} = Q_{bac} - Q_{conv,bac\_eau} - Q_{p\ cond,bac\_iso}$$

$Q_{p\ cond,bac\_iso}$  : Flux thermique perdu par conduction entre le bac et l'isolant.

$Q_{bac}$  : Flux absorbé par le bac.

Avec:

$$Q_{p\ cond,bac\_iso} = \frac{\lambda_{bac}}{e_{bac}} \cdot (T_{bac} - T_{iso,int})$$

$\lambda_{bac}$  : Conductivité thermique du bac.

$e_{bac}$  : Épaisseur du bac.

$$Q_{bac} = \alpha_{bac} \cdot \tau_{bac} \cdot S_{bac} \cdot G$$

$\alpha_{bac}$  : Absorbance de bac.

$\tau_{bac}$  : Transmissivité de bac.

**Bilan de l'isolant :**

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

**Au niveau de la face intérieure :**

$$\frac{M_{iso} C_{p,iso}}{2S_{iso}} \cdot \frac{dT_{iso,int}}{dt} = Q_{p\ cond,bac\_iso} - Q_{p\ iso}$$

Avec :

$$Q_{p\ iso} = \left( \frac{\lambda_{iso}}{e_{iso}} \right) \cdot (T_{iso,int} - T_{iso,ext})$$

$\lambda_{iso}$ : Conductivité thermique de l'isolant.

$e_{iso}$ : Épaisseur de l'isolant.

**Au niveau de la face extérieure :**

$$\frac{M_{iso} C_{p,iso}}{2S_{iso}} \cdot \frac{dT_{iso,ext}}{dt} = \left( \frac{\lambda_{iso}}{e_{iso}} \right) \cdot (T_{iso,int} - T_{iso,ext}) - Q_{p\ ray,iso\_sol} - Q_{p\ conv,iso\_air}$$

$Q_{p\ ray,iso\_sol}$  : Flux thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol.

$Q_{p\ conv,iso\_air}$  : Flux thermique par convection entre l'isolant et l'air extérieure.

Avec:

$$Q_{p\ ray,iso\_sol} = h_{ray,iso\_sol} \cdot (T_{iso,ext} - T_{sol})$$

$h_{ray,iso\_sol}$  : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre l'isolant et le sol.

$$h_{ray,iso\_sol} = \varepsilon_{iso} \cdot \sigma \cdot (T_{sol}^2 - T_{iso,ext}^2) \cdot (T_{sol} + T_{iso,ext})$$

$\varepsilon_{iso}$  : Émissivité de l'isolant.

$$Q_{p\ conv,iso\_air} = h_{conv,iso\_air} \cdot (T_{iso,ext} - T_{amb})$$

$h_{conv,iso\_air}$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur.

$$h_{conv,iso\_air} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air}}{L}$$

**Bilan de condensat :**

C'est la Vitesse à laquelle la vapeur d'eau se condense pour se transformer en liquide.

$$\frac{dM_c}{dt} = h_{evap} \cdot \left( \frac{T_{eau} - T_{v,int}}{L_v} \right)$$

$M_c$  : Masse du condensât.

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation.

**Le rendement :**

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour [21].

L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur.

Le rendement d'un distillateur est :

$$\eta = \frac{Md \times Lv}{G}$$

Avec :  $Md = \frac{Q_{evp}}{Lv}$

$Lv$  : Chaleur latente d'évaporation.

$Md$  : Débit de masse distillat.

$G$  : densité de flux solaire global incident