



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique énergétique et énergie renouvelable

Par :

BOUABDALLAH Imene

Sur le thème

Simulation d'un chauffe-eau solaire dans une maison

Soutenu publiquement le 26 juin 2023 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme MEDJAHDI Sarah Ines	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme CHADEL Meriem	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme SARI ALI Inchirah	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année Universitaire : 2022 ~ 2023

Remerciements

Tout d'abord, louange à ALLAH qui nous a guidés sur le droit Chemin tout au long du travail et qui nous a donné la Volonté et le Courage pour accomplir ce modeste travail.

J'exprime d'abord mes profonds remerciements, ma vive reconnaissance et ma sincère gratitude à Mme Chadel Meriem, maitre de conférences B au Département de physique, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour son aide, ses encouragements, ses précieux conseils, sa patience, tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Que nous vifs remerciements aillent à Mme Medjahdi Sarah Inès, maitre de conférences A au Département de physique, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Qui nous nous a fait l'honneur de présider le jury. Nous lui adressons également nos hommages les plus respectueux.

À Mme Sari Ali Inchirah, maitre de conférences B au Département de physique, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Qui nous a fait l'immense honneur d'accepter d'être examinatrice de ce mémoire.

Dédicace

Grace à dieu tout puissant, nous dédions ce modeste travail à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire plus particulièrement : A mes très chers parents.

A mon très cher Papa : je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, tes conseils et tes sacrifices illimités.

A ma chère Maman : je te remercie pour ton encouragement, tes conseils, tes sacrifices et je suis là aujourd'hui grâce à toi.

A mon cher frère unique Boumediene Abdelkrim : qui n'a mis aucun refus à me porter aide et assistance, je te remercie pour ton appui et ton encouragement

A tous les amis qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours universitaire.

Je tiens aussi à remercier Ramdani Mohamed Cherif et Benyahia Khadidja pour leur aide.

BOUABDALLAH Imene

Table des matières

Introduction général	11
----------------------------	----

Chapitre I: Etat de l'art de l'énergie solaire.

1. Introduction.....	13
2. Énergie solaire	13
2.1. Le soleil	13
2.1.1. L'angle horaire noté (w).....	13
2.1.2. Angle d'incidence sur un plan quelconque.....	13
2. Masse de l'air (AM).....	14
3. Le rayonnement solaire.....	15
3.1. Les composantes du rayonnement solaire	15
3.1.1. Rayonnement direct.....	15
3.1.2. Rayonnement diffus	16
3.1.3. Rayonnement réfléchi	16
3.2. Estimation du rayonnement solaire	16
3.3. Estimation de la température	17
4. Energie solaire photovoltaïque	17
5. Energie solaire thermique	17
5.1. Principe de fonctionnement	18
6. Potentiel solaire en Algérie	18
7. Conclusion :	19
Bibliographie.....	20

Chapitre II: Modélisation d'un chauffe-eau solaire

1. Introduction.....	24
2. Les différents types de capteurs solaires.....	24
2.1. Les capteurs plans.....	24
2.1.1. Les capteurs plans vitrés	24
2.1.2. Le capteur plan sans vitrage	26
2.1.2.1. Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan	26
2.2. Capteur à tube sous vide	28
2.3. Les capteurs solaires par concentration	29
3. Rappels sur les éléments d'échange thermique	30
3.1. Transfert de chaleur par conduction	30

3.2.	Le transfert de chaleur par convection	31
3.2.1.	Convection naturelle (libre)	31
3.2.2.	Convection forcée	32
3.3.	Transfert de chaleur par rayonnement	33
4.	Modélisation d'un chauffe-eau solaire.....	34
4.1.	Le capteur solaire.....	34
4.2.	Le ballon de stockage	37
4.3.	Le groupe de transfert.....	37
5.	Types de chauffe-eau-solaire CES	38
5.1.	CES à thermosiphon	38
5.2.	ECS à circulation forcée.....	37
5.3.	Le chauffe-eau monobloc	40
5.4.	Les chauffe-eau auto vidange	40
6.	Conclusion	40
	Bibliographie.....	42

Chapitre III: Résultats et Discussion de la simulation d'un CES

1.	Introduction.....	46
2.	Présentation du logiciels TRNSYS	46
3.	Fiabilité d'un capteur	47
4.	Choix de site	48
5.	Inclinaison optimale d'un capteur.....	52
6.	Résultat et discussion de la simulation	52
6.1.	Choix de la maison	59
6.2.	le besoins énergétiques	51
6.2.1.	L'eau chaude sanitaire d'une maison individuelle.....	51
6.2.2.	La puissance utile.....	52
6.2.3.	La fraction solaire	53
6.2.4.	Le rendement du capteur	54
6.3.	Système simulé.....	54
6.4.	Les différents composants de la simulation	57
6.5.	CES collecteur plan.....	57

6.5.1. Influence de l'angle.....	60
6.5.2.L'influence de la surface.....	64
6.6. CES à Capteur à tube sous vide.....	68
6.6.1. Optimisation de l'angle de l'inclinaison	69
6.6.2. Optimisation de la surface.....	73
6.7. Comparaison entre les résultats obtenu par capteur solaire plan et capteur solaire à tube sous vide	78
7. Conclusion	80
Bibliographie.....	81

Liste des figures :

Chapitre I: Etat de l'art de l'énergie solaire.

Figure I.1 : Coordonnées horizontales.	14
Figure I.2 : Spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.	15
Figure I.3 : Rayonnement direct, diffus et réfléchi.	16
Figure I.4: Processus dans un capteur solaire plan.	18
Figure I.5: Irradiation journalière reçue sur un plan horizontal au mois de juillet 2018.	19

Chapitre II: Modelisation et simulation des CES

Figure II.1: Capteur plan vitré.	26
Figure II. 2: Capteur non vitré.	26
Figure II.3: Les composants d'un capteur solaire plan.	27
Figure II.4: Capteur à tube sous vide	28
Figure II.5: Présentation des systèmes capteur à concentration : (a) capteur cylindro-parabolique, (b) capteur parabolique, (c) tour solaire.	29
Figure II.6: Transfert de chaleur par conduction.	30
Figure II.7: Le transfert de chaleur par convection	31
Figure II.8: Schématisation des phénomènes thermiques.	34
Figure II.9: Chauffe-eau solaire.	37
Figure II.10: Schéma d'un système à thermosiphon.	39
Figure II.11: Système à circulation forcée.	39
Figure II.12: Chauffe-eau solaire monobloc.	40

Chapitre III: Résultats et Discussion de la simulation d'un CES

Figure III.1: Interface de TYRNSYS	47
Figure III.2: Un modèle sous TRNSYS	47
Figure III.3: Présentation du logiciel Meteonorm	49
Figure III.4: Carte géographique de la ville de Tlemcen.	49
Figure III.5 : La température annuelle du site de Tlemcen.	50
Figure III.6 : Durée de l'ensoleillement du site Tlemcen.	51
Figure III.7 : Le rayonnement diffus et global du site de Tlemcen.	52
Figure III.8: Exemple de création d'un projet.	57
Figure III.9 : Modélisation sous TRNSYS de la maison étudiée	58
Figure III.10: L'évolution des températures d'entrée, de sortie, et la température ambiante, et de l'énergie en fonction de temps.	60
Figure III. 11: L'évolution des températures et de l'énergie en fonction de temps.	61
Figure III. 12: L'évolution des températures et de l'énergie en fonction de temps.	61

Figure III. 13: La variation de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie, ainsi que la température ambiante en fonction du temps.....	62
Figure III.14: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré et de sortie et la température ambiante pour le 1 janvier.....	62
Figure III.15: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré et de sortie et la température ambiante pour le 1 aout.....	63
Figure III.16: L'évolution de l'énergie en fonction du temps, ainsi que celle des températures.....	65
Figure III. 17: L'évolution de l'énergie, ainsi que celle des températures d'entrée et de sortie et de la température ambiante, en fonction du temps.....	65
Figure III. 18: L'évolution de l'énergie, ainsi que celle des températures d'entrée et de sortie et de la température ambiante, en fonction du temps.....	66
Figure III. 19: La variation de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie, ainsi que la température ambiante en fonction du temps.....	67
Figure III. 20: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré, de sortie et la température ambiante en fonction de temps à gauche le 1 janvier et à droite le 1 aout.....	68
Figure III.21: Schéma de l'installation d'un chauffe-eau solaire à capteur sous vide par TYRNSYS.	69
Figure III. 22: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré et de sortie et la température ambiante en fonction de temps, 10° et 2m ²	69
Figure III. 23: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré et de sortie et la température ambiante en fonction de temps, 30° et 2m ²	70
Figure III. 24: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré et de sortie et la température ambiante en fonction de temps, 60° et 2m ²	71
Figure III. 25: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré et de sortie et la température ambiante en fonction de temps.....	71
Figure III. 26: L'évolution de l'énergie et les températures d'entré et de sortie et la température ambiante en fonction de temps à gauche le 1 janvier et à droite le 1 aout.....	72
Figure III. 27: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie ainsi que la température ambiante au cours du temps.....	74
Figure III. 28: L'évolution de l'énergie et des températures d'entrée et de sortie ainsi que de la température ambiante en fonction du temps.....	74
Figure III. 29: L'évolution de l'énergie, des températures d'entrée et de sortie, et de la température ambiante au fil du temps.....	75
Figure III. 30: L'évolution de l'énergie, les températures d'entrée et de sortie, et la température ambiante en fonction du temps.....	76
Figure III. 31: l'évolution de l'énergie et les différentes températures pour le 1 janvier et le 1 aout.....	77

Liste des tableaux :

Tableau III-1 : Données géographiques de la maison	53
Tableau III-2: La consommation énergétique d'une maison individuelle	54
Tableau III-3: Puissance utile en fonction de la surface	55
Tableau III-4: Les paramètres d'un capteur plan utilisé dans TRNSYS.....	57
Tableau III-5: Les paramètres d'un capteur à tube sous vide utilisé dans TRNSYS.....	58
Tableau III-6: Le rendement en fonction de l'inclinaison du capteur plan. (1 aout et 1 janvier) d'un capteur plan.....	64
Tableau III-7 : La température de sortie maximal et l'énergie maximal pour 10° à 60° et 2m2	72
Tableau III-8 : Le rendement en fonction de l'inclinaison.....	73
Tableau III-9 : L'évolution de la température et de l'énergie en fonction de la surface.	78
Tableau III.10: Les températures de sortie (T out) et d'énergie maximale (En max) d'un capteur plan et un capteur sous vide à une inclinaison de 30° et une surface de 3 m ²	78

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les sources d'énergie dites renouvelables sont celles qui viennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont inépuisables dans le temps, tant que le soleil brille. Cependant, elles sont limitées à la puissance de rayonnement solaire, vitesse du vent, eau, bois ... En effet, l'utilisation de l'énergie solaire pour chauffer l'eau sanitaire est une solution populaire pour les maisons individuelles ou collectives, offrant des bons impacts écologiques et économiques. Pour cela, notre objectif est de modéliser et simuler le comportement d'un chauffe-eau solaire pour garantir une efficacité maximale et une conception optimale. Dans ce contexte, nous avons utilisé le logiciel TRNSYS 17 pour simuler le comportement thermique des différents types de chauffe-eau solaire pour une maison individuelle située à Tlemcen en Algérie. Cette étude, nous a permis de comprendre et d'optimiser le comportement des chauffe-eau solaires dans les maisons individuelles. Ce mémoire est divisé en trois grands chapitres :

Dans le premier chapitre : nous allons présenter l'énergie solaire, l'estimation de rayonnement solaire et de température. Aussi nous avons décrit le potentiel solaire en Algérie.

Dans le deuxième chapitre : nous allons discuter les différents types de capteurs solaires thermiques. Ainsi une modélisation d'un chauffe-eau solaire est présentée.

Le troisième chapitre présente les résultats de notre travail. Où nous allons estimer les besoins en eau chaude sanitaire en utilisant le logiciel TRNSYS17.

Nous clôturons notre mémoire avec une conclusion générale.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE L'ENERGIE SOLAIRE

1. Introduction

L'énergie solaire est l'origine de toutes sources d'énergie renouvelables, la terre reçoit en permanence une énergie fournie du soleil. Dans ce chapitre nous allons présenter l'énergie solaire, le rayonnement solaire et le potentiel solaire en Algérie.

2. Énergie solaire

L'énergie solaire est captée par des panneaux solaires, qui transforment la lumière en électricité.

Cette électricité peut être utilisée immédiatement ou stockée pour une utilisation ultérieure. Les panneaux solaires peuvent être installés sur les toits des maisons ou des bâtiments, ou dans des champs solaires pour une utilisation à grande échelle. Les systèmes solaires peuvent également être utilisés pour chauffer l'eau ou fournir de la lumière dans les zones éloignées. [1]

2.1. Le soleil

Le soleil est une étoile au centre de notre système solaire. Il est principalement composé d'hydrogène et d'hélium et atteint des températures de plusieurs millions de degrés Celsius. Le soleil est la source d'énergie pour l'existence de la vie sur terre, et cette énergie nous est principalement transmise sous forme d'ondes électromagnétiques. [2]

2.1.1. L'angle horaire noté (w)

Elle est définie comme l'angle entre le plan méridien qui passe par le centre du soleil et le plan vertical local. Il représente le déplacement angulaire du soleil par rapport au méridien local, soit vers l'est ou vers l'ouest, en raison de la rotation de la Terre. [1].

2.1.2. Angle d'incidence sur un plan quelconque

L'angle d'incidence, noté i , est défini comme l'angle entre la direction du rayon solaire incident et la normale au plan de la surface réceptrice. Il peut être calculé à l'aide de la relation suivante :

$$\cos(i) = \cos(\alpha - a) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(h) + \sin(\gamma) \cdot \sin(h) \quad \text{I.1}$$

γ : Orientation de plan

a : L'azimut solaire

h : La hauteur du soleil[3]

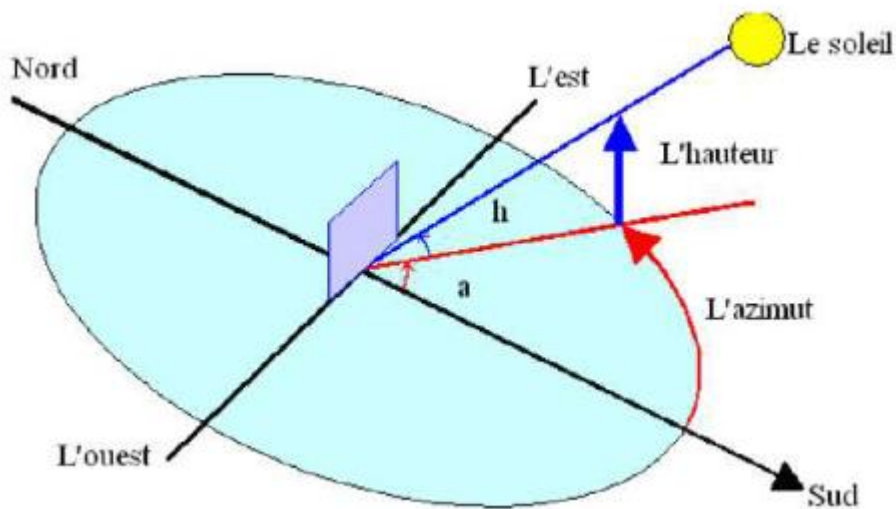


Figure I.1 : Coordonnées horizontales. [17]

2. Masse de l'air (AM)

Le spectre solaire est la distribution de la puissance lumineuse provenant du soleil et arrivant sur terre. Généralement caractériser par la masse de l'air (AM) traversée.

La masse de l'air est la quantité de matière dans un volume d'air spécifique. Elle est utilisée en météorologie pour déterminer les caractéristiques de l'air dans l'atmosphère [4]. La masse d'air est donné par la formule suivante :

$$AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad \text{I.2}$$

Où :

AM : La masse de l'air en kilogrammes (kg)

θ : Représente l'angle d'élévation du soleil par rapport à l'horizon.

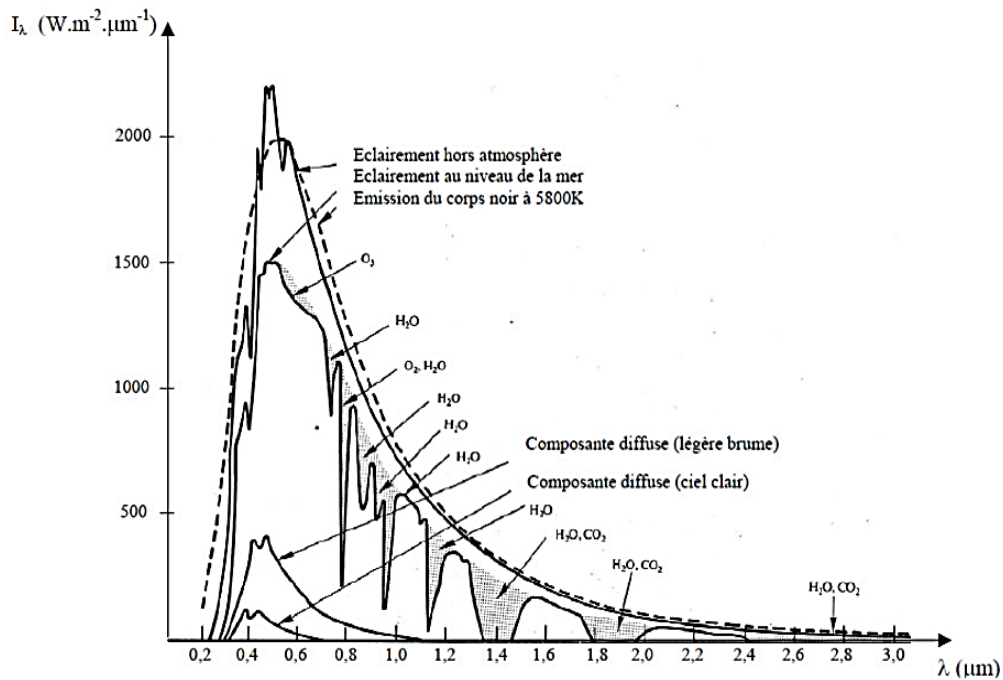


Figure I.2 : La distribution spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. [5]

Nous représentons la distribution spectrale du rayonnement solaire terrestre sur la figure I.2 [5].

3. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est transporté dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques. Il peut être absorbé, réfléchi ou diffusé par l'atmosphère, la surface terrestre etc.... La quantité de rayonnement solaire parvient la surface terrestre dépend de l'angle d'incidence du soleil, la durée du jour, l'altitude, la latitude, la couverture nuageuse etc. ...[6] [7].

3.1. Les composantes du rayonnement solaire

3.1.1. Rayonnement direct

C'est la partie du rayonnement qui se déplace librement à travers l'atmosphère [7].

3.1.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le résultat de la dispersion du rayonnement solaire dans toutes les directions après avoir interagi avec différents éléments tels que l'atmosphère, les nuages et les surfaces réfléchissantes. Contrairement au rayonnement direct, il se caractérise par une diffusion aléatoire. Une partie du rayonnement solaire est diffusée par les molécules d'air et les particules présentes dans l'atmosphère, ainsi que par la réflexion des nuages. Grâce à cette diffusion, le rayonnement solaire est réparti de manière plus uniforme sur la surface terrestre, même dans les zones ombragées ou moins exposées au soleil. Cela signifie que même lorsque le soleil n'est pas directement visible, il y a encore une contribution significative de rayonnement solaire diffus qui atteint la surface, ce qui permet une certaine quantité d'énergie solaire dans ces zones[3].

3.1.3. Rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi est directement proportionnel au rayonnement global incident.

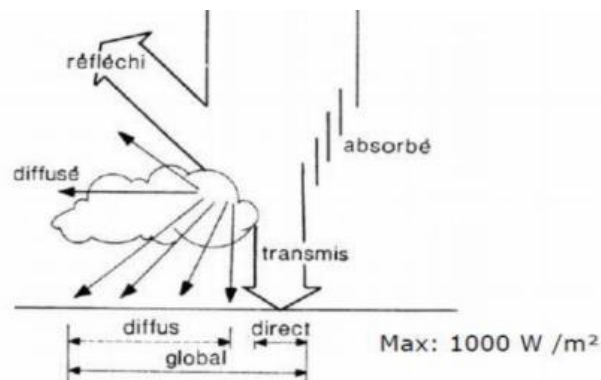


Figure I.3 : Rayonnement direct, diffus et réfléchi. [11]

3.2. Estimation du rayonnement solaire

Afin d'évaluer le rayonnement solaire atteignant la surface terrestre, il est nécessaire de prendre en compte les données géographiques, les conditions météorologiques du site et l'inclinaison de la surface. Plusieurs méthodes théoriques peuvent être utilisées pour estimer le rayonnement solaire, telles que **le Modèle d'Angstrom et le Modèle de Capderou.....**

Le Modèle d'Angstrom : établit une relation entre l'énergie globale moyenne sur un plan horizontal pour une journée donnée avec nuages, et l'énergie globale pour une journée dégagée. Cette formule a été largement utilisée dans des applications pratiques.[8] [9]

Le Modèle de Capderou : quant à lui, permet d'exprimer les irradiances directes et diffuses par ciel clair. Ce modèle se base sur les composantes directes et diffuses de l'irradiation reçue sur un plan[8].

Le Modèle climatique : est une autre approche permettant d'estimer le rayonnement solaire en fonction des conditions climatiques locales [11].

Station météorologique : Enfin, une mesure directe de la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre peut être obtenue à l'aide d'un instrument appelé pyromètre, qui est utilisé dans les stations météorologiques [12].

3.3. Estimation de la température

Pour estimer la température il y'a aussi plusieurs méthodes [13] [14] :

Les satellites météorologiques : mesurent la température de surface à l'aide de capteurs infrarouges.

Les thermomètres infrarouges : mesurent la température de surface à l'aide de rayonnement IR diffusé par la surface.

4. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire est convertie en électricité grâce à l'utilisation de cellules solaires. Ces cellules sont composées d'une ou plusieurs couches de matériau semi-conducteur.

5. Energie solaire thermique

Les capteurs solaires thermiques sont utilisés pour convertir le rayonnement solaire en chaleur, ce qui permet de répondre à une grande partie des besoins en eau

chaude sanitaire et/ou en chauffage domestique [16]. Cette solution offre une alternative durable et efficace pour répondre à ces besoins énergétiques, tout en réduisant l'impact environnemental.

La production d'eau chaude à partir de l'énergie solaire est un procédé simple et la technologie associée est aujourd'hui fiable et bien développée. Ce système est particulièrement adapté aux immeubles résidentiels collectifs et individuels qui sont occupés pendant la majeure partie de l'année.

5.1. Principe de fonctionnement

Les capteurs solaires ou collecteurs solaires absorbent la chaleur du rayonnement solaire. Il se compose principalement d'un absorbeur et un fluide caloporteur. L'élément de base est l'absorbeur parce qu'il absorbe le rayonnement solaire pour le transformer en énergie thermique. La figure I.4 résume le principe de fonctionnement d'un capteur plan.

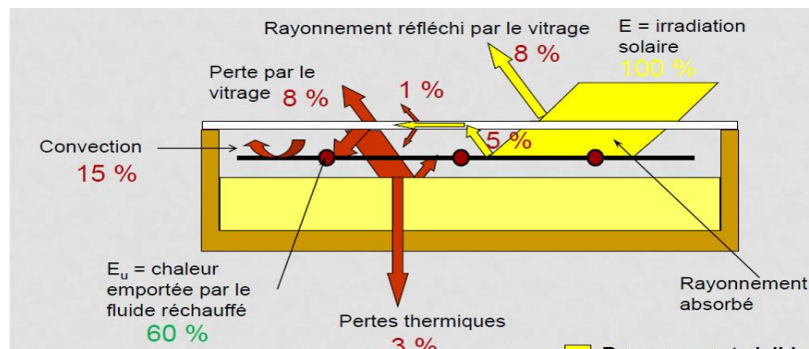


Figure I.4: Processus dans un capteur solaire plan. [5]

Les capteurs solaires sont largement utilisés dans les systèmes de chauffage de l'eau sanitaire. Leur fonctionnement se situe généralement dans une plage de température de 30°C à 60°C. Un capteur solaire se compose d'un boîtier isolé qui est recouvert d'un vitrage. À l'intérieur de ce boîtier se trouve un absorbeur à travers lequel circule un fluide caloporteur. [16]

6. Potentiel solaire en Algérie

Le nouveau programme algérien en matière d'énergies renouvelables vise à installer une capacité de production d'environ 22 000 MW d'ici à 2030. Grâce à sa

situation géographique, l'Algérie bénéficie de l'un des plus importants potentiels solaires au monde. La majeure partie du pays reçoit plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, avec des chiffres pouvant atteindre jusqu'à 3900 heures dans les régions montagneuses et le Sahara. La Figure I.5 illustre l'irradiation solaire totale quotidienne reçue sur le territoire algérien. Dans le sud du pays, l'énergie solaire reçue à l'horizontale est d'environ 5 kWh/m²/jour, ce qui équivaut à environ 1700 kWh/m²/an. Cette abondance d'ensoleillement offre des opportunités prometteuses pour le développement de l'énergie solaire en Algérie.

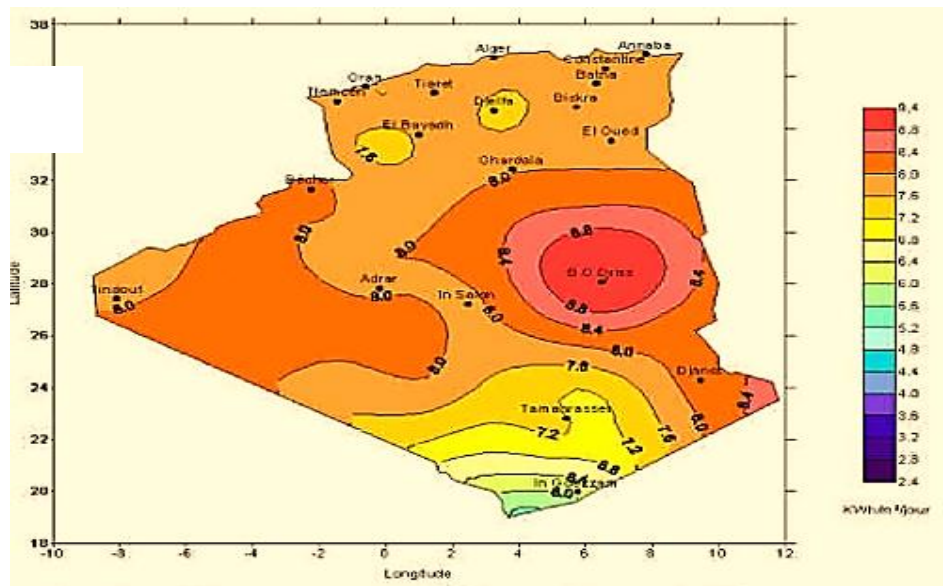


Figure I.5: Irradiation journalière reçue sur un plan horizontal au mois de juillet 2018. [14]

7. Conclusion :

L'énergie solaire est une énergie verte parfaite pour la transition énergétique aussi cette énergie n'émet pas de gaz à effet de serre ou de dioxyde de carbone.

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté le principe de fonctionnement.

Bibliographie

[1] B. Rachid, « Conception et régulation des systèmes fermés de distribution et de circulation de chauffage/climatisation », Thèse de doctorat, avril 2013.

[2] F. Yettou, A. Gama, et C. Hamouda, « Etude et réalisation d'un banc d'essai pour un chauffe-eau solaire à circulation forcée dans la région des Hauts Plateaux », *Journal of Renewable Energies*, 2008, vol. 11, no 1, p. 119–128-119–128.

[3] F. Talbi et R. Bechekour, « Etude et dimensionnement d'un système de chauffage solaire Application au logement individuel type F3 à Bouira », Mémoire de master, 10 octobre 2017.

[4] L. Hadjou Blaid, « Modélisation d'un système mixte entre le collecteur cylindro-parabolique et les cellules en ZnO », Thèse de doctorat, 8 juillet 2021.

[5] F. Sahnoune, « Contribution à la modélisation et à l'expérimentation d'une installation solaire de production d'eau chaude équipée d'un système de télésurveillance », Thèse de doctorat, 15 mars 2016.

[6] A. Gasmi, « L'étude expérimentale de l'influence de l'inclinaison et de vent sur le rendement d'une cellule PV. », mémoire de master, 11 juin 2019.

[7] B. Blum et Schweiz, Éd., «Solare Warmwassererzeugung: Realisierung, Inbetriebnahme und Wartung. in Impulsprogramm PACER. Bern: Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale », Livre, 1995.

[8] S. Ghraibi et S. Bekka, « estimation du rayonnement solaire reçu par un capteur solaire », Mémoire de master, 22 juin 2021.

[9] M.R Yaïche et S.M.A Bekkouche, « Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel », *Journal of Renewable Energies*, vol. 13, no 4, p. 683–695-683–695, 25 décembre 2010.

[11] M. Mesri-Merad et I. Rougab, « Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques », *Journal of Renewable Energies*, 15(3), p.451-463 ,25 septembre. 2012.

[12] F. Trahi, « Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA. », Mémoire de magistère, 2011.

[13] M. Bélanger, El-jabi, N.Caissie, D., et al, « Estimation de la température de l'eau de rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple Water temperature prediction using neural networks and multiple linear regression », *Revue des sciences de l'eau*, vol. 18, no 3, p. 403-421 ,2005.

[14] P. Singh, V. Kumar, T. Thomas, et M. Arora, « Basin-wide assessment of temperature trends in northwest and central India / Estimation par bassin versant de tendances de température au nord-ouest et au centre de l'Inde », *Hydrological Sciences Journal*, vol. 53, no 2, p. 421-433., avril. 2008.

[15] A. Bouras, « Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire », Mémoire de master, 2007.

[16] H. Bentoumi, « Etude numérique et expérimentale d'un capteur solaire thermique en Boussaâda », Thèse de doctorat, 2017.

[17] M., R. Yacine, M. Nadjib, et M. NASRI, K. Salim, M. Kadri, « Dimensionnement d'un Chauffe-eau Solaire », *Revue des sciences de l'eau*, mai 2017.

CHAPITRE II : MODELISATION D'UN CHAUFFE-EAU SOLAIRE

1. Introduction

La modélisation d'un système thermique est une étape importante dans le développement de système de conversion d'énergie solaire en énergie thermique. Dans ce chapitre nous discutons les différents types de capteur solaire ainsi une modélisation d'un système de chauffe-eau solaire est présenté.

2. Les différents types de capteurs solaires

Le capteur solaire agit comme un échangeur de chaleur, convertissant l'énergie du rayonnement solaire en chaleur. Ses absorbeurs captent le rayonnement solaire entrant et le transmettent au fluide caloporteur qui circule dans les capteurs. Les fluides couramment utilisés comprennent l'air, l'eau, l'huile et l'antigel. Les capteurs solaires à concentration utilisent des matériaux à changement de phase pour améliorer leur performance. Le transfert de chaleur entre les différents composants du capteur s'effectue par convection. En fonction des besoins spécifiques en température, les capteurs solaires sont classés en fonction de leur capacité à fournir des températures basses, moyennes ou élevées.[1]

2.1. Les capteurs plans

2.1.1. Les capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires à panneaux plan en verre sont utilisés à très grande échelle et sont plus adaptés à des températures allant de 30°C à 70°C. On utilise généralement le liquide comme de l'eau. Ce type d'appareil est utilisé pour le chauffage individuel ou collectif de l'eau pour les industriels utilisé aussi pour les lieux de baignade intérieur. Capteurs en verre plans pour le séchage, le chauffage et la ventilation, la figure II.1 montre les composants d'un capteur plan en verre.[2]

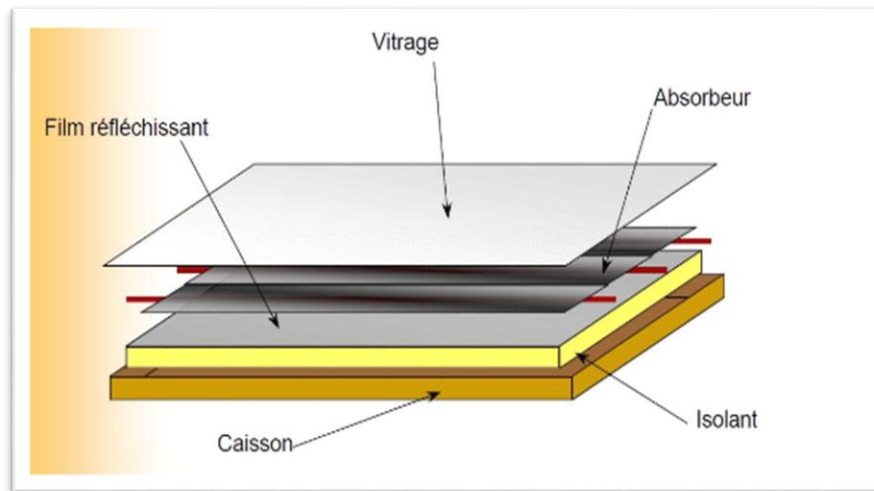


Figure II.1: Capteur plan vitré. [9]

2.1.2. Le capteur plan sans vitrage

Les capteurs plans non vitrés sont considérés comme plus économiques, mais ils ont peu d'efficacité. Ils sont constitués d'une plaque métallique ou d'un matériau absorbant. Les capteurs plats non vitrés sont souvent utilisés dans les basses températures qui ne dépassent pas 30°C. Ce type est utilisé pour chauffer les piscines extérieures [3].

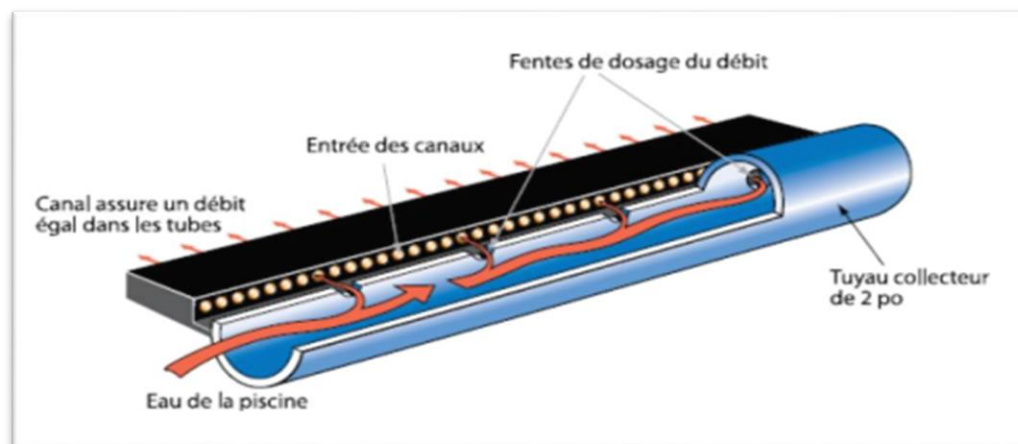


Figure II. 2:Capteur non vitré. [8]

2.1.2.1. Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan

Le capteur plat en verre est principalement composé d'un couvercle transparent, d'un absorbeur et d'une couche d'isolation thermique [4]. La figure II.3 montre les différents composants d'un capteur solaire planaire.

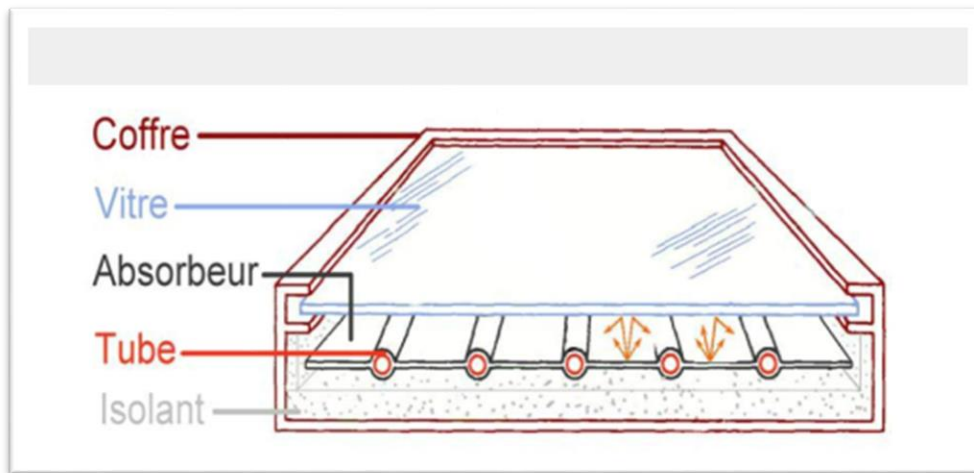


Figure II.3: Les composants d'un capteur solaire plan. [13]

A. La couverture transparente : À l'heure actuelle, le verre est utilisé comme couverture transparente en raison de sa résistance mécanique et thermique, car il présente les caractéristiques suivant coefficient de transmission (τ) et son coefficient d'émission (ε) [5].

B. L'absorbeur : Le rôle principal de l'absorbeur est de capter le rayonnement solaire et de le convertir en chaleur.

Nous le peignons en noir et nous choisissons l'absorbeur selon les critères suivants :

- ✓ Bon coefficient d'absorption;
- ✓ Bonne conductivité thermique;
- ✓ Bonne résistance à la corrosion;

Les matériaux fréquemment utilisés sont le cuivre l'acier et l'aluminium pour leur haute conductivité électrique. [6].[4] [7] [8] [9]

C. Le fluide caloporteur : Afin de dissiper la chaleur emmagasinée dans l'absorbeur, on utilise généralement de l'air ou de l'eau comme fluide caloporteur.

Comparativement à l'eau, l'air présente plusieurs avantages distincts.

- Absence de gel en hiver et d'ébullition en été
- L'air sec est exempt de problèmes de corrosion
- Les fuites d'air sont moins préoccupantes
- Chauffage des locaux sans besoin d'échangeurs de chaleur
- Le système est plus simple et plus fiable lors de son installation.

Cependant, l'utilisation de l'air présente certains inconvénients :

- L'air ne convient qu'au chauffage des locaux
- La tuyauterie doit être de taille suffisante pour garantir un débit adéquat
- Le transfert de chaleur n'est pas aussi efficace qu'avec l'eau.

D. L'isolant : Le capteur doit avoir une bonne isolation thermique qui doit être fabriqué avec des matériaux adéquats. Afin de minimiser les pertes de chaleur par conduction à travers la surface du capteur, l'isolant thermique doit avoir une faible conductivité thermique.

Les matériaux d'isolation généralement utilisés sont :

- La laine minérale
- Les matériaux synthétiques. [5] [10]

2.2. Capteur à tube sous vide

Les capteurs solaires sous vide sont constitués d'un ensemble de tubes en verre transparent contenant une plaque absorbante qui facilite le processus de transfert de chaleur sans matériaux isolants.[3]

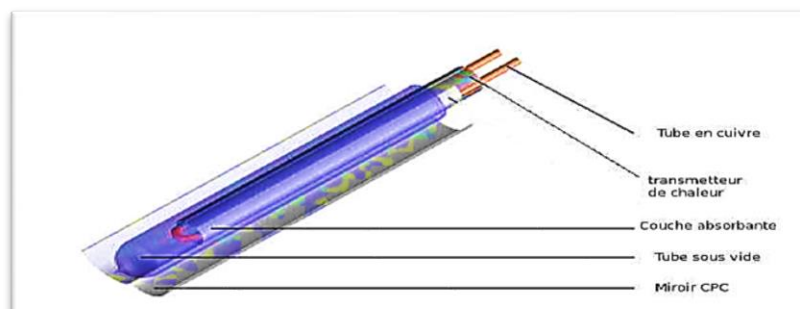


Figure II.4: Capteur à tube sous vide [15]

2.3. Les capteurs solaires par concentration

Les capteurs plats ne sont pas capables de transporter des fluides caloporteurs à des températures extrêmement élevées. Par conséquent les capteurs peuvent donc être utilisés de manière centralisée, bien qu'ils soient complexes. Où ce capteur contient un système optique qui focalise le rayonnement qu'il reçoit sur l'absorbeur. [2]

Deux types de collecteurs d'enrichissement peuvent être distingués :

2.3.1. Capteur solaire parabolique

Un capteur solaire parabolique concentre les rayons du soleil en un point focal spécifique. Les progrès réalisés ont permis d'atteindre des rendements supérieurs à ceux des autres technologies solaires thermiques.

2.3.2. Capteur solaire cylindro-parabolique

Est également un type de capteur solaire qui utilise un réflecteur cylindrique pour permettre le transfert de chaleur dans le liquide jusqu'à environ 400°C [11].

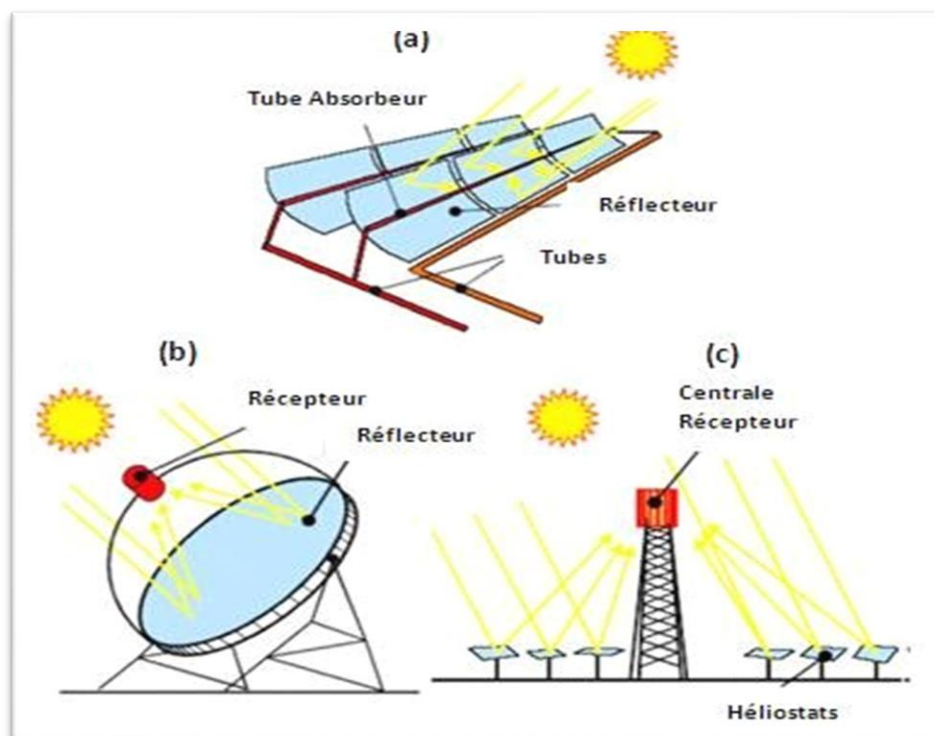


Figure II.5: Présentation des systèmes capteur à concentration : (a) capteur cylindro-parabolique, (b) capteur parabolique, (c) tour solaire. [10]

3. Rappels sur les éléments d'échange thermique

L'existence d'une différence de température entre deux systèmes dépend de l'échange d'énergie et s'appelle le transfert de chaleur. Pour analyser les performances du système solaire, les schémas suivants doivent être disposés[5].

3.1. Transfert de chaleur par conduction

C'est un transfert de chaleur dans un milieu sans déplacement de matière. La transmission de la chaleur dans le corps par conduction se fait via les vibrations des atomes ou des molécules et via les électrons libres. [12]

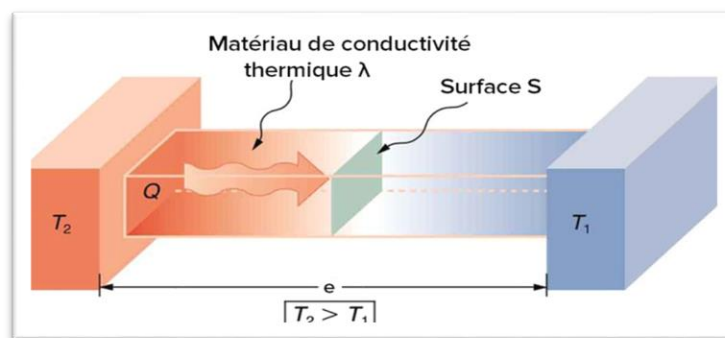


Figure II.6:Transfert de chaleur par conduction[12]

La théorie de la conduction se base sur l'hypothèse de FOURIER ; liant linéairement la densité du flux thermique et le gradient de température :

En tout point d'un milieu isotrope, la densité du flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu et au gradient de température[12].

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T) \quad \text{II.1}$$

La forme algébrique de cette équation est la suivante :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{II.2}$$

Avec :

$\varphi(w)$: Le flux de chaleur transmis par conduction ;

$S(m^2)$: Aire de la section de passage du flux de chaleur.

3.2. Le transfert de chaleur par convection

Ce phénomène se produit dans des environnements où les fluides sont présents, notamment lors des échanges de chaleur entre les parois et les fluides en mouvement[13].

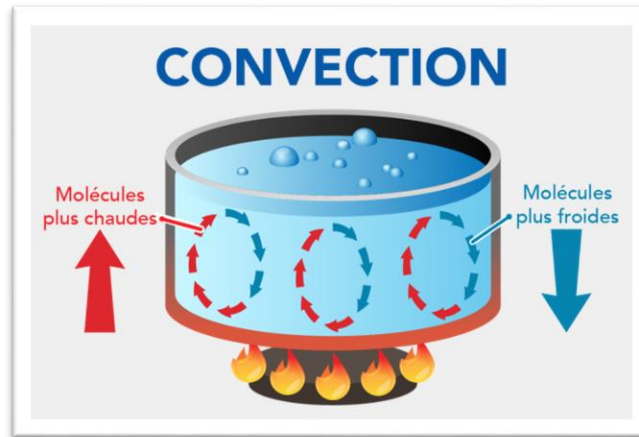


Figure II.7:Le transfert de chaleur par convection[14]

Le flux thermique par convection à travers la couche laminaire, présenté dans la Figure II.7 peut être exprimé par la loi de Fourier comme suit :

$$\varphi = h \times S \times (T_p - T_\infty) \quad \text{II.3}$$

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

T_p : Température de surface du solide ($^\circ\text{C}$).

T : Température de fluide loin de la surface de solide ($^\circ\text{C}$).

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

Selon la nature du mécanisme conduisant au mouvement des fluides, on distingue :

3.2.1. Convection naturelle (libre)

Le mouvement du fluide est dû à l'action simultanée de la différence de température et du champ de force massique présent dans le milieu.

Un fluide est mis en mouvement par la force d'Archimède car sa densité est fonction de sa température. La convection forcée est négligeable si :

$$\frac{G_r}{Pr^2} > 100$$
$$G_r = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times \rho^2 \times L^3}{\mu^2} \quad \text{II.4}$$

Le nombre de Grashof (Gr) est utilisé pour caractériser le régime de convection naturelle dans un fluide.

Gr : Le nombre de Grashof est un nombre adimensionnel qui caractérise la convection naturelle

Pr : le nombre de Prandtl est un nombre adimensionnel qui caractérise la capacité du fluide à transférer de la chaleur.

β : Le coefficient de dilatation thermique

g : L'accélération due à la gravité

ΔT : est la différence de température entre la paroi et le fluide

L : est la longueur caractéristique de l'écoulement

μ : est la viscosité dynamique du fluide.

ρ : la densité du fluide

Si la convection est laminaire $Gr Pr < 109$ et donc $n = 1/4$

Si la convection est turbulente $Gr Pr > 109$ et donc $n = 1/3$ [14].

3.2.2. Convection forcée

Le mouvement du fluide est provoqué par des dispositifs mécaniques (pompes, ventilateurs, etc.)[13].

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange h de convection est indépendant de la différence de température ($T_p - T_\infty$) entre la paroi et le fluide, mais il dépend aussi d'autre grandeur comme, U_m , la vitesse moyenne du fluide ($W.m^{-2}.K$), ρ , la masse volumique du fluide ($Kg m^{-3}$), C_p , la chaleur spécifique du

fluide ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), μ , la viscosité dynamique du fluide (Pa s) et λ , la conductivité thermique du fluide ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) [14].

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivant:

Nombre de Nusselt, Nu caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi[14] où D est la dimension caractéristique de la surface d'échange.

$$N_U = \frac{h \times D}{\lambda} \quad \text{II.5}$$

Nombre de Reynolds, Re caractérise le régime d'écoulement du fluide :

$$R_e = \frac{\rho \times U_m \times D}{\mu} \quad \text{II.6}$$

Nombre de Prandtl, Pr caractérise les propriétés thermiques du fluide.

$$P_r = \frac{\mu \times c_p}{\rho} \quad \text{II.7}$$

Si $Re < 2000$, l'écoulement est laminaire.

Si $2000 < Re < 3000$, l'écoulement est intermédiaire.

Si $Re > 3000$, l'écoulement est turbulent.

3.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est un phénomène caractérisé par l'échange d'énergie électromagnétique sans l'intervention d'un milieu intermédiaire. L'équation de flux de chaleur est connue sous le nom de loi de Stefan-Boltzmann et elle est définie comme suit[15].

$$\varphi = \sigma \times \varepsilon_p \times S \times (T_p^4 - T_\infty^4) \quad \text{II.8}$$

Où

φ : est le flux de chaleur émis

σ : est la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 4.92 * 10^8 \text{ kcal/hm}^2 \text{ k}^4$

T : est la température absolue de la surface émettrice

T_∞ : est la température absolue du milieu environnant

ϵ_p : est l'émissivité de la surface (un nombre compris entre 0 et 1 qui indique la capacité de la surface à émettre du rayonnement)

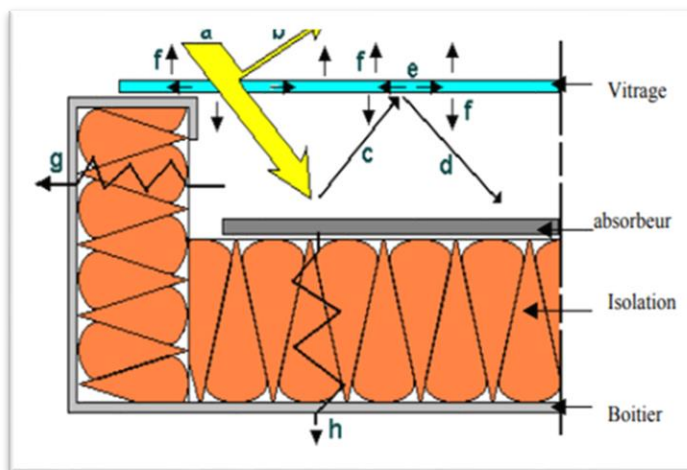
S : est la surface émissive.

4. Modélisation d'un chauffe-eau solaire

Le chauffe-eau solaire est un système de production d'eau chaude sanitaire qui utilise l'énergie solaire thermique pour chauffer l'eau. Il se compose d'un capteur solaire thermique, ainsi que d'un réservoir de stockage de l'eau chaude. Le capteur solaire est généralement installé sur le toit d'une maison ou d'un bâtiment pour maximiser l'exposition au soleil.

4.1. Le capteur solaire

Le capteur solaire thermique absorbe le maximum d'énergie solaire possible avec le moins de perte de refroidissement. Puis il transfère cette énergie thermique à l'eau en circulation, chauffant ainsi l'eau sanitaire. La surface du capteur plan change en fonction de la demande en eau de l'utilisateur[16] [17].



- a. Ray incident
- b. Ray réfléchi par le vitrage
- c. Ray thermique émis par l'absorbeur
- d. Ray thermique réfléchi par le vitrage
- e. Ray thermique absorbé par l'absorbeur
- f. Ray thermique émis par le vitrage
- g et h. Pertes thermiques latérales et inférieures

Figure II.8: Schématisation des phénomènes thermiques. [16]

Un capteur plan subit divers phénomènes lorsqu'il est exposé au soleil, tels que phénomènes optiques et les phénomènes thermiques. En outre, des pertes thermiques

peuvent également se produire par l'arrière et les côtés du capteur, ce qui peut avoir un impact sur sa performance.

Afin de modéliser des capteurs à plaque plane, les propriétés suivantes doivent être présentes :

- Matériaux stables et indépendants de la température.
- Conditions météorologiques

Selon le modèle de Hottel, Woertz et Bliss[18] [19] [20]. La puissance thermique utile récupérée par le fluide est donnée par :

$$(mC)_c \frac{dT_c}{dt} = A_c F_R S - (A_c F_R U_L - m C_p) T_{ci} + A_c F_R U_L T_a - m C_p T_{co} \quad \text{II.9}$$

Où T , \dot{m} et C_p représentent respectivement la température, le débit massique et la chaleur spécifique. Les variables : A_c , F_R et U_L correspondent à la surface, au facteur d'évacuation de la chaleur et au coefficient global de perte de chaleur, respectivement. La variable S quantifie l'absorption de rayonnement par unité de surface du collecteur "i" fait référence au point d'entrée du fluide ou au point initial et le "o" fait référence au point de sortie du fluide ou au point final.[6]

L'éclairement solaire transmis par le vitrage et absorbé par la plaque absorbante. Le rayonnement quotidien sur le système de collecteurs est exprimé par l'équation suivante :

$$\bar{s} = \overline{H_b R_b} + \overline{H_d} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \overline{H_g} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \text{II.10}$$

Le rayonnement solaire mensuel moyen absorbé par unité de surface du capteur peut être exprimé en fonction de différents paramètres. H et R représentent la moyenne mensuelle quotidienne du rayonnement sur une surface horizontale et sur un plan incliné respectivement. ρ désigne la réflectance, et β est la pente du collecteur. Les indices b , d et g indiquent respectivement le faisceau, le diffus et le sol[6] [18].

Le coefficient de pertes thermiques globales est donné par :

$$U_g = U_{av} + U_{ar} + U_L \quad \text{II.11}$$

Avec

U_{av} : Coefficient de pertes vers l'avant

U_{ar} : Coefficient de pertes vers l'arrière

U_L : Latérale

4.2. Le ballon de stockage

Le ballon de stockage est un ballon métallique qui contient des serpentins qui transfèrent la chaleur du fluide caloporteur à l'eau froide du ballon pour obtenir de l'eau chaude. La discontinuité de l'énergie solaire empêche l'utilisation directe de l'eau chaude de la zone de collecte. Pour cela, un réservoir de stockage bien isolé est nécessaire, qui est l'un des composants importants de l'installation solaire. Un bon réservoir se caractérise par un fort gradient de température entre le haut et le bas du réservoir et une bonne isolation. L'isolation doit être équipée d'une protection externe contre la rouille contre les effets des intempéries et des rayons du soleil[16].

L'équation régissant le réservoir de stockage est donnée comme suit :

$$(mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} + \left(\frac{1}{R} + mC_p\right)_s T_s = \frac{T_a}{R_s} + (mC_p)_s T_f + (mC_p)_{HX} (T_{HXo} - T_{HXi}) \quad \text{II.12}$$

La résistance au transfert de chaleur du réservoir de stockage, notée R. Les indices S, HX et f font référence respectivement au réservoir de stockage, à l'échangeur de chaleur et à l'eau d'alimentation, Tous les autres paramètres ont été précédemment définis. Les températures de sortie et d'entrée de l'échangeur de chaleur et du collecteur [6].sont définies suivant les relations :

$$T_{HXo} = T_p - \exp\left[\frac{-PLU}{(mC_p)_{HX}}\right] (T_p - T_{HXi}) \quad \text{II.13}$$

$$T_{ci} = T_p - \exp\left[\frac{-PLU}{(mC_p)_{HX}}\right] (T_p - T_{HXo}) \quad \text{II.14}$$

Dans la formule :

T_{ci} : La température initiale de fluide à l'entrée du système.

T_p : La température du fluide à un point donné dans un système.

P : Périmètre mouillé.

L : La longueur caractéristique du système.

U : Le coefficient de transfert de chaleur global.

m : Le débit massique du fluide.

C_p : La capacité thermique massique du fluide.

HX : L'échangeur de la chaleur.

T_{HX0} : La température du fluide à l'entrée de l'échangeur de chaleur.

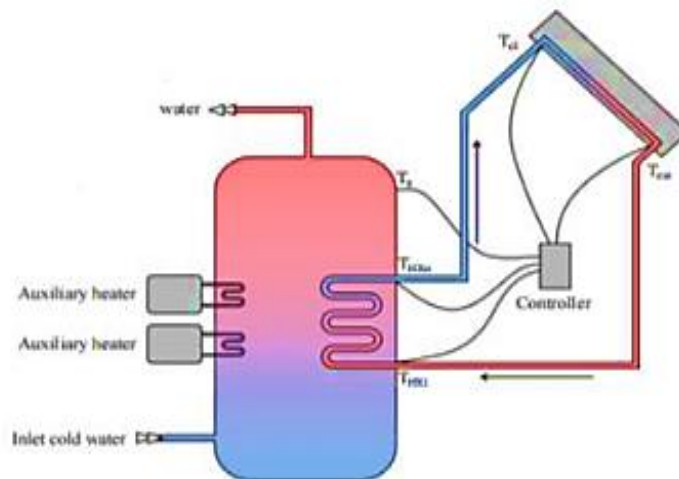


Figure II.9: Chauffe-eau solaire. [6]

4.3. Le groupe de transfert

Les éléments nécessaires pour transférer la chaleur dans le groupe de transport du capteur à l'unité de stockage dans les conditions appropriées sont :

Une pompe qui circule le fluide caloporteur

Un ensemble de capteurs de température

Un système de régulation qui active la pompe en cas de besoin.[13]

4.4. Les pertes thermiques d'un capteur solaire

Les pertes thermiques d'un capteur solaire peuvent être dues aux plusieurs facteurs, notamment :

Conduction thermique : Les pertes par conduction thermique se produisent lorsque la chaleur est transférée du capteur solaire vers l'environnement ambiant par contact direct avec des matériaux à température plus basse. Les pertes par conduction

thermique peuvent être réduites en utilisant des matériaux isolants tels que de la laine minérale ou de la mousse de polyuréthane.

Convection thermique : Les pertes par convection thermique se produisent lorsque l'air ambiant se déplace autour du capteur solaire, emportant la chaleur produite par le capteur. Les pertes par convection peuvent être réduites en utilisant des écrans thermiques pour limiter la circulation de l'air autour du capteur[21].

Rayonnement thermique : Les pertes par rayonnement thermique se produisent lorsque le capteur solaire rayonne de la chaleur vers l'environnement ambiant. Ils peuvent être réduits en utilisant des revêtements réfléchissants.

Absorption : Les pertes par absorption thermique se produisent lorsque la chaleur produite par le capteur solaire est absorbée par les matériaux environnants tels que les tuyaux ou la structure de montage. Les pertes par absorption thermique peuvent être réduites en utilisant des matériaux à faible conductivité thermique pour les tuyaux et la structure de montage.

5. Types de chauffe-eau-solaire

5.1. CES à thermosiphon

Le capteur et le ballon de stockage sont deux éléments complémentaires entre eux, où le ballon de stockage est en haut par rapport au capteur sous l'influence du rayonnement solaire, où la température de l'eau dans le capteur monte et sa densité diminue en fonction de le principe de gravité, car il monte dans le cercle et est remplacé par de l'eau froide qui vient du ballon, et c'est ce qu'on appelle l'effet thermosiphon.[22]

Il existe de nombreux fabricants produisant des chauffe-eaux solaires à effet thermosiphon dans le monde. Bien qu'il existe de nombreuses variantes, les conceptions les plus innovantes sont généralement des produits japonais [23]. Dans la figure II. 10, nous résumons l'effet thermosiphon.

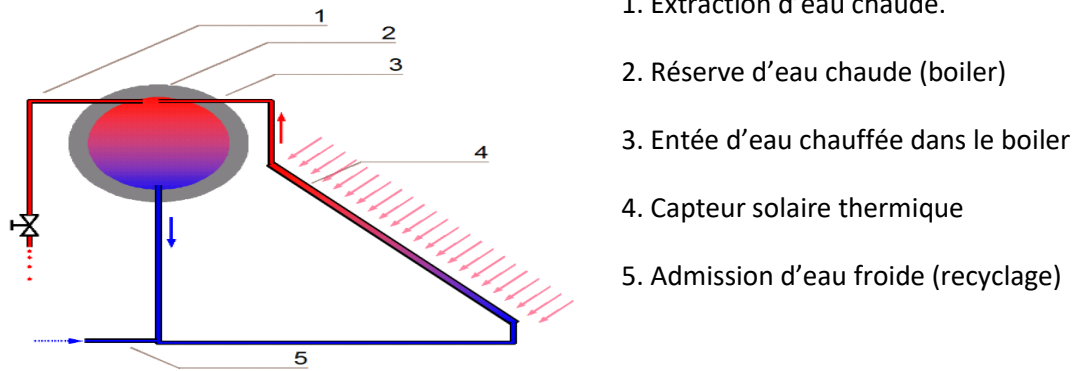


Figure II.10: Schéma d'un système à thermosiphon. [23]

5.2. Le chauffe-eau solaire à circulation forcée

Les chauffe-eaux solaires à circulation forcée font partie de cette catégorie, où un circulateur est utilisé pour déplacer l'eau chauffée du capteur solaire vers le ballon de stockage. Contrairement aux chauffe-eaux solaires à thermosiphon, la disposition du réservoir et du capteur n'est pas limitée. L'un des bénéfices notables du système de chauffe-eau solaire à circulation forcée réside dans cette flexibilité offerte par sa conception.

Dans les climats plus froids, ces systèmes offrent de meilleures performances. D'autre part, les chauffe-eau solaires à circulation naturelle sont moins chers et ont des coûts d'exploitation inférieurs dans les climats chauds[22].

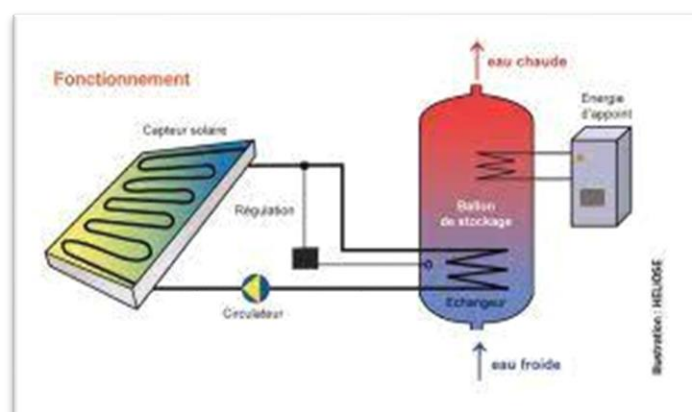


Figure II.11: Système à circulation forcée. [22]

5.3. Le chauffe-eau monobloc

Ce sont les chauffe-eaux les plus simples, où le réservoir et le capteur solaire forment une unité. L'eau chaude sanitaire qui circule directement dans le collecteur. Après avoir été chauffée par le rayonnement solaire, l'eau devient moins dense et monte dans le réservoir de stockage. Nous n'avons donc pas besoin de pompe. Cependant, le ballon d'eau chaude doit être proche du panneau, généralement sur le toit. [24]

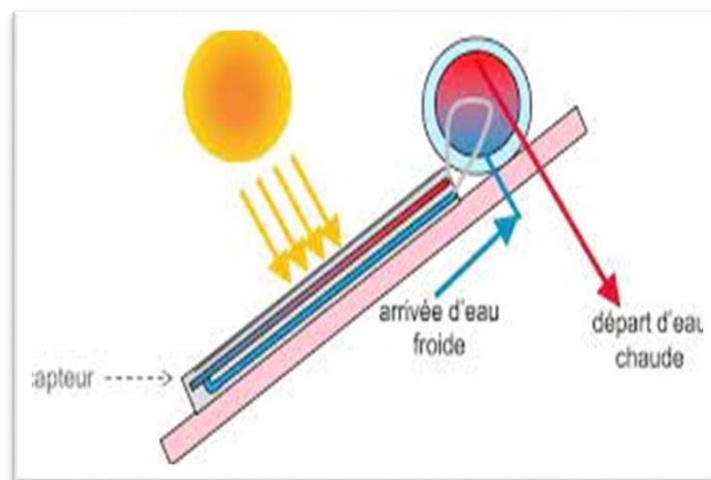


Figure II.12: Chauffe-eau solaire monobloc. [24]

5.4. Les chauffe-eau auto vidange

Ce type de chauffe-eau solaire est utilisé pour le vidage des capteurs solaires thermiques lorsqu'ils ne sont pas utilisés, afin d'éviter le gel du fluide. Le réservoir est placé en dessous des capteurs solaires, ce qui permet d'interrompre la circulation entre le réservoir et le capteur dès que le chauffage n'est plus nécessaire. Cela permet au système de se vider automatiquement pour éviter les dommages causés par le gel. En cas de gel, les panneaux solaires et une partie des tuyauteries se vident. Lorsque le soleil revient et que le chauffage est à nouveau requis, le circuit se rétablit automatiquement et la circulation reprend normalement. [24].

6. Conclusion

La modélisation d'un système solaire thermique est essentielle pour une conception efficace et une utilisation optimale de l'énergie solaire. Où elle peut

également aider à identifier les limites et les contraintes du système, à détecter les pertes d'énergie.

Bibliographie

[1] F. Sahnoune, « Contribution à la modélisation et à l'expérimentation d'une installation solaire de production d'eau chaude équipée d'un système de télésurveillance », Thèse de doctorat, 15 mars 2016.

[2] S. Noun Mohamed, « Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire », Mémoire de master, 2018.

[3] M. Seghir, « Etude et comparaison entre un concentrateur solaire parabolique et cylindro-parabolique. », Mémoire de master, 2018.

[4] N. Nadji, « Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique », Mémoire de master, 2018.

[5] A. Brahim, « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », Thèse de doctorat, février 2016.

[6] S. Roy, D. S. Chanda, et D. P. Biswas, « Energy Efficient Design of Solar water heater for Improvement of Energy Efficiency of Smart Buildings Using TRNSYS in Indian Region », vol. 12, no 3, 2022.

[7] M. Ibrahim, « Black nickel electrodeposition from a modified Watts bath », *Journal of Applied Electrochemistry*, vol.36, p. 295-301, mars 2006.

[8] C. Jia et al., « Graphitic Carbon Nitride Films: Emerging Paradigm for Versatile Applications », *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol.12, n° 48, p. 53571-53591. nov 2020.

[9] GB.Smith, RC. Mcphedran, GH. Derrick, « Surface Structure and the Optical Properties of Black Chrome ». *Applied Physics A*, vol. 36, p. 193-204, 2007.

[10] B. Pierre-Brice, « Dynamiques de gouttes funambules Applications à la fabrication de laine de verre », Thèse de doctorat, 28 janvier 2015.

[11] M. S. Zineddine et H. Bouchena, « Etude théorique d'un capteur solaire plan à air », Thèse de doctorat, 2021.

[12] M. Bouhediba, « Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS) », Mémoire de master, 2012.

[13] A. Azizi, « Etude d'un système solaire photovoltaïque /thermique », Thèse de doctorat, 2021.

[14] M. Gacem, « Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce D'un Habitat Situé Dans Le Site De Ghardaïa », Mémoire de magister, 2010.

[15] B. Benacer, « Etude de la convection forcée en régime laminaire sur une plaque plane chaude pour différents angles d'attaque. », Mémoire de master, 10 juillet 2019.

[16] B. Sara et H. Hamza, « LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE », Mémoire de master, 25 juin 2018.

[17] F. Yettou, A. Gama, et C. Hamouda, « Etude et réalisation d'un banc d'essai pour un chauffe-eau solaire à circulation forcée dans la région des Hauts Plateaux ». *Journal of Renewable Energies*, vol. 11, no 1, p. 119–128-119–128, 2008.

[18] K. Kaci, N. K. Merzouk, M. Merzouk, et S. A. Hakem, « Effect of Tests Norms on the Instantaneous Efficiency of a Plate Solar Collector », *Procedia Engineering*, p. 392-403, 2012.

[19] S. A. Hakem et N. Kasbadji, M. Merzouk, « Performances journalières d'un chauffe-eau solaire ». *Revue des Energies Renouvelables CICME*, vol. 8, p. 153-162, 2008.

[20] R. Kharchi, K. IMESSAD, S. SAMI, *et al.* « Solar energy for heating a building used for offices ». *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2019. p. 020005, 2019

[21] Marc-Paul Errera, Sébastien Chemin, et C. Gilles, « Etude du transitoire thermique dans un matériau via un couplage convection-conduction », *SFT*, vol. 29, p. 589-595. 1 juin 2007.

[22] N. Rezki, S. Arezki, et D. Hakim, « Etude et conception d'un chauffe-eau solaire », Thèse de doctorat, 2018.

[23] A. Zerrouki, « Etude théorique et expérimentale de système solaire thermique de production nationale destiné aux régions isolées. », Thèse de doctorat, 09 juillet 2003.

[24] L. Kheloui et N. Khelifi, « Etude paramétrique d'un chauffe- eau solaire plan », Thèse de doctorat, 2019.

CHAPITRE III : Résultats et Discussion de la simulation d'un CES

1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous avons utilisé le logiciel de simulation TRNSYS 17 pour simuler l'allure thermique d'un chauffe-eau solaire à capteur plan et à capteur à tube sous vide sur une maison individuel à TLEMCEN.

2. Présentation du logiciels TRNSYS

2.1. Outil de simulation de système transitoire

TRNSYS 17 est un logiciel de simulation dynamique destiné aux énergies renouvelables. Il est utilisé pour la conception, l'analyse et l'optimisation de diverses installations énergétiques telles que le chauffage, la climatisation, la production d'énergie solaire, le stockage d'énergie et la cogénération. Développé par le Solar Energy Laboratory de l'Université du Wisconsin-Madison, TRNSYS est utilisé mondialement depuis les années 1970. [1]

TRNSYS 17 dispose d'un environnement ouvert appelé II SiBat 3, connu sous le nom de "Interactive Simulation Builder", comprenant un éditeur de projets pour faciliter la création et la configuration des simulations. [2]

Le logiciel est utilisé généralement dans les domaines tels que le stockage thermique, l'hydraulique, l'efficacité énergétique du bâtiment, et les capteurs solaires.

TRNSYS 17 possède un modèle détaillé pour simuler le comportement thermique des installations de chauffe-eau solaire. [3] [4]

En résumé, TRNSYS 17 est un logiciel puissant et polyvalent pour la simulation des systèmes énergétiques, offrant une modularité, une convivialité et une prise en compte des caractéristiques des bâtiments qui en font un outil précieux pour les professionnels de l'énergie et les chercheurs.[5]

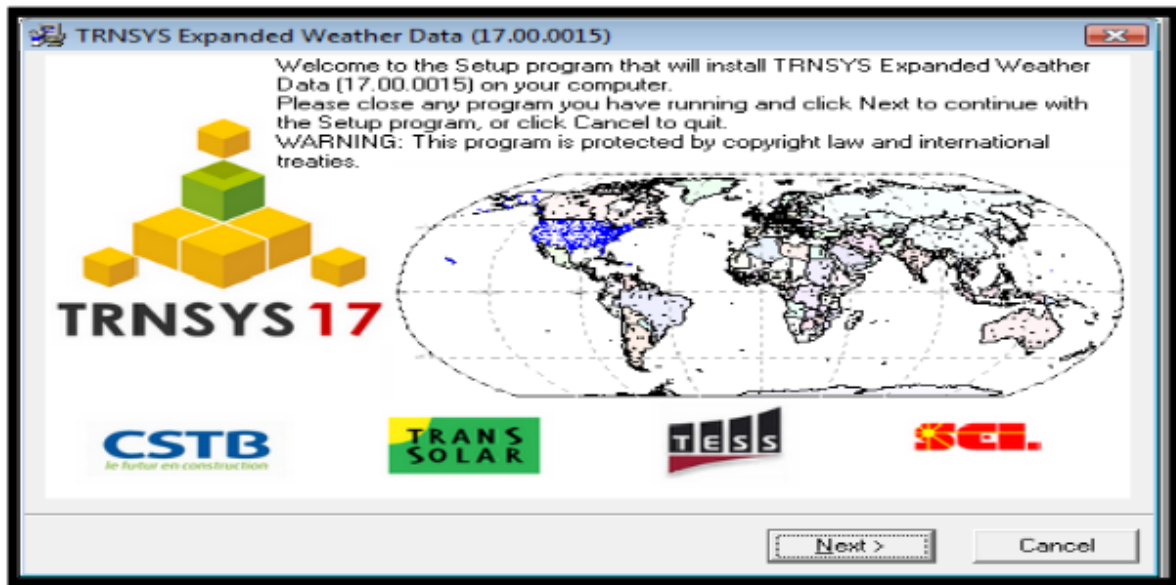


Figure III.1: Interface de TRNSYS

Les utilisateurs de TRNSYS peuvent choisir le modèle qui leur convient à partir de la bibliothèque du logiciel, ou créer de nouveaux modèles en utilisant des langages de programmation FORTRAN, C ou C++.

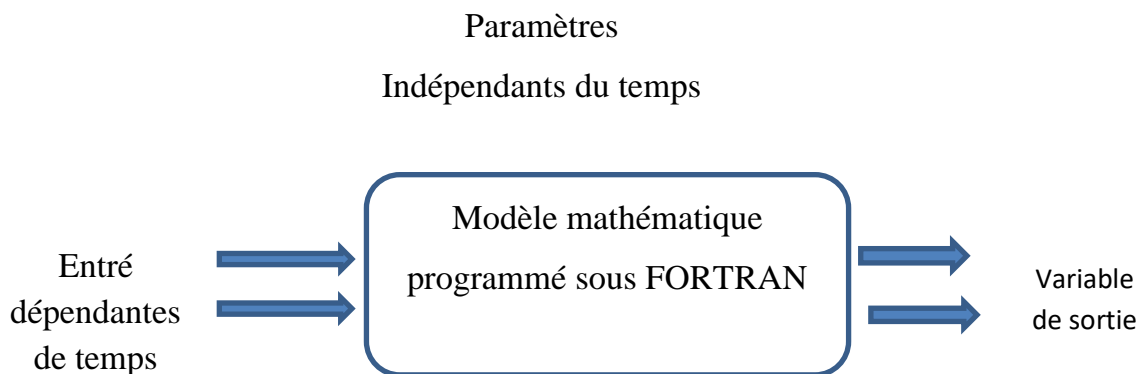


Figure III.2: Un modèle sous TRNSYS

3. Fiabilité d'un capteur

Un capteur solaire thermique est soumis à des nombreuses contraintes climatiques (Variation saisonnière, Ensoleillement...etc.). Pour cela, les tests de fiabilité et de durabilité sont conçus pour reproduire les conditions extrêmes. Pour

chaque test, les capteurs doivent avoir une résistance à haute température, au gel et aux chocs thermiques. [6]

4. Choix de site

Pour toute étude ou utilisation de l'énergie solaire sur un site, il est essentiellement de disposer d'une connaissance approfondie de l'ensoleillement de ce site. Ces données peuvent être obtenues à l'aide d'une station de mesure météorologique comme L'O.N.M de Zenata ou d'utiliser des méthodes approximatives pour prédire les caractéristiques du rayonnement solaire. [4]

Dans cette section, nous allons présenter les paramètres météorologiques de la ville de Tlemcen qui ont un impact sur le confort thermique. Nous utiliserons Meteonorm, une référence de données météorologiques, qui fournit des informations climatiques pour diverses applications dans le monde entier. Ces données seront utilisées pour l'analyse thermique de notre système simulé par TRNSYS.

4.1. Meteonorm

Le logiciel Meteonorm est conçu pour fournir des résultats climatiques au TRNSYS pour chaque heure de l'année.

Le logiciel METEONORM nous offre la possibilité de sélectionner la région géographique que nous souhaitons étudier aussi nous pouvons enregistrer les résultats sous plusieurs formats.[1]

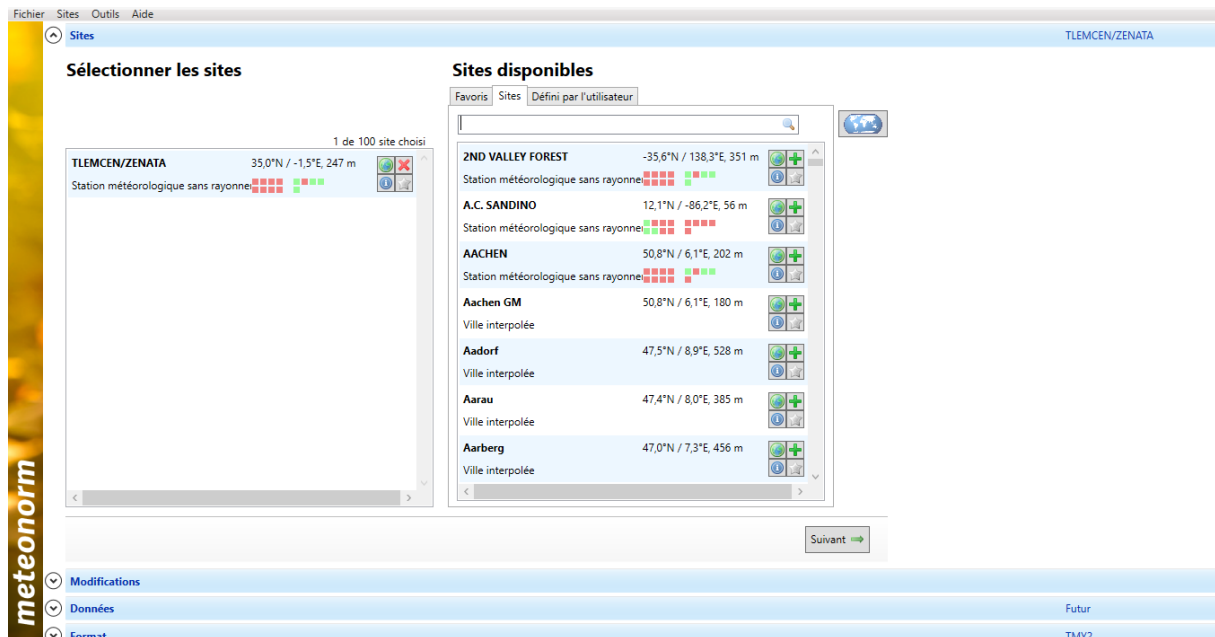


Figure III.3: Présentation du logiciel Meteonorm

4.2. Données météorologiques

La ville de Tlemcen est située dans le nord-ouest de l'Algérie, à une altitude d'environ 800 mètres au-dessus du niveau de la mer. La région est caractérisée par un climat méditerranéen, avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. La pluviométrie annuelle à Tlemcen varie de 400 à 700 mm par ans.[7]



Figure III.4: Carte géographique de la ville de Tlemcen

4.3. Température

La figure III.5 illustre la température annuelle du site de Tlemcen. Où nous observons que la température moyenne mensuelle à Tlemcen varie de 7°C en hiver à 30°C en été.

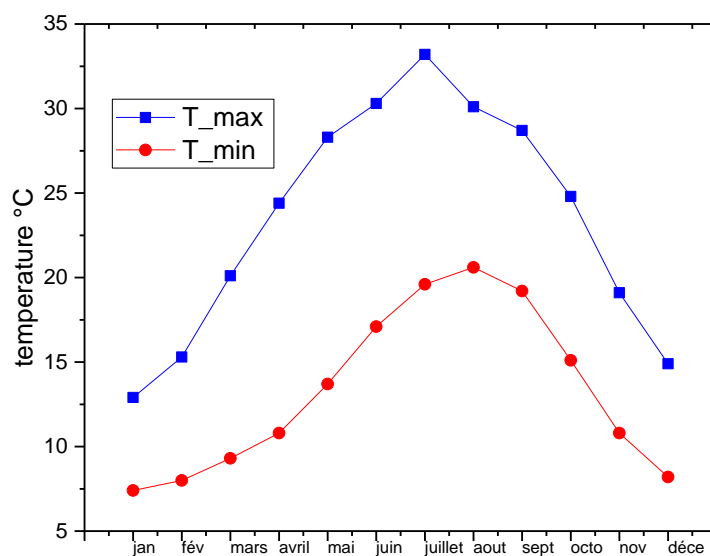


Figure III.5 : La température annuelle du site de Tlemcen.

4.4. Durée d'ensoleillement

La ville de Tlemcen bénéficie d'un ensoleillement important tout au long de l'année. En moyenne, il y a environ de 3000 heures d'ensoleillement par ans, avec une moyenne de 8 heures de soleil par jour. Les mois les plus ensoleillés sont mai, juin et juillet, avec plus de 10 heures de soleil par jour, tandis que les mois les plus nuageux sont décembre et janvier. La forte présence de soleil dans la région peut avoir un impact sur les niveaux de confort thermique et la demande en énergie pour la climatisation pendant les périodes les plus chaudes de l'année.

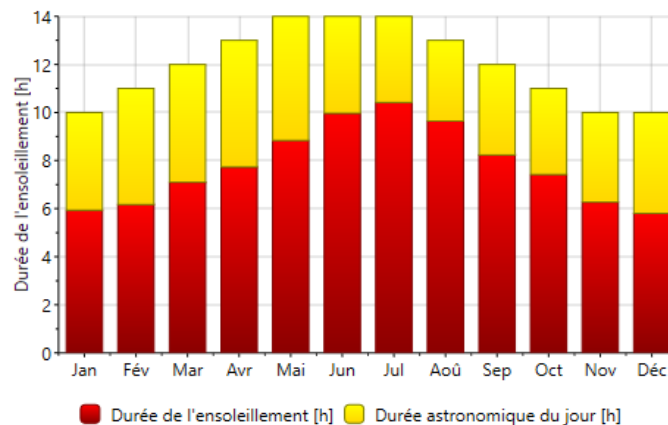


Figure III.6 : Durée de l'ensoleillement du site Tlemcen

4.5. Rayonnement solaire

La figure III.7 représente le rayonnement diffus et le rayonnement global de la ville de Tlemcen. En moyenne, la région de Tlemcen reçoit environ 225 kWh/m^2 de rayonnement global et 40% vers 80 kWh/m^2 de rayonnement diffus, comme le montre la figure III.7. Les mois d'été, en particulier juin et juillet, ont des niveaux de rayonnement global plus élevés, tandis que les mois d'hiver ont des niveaux de rayonnement diffus moyen. Cette répartition des composantes du rayonnement solaire peut avoir un impact sur la conception des bâtiments et des systèmes de production d'énergie solaire dans la région de Tlemcen.

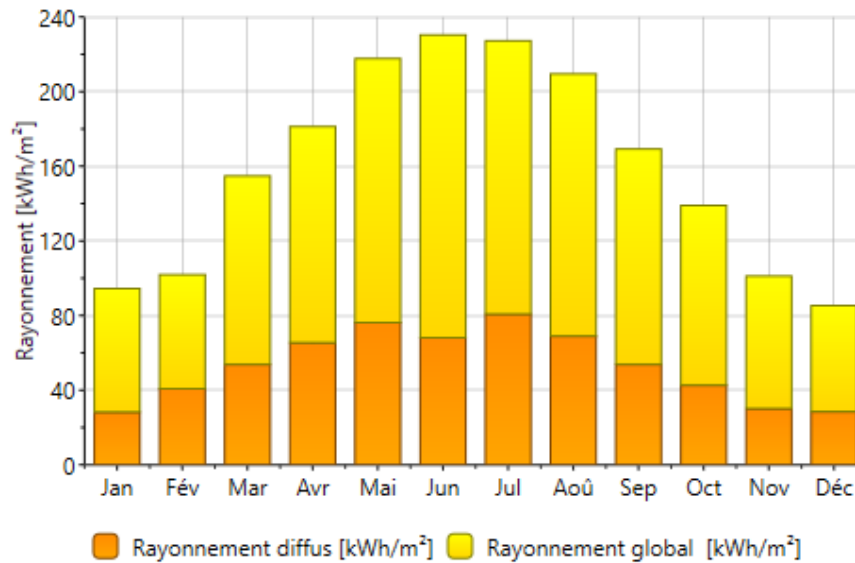


Figure III.7 : Rayonnement diffus et global du site de Tlemcen

5. Inclinaison optimale d'un capteur

L'inclinaison optimale d'un capteur solaire plan et d'un capteur à tube sous vide par rapport à Tlemcen, en Algérie, peut être déterminée en tenant compte de la latitude de la région (34°N) et des conditions climatiques locales. Cette inclinaison permet de maximiser l'efficacité de collecte de l'énergie solaire sur une base annuelle.

Il est important d'étudier ce paramètre, l'inclinaison, car elle influe sur le rendement du capteur solaire.[8]

6. Résultat et discussion de la simulation

6.1. Choix de la maison

La maison choisie est située à Tlemcen, centre-ville, et dont la superficie totale est de 100m^2 . Elle est construite sur la base d'une architecture simple, les murs extérieurs sont en double cloison de briques, le plafond est une dalle en béton armée, les murs intérieurs ont une seule cloison, et les fenêtres sont en métal à simple vitrage.

La maison est habitée par 4 personnes. Les besoins de cette habitation sont évalués en fonction de ces caractéristiques architecturales, du nombre d'occupants et du taux de renouvellement d'air.

Tableau III-1 : Données géographiques de la maison

Latitude φ	34.89
Longitude L	-1.32 34° 53' 24" Nord, 1° 19' 12" Ouest
Altitude	715 m
Température d'eau chaude de consigne	60 °C
Température d'eau froide	20 °C été et 12 °C hiver
Température d'eau froide utilisée simulation	10 °C

6.2. Les besoins énergétiques

6.2.1. L'eau chaude sanitaire d'une maison individuelle

Les besoins annuels en eau chaude sanitaire sont notés TEREK et exprimés en kWh/an. En considérant une répartition uniforme de la consommation d'eau chaude tout au long de l'année, une consommation journalière peut être définie sous la notation TEREKJ et exprimée en kWh/J.

Cette consommation journalière peut être calculée avec la formule suivante :

$$TEREK = TEREKJ \times NJEK \quad \text{III.1}$$

Où NJEK représente le nombre de jours de consommation d'eau chaude par an.

De plus, la consommation énergétique en eau chaude sanitaire dépend également de nombre d'occupants de la maison, NOC. Ainsi, la consommation

énergétique en kWh/jour en eau chaude sanitaire pour une maison individuelle peut être calculée comme suit :

Tableau III-2: La consommation énergétique d'une maison individuelle

Equipements	Consommation journalière (kWh/jour)
1 évier + 1 lavabo + 1 grande baignoire + 1 cabinet de toilette	TERECJ = 3,8 + 1,8 x NOC

Ainsi, la production d'eau chaude sanitaire pour cette maison individuelle de 4 personnes nécessite une énergie journalière de 22 kWh/jours.

6.2.2. La puissance utile

La puissance utile d'un panneau solaire est calculée avec la formule suivante :

$$P_{\text{utile}} = (\beta \times S \times P) - (a_1 \times S \times \Delta T) \quad \text{III.2}$$

β : Rendement optique panneau

a_1 : Coefficient de perte [W/K/m²]

S : Surface du panneau [m²]

P : Irradiation solaire [W/m²]

ΔT : $T_m - T_a$ [°C]

T_m : Température moyenne du fluide dans le panneau = $(T_{in} + T_{out}) / 2$ [°C]

T_a : Température de l'air ambiant [°C]

Le tableau III.3 résume la puissance utile en fonction de la surface. Où, nous l'avons calculé à partir des caractéristiques du capteur solaire utilisé en simulation.

Tableau III-3: Puissance utile en fonction de la surface

Surface (m ²)	Puissance utile (W/m ²) Capteur plan	Puissance utile (W/m ²) Capteur a tube sous vide
1m ²	214,88	128,12
3m ²	4596,49	384,36
5m ²	16048,71	640,6
7m ²	40891,10	896,84
9m ²	82128,53	1153,08

Nous remarquons d'après le tableau que lorsque nous augmentons la surface du panneau, la puissance utile augmente pour les deux types de capteur. En revanche, le capteur à tube sous vide fournit une puissance utile inférieure au capteur plan pour toutes les surfaces. Par exemple, pour 1m², le capteur plan fournit 214,88 W/m² tandis que le capteur à tube sous vide fournit 128,12 W/m².

6.2.3. La fraction solaire

La fraction solaire est une mesure qui représente la proportion de la demande de chaleur satisfaite par l'énergie solaire dans un système de chauffage ou de production d'eau chaude.

Dans cette formule, il est supposé que la demande de chaleur peut être satisfaite par l'énergie solaire avec une différence de température de 10°C sur un intervalle de température de 60°C.

$$F_s = 1 - \frac{Q_f}{Q_{ch}} = 83\% \quad \text{III.3}$$

Avec Q est la quantité de chaleur

6.2.4. Le rendement du capteur

Le rendement du capteur solaire thermique mesure l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en chaleur utile. Il représente la proportion d'énergie solaire captée et convertie en chaleur.

$$\eta = \beta - \frac{K(T_m - T_a)}{\text{irradiance}} \quad \text{III.4}$$

Avec k : coefficient de transmission thermique, $K = 5,10 \text{ W / m}^2.\text{K}$

6.3. Système simulé

Dans l'objectif d'étudier un système de chauffe-eau solaire pour l'eau chaude sanitaire d'une maison individuelle, nous avons pris en compte, le site de l'installation, le type de capteur et le système de stockage.

Pour cela, Nous avons analysé deux types de capteurs : le capteur à tube sous vide et le capteur plan. Pour chaque type de capteur, nous avons évalué la quantité d'énergie thermique fournie pour chauffer l'eau, ainsi que la fraction solaire, qui indique la part de la demande d'eau chaude pouvant être satisfaite par l'énergie solaire.

De plus, lors du choix d'un système de stockage deux aspects importants doivent être pris en compte : la capacité de stockage et le débit requis. Pour assurer une réserve d'eau chaude suffisante pour les différentes activités tout au long de la journée de notre famille, quatre personnes, une capacité de stockage d'environ 300 litres est généralement recommandée. En ce qui concerne le débit, il est conseillé de sélectionner un système de stockage capable de fournir un débit d'environ 15 à 20 litres par minute. Cette configuration permet de satisfaire les demandes simultanées d'eau chaude, que ce soit lors de la douche, du lavage de la vaisselle ou d'autres utilisations domestiques.

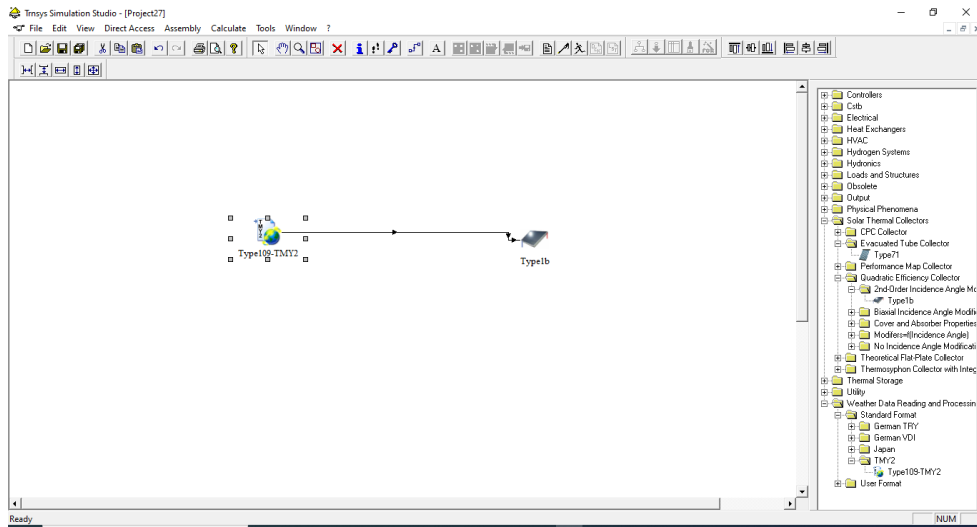


Figure III.8: Exemple de création d'un projet

✓ **Première phase** : la première étape est de créer un projet de simulation d'une maison individuelle sous TRNSYS 17. Puis, nous ajoutons les types à partir de la bibliothèque du logiciel et nous les relierons pour obtenir le système souhaité. A la fin, nous définissons les paramètres d'input et output pour chaque type.

Les paramètres des capteurs, plan et à tube sous vide, utilisés dans la simulation sont résumés dans les tableaux III-4 et III-5

➤ Capteur plan :

Tableau III-4: Les paramètres d'un capteur plan utilisé dans TRNSYS

Type de collecteur	η_0	a_1 ($\text{kJ}/\text{hm}^2\text{k}$)	a_2 ($\text{kJ}/\text{hm}^2\text{k}^2$)	b_0	Débit de teste ($\text{kg}/\text{hr m}^2$)	Pente d'efficacité
Collecteur plan (type 1b)	0.80	2,5	0,05	0	40	13

➤ Capteur a tube sous vide :

Tableau III-5: Les paramètres d'un capteur à tube sous vide utilisé dans TRNSYS

Type de collecteur	η_0	a_1 (kj/hm ² k)	a_2 (kj/hm ² k ²)	b_0	Débit de teste (kg/hr m ²)	Pente d'efficacité
Collecteur à tube sous vide (type71)	0,7	10	0.03	0	3	45

✓ **Deuxième phase** : le projet TRNSYS a été créé

Une fois que toutes les étapes de conception du projet ont été finalisées, comprenant la préparation du fichier météo, la sélection du capteur plan, l'installation de la pompe, etc., nous nous passons à la phase de simulation.

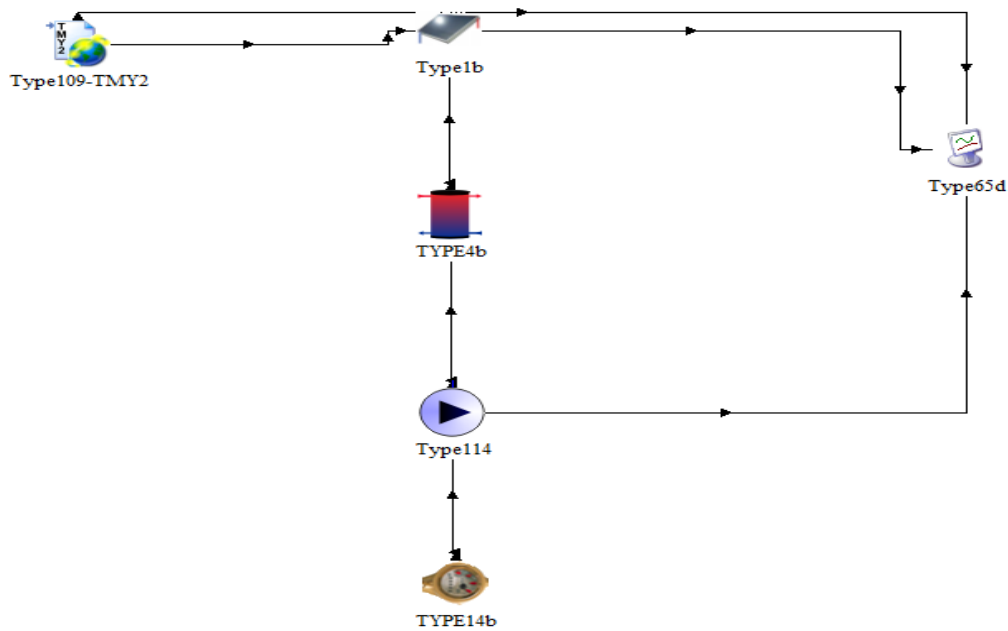


Figure III.9 : Modélisation sous TRNSYS de la maison étudiée

6.4. Les différents composants de la simulation

Type 109-TMY2 : Cette simulation permet de prendre en compte les conditions météorologiques spécifiques à une donnée de la ville, ainsi que l'irradiation solaire sur les capteurs en fonction de leur orientation et de leur inclinaison.

Type 114- pompe : Ce type représente une pompe de base qui peut être utilisée pour étudier les caractéristiques et le comportement d'une pompe dans un système donné.

Type 1b ou type 71 : sont sélectionnés, depuis la liste des collecteurs solaires thermiques, pour le capteur solaire plan et à tube sous vide respectivement. Ces composants permettent de modéliser les performances thermiques de collecteurs.

Type 65d : traceur en ligne : afficheur graphique est employé pour tracer les variables du système sélectionnées à des moments spécifiques durant la simulation.

Type 14b: Lors de la simulation transitoire, il peut être avantageux d'utiliser une fonction de forçage temporelle avec un motif récurrent. Le but de cette procédure est de proposer une méthode permettant de créer une telle fonction de forçage. Cela permettra de générer des données récurrentes pour simuler différents scénarios et étudier l'impact des variations temporelles sur le système en question.

Type 4b: Réservoir de stockage : Le Type 4b est un module essentiel qui permet de modéliser un réservoir de stockage à fluide stratifié. Ce module est constitué d'un échangeur de chaleur du côté de la charge et il est connecté aux capteurs, à la pompe.

6.5. CES à collecteur plan

Dans cette partie nous montrons et discutons les résultats de la figure III.9 obtenu par TRNSYS. Pour cela certains paramètres, comme la température à la sortie et l'énergie utile, à des conditions standards ont été comparé.

6.5.1. Influence de l'angle

Dans le but de trouver l'inclinaison optimale du capteur, nous étudions l'effet de l'inclinaison sur la température de sortie. On suppose que tous les facteurs, comme la surface et le débit, sont constants et aussi l'orientation est en plein sud.

Les résultats de l'optimisation de l'angle d'inclinaison sont résumés dans les figures au-dessous.

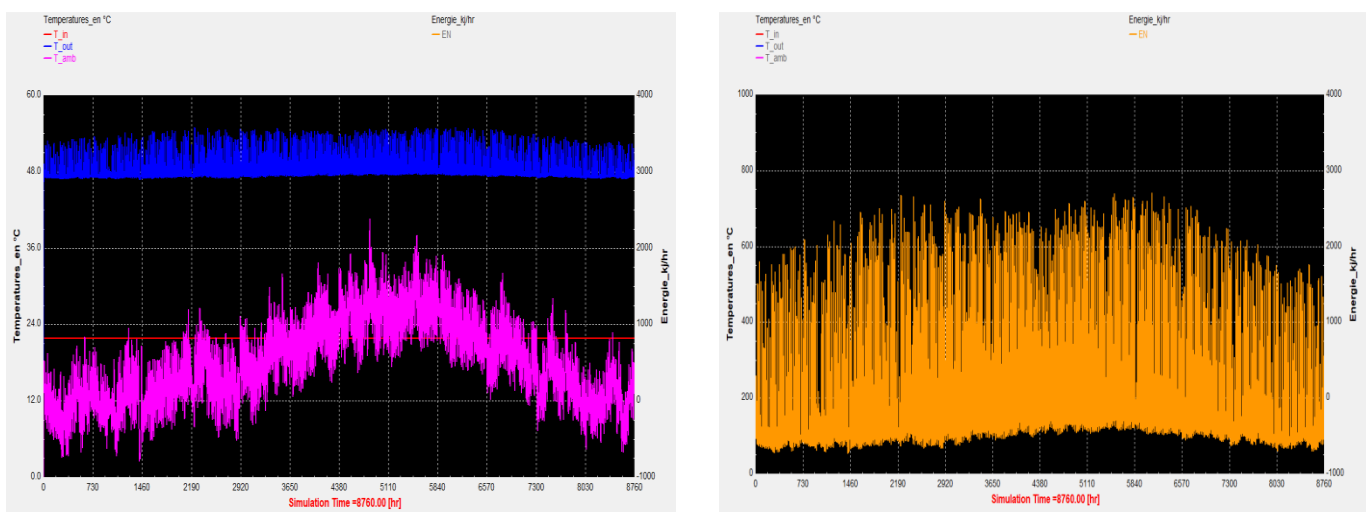


Figure III.10: L'évolution des températures d'entrée, de sortie, et la température ambiante, et de l'énergie en fonction de temps.

La figure III.10 montre la variation de la température et de l'énergie pour une inclinaison de 10° et une surface de $1m^2$ durant l'année 2020. Le maximum de la température mensuelle à la sortie est presque constant durant l'année et il est environ de $55,06^\circ\text{C}$. Aussi, nous remarquons que le maximum d'énergie est de 2350 kJ/h durant l'année.

CHAPITRE III : Résultats et Discussion de la simulation d'un CES

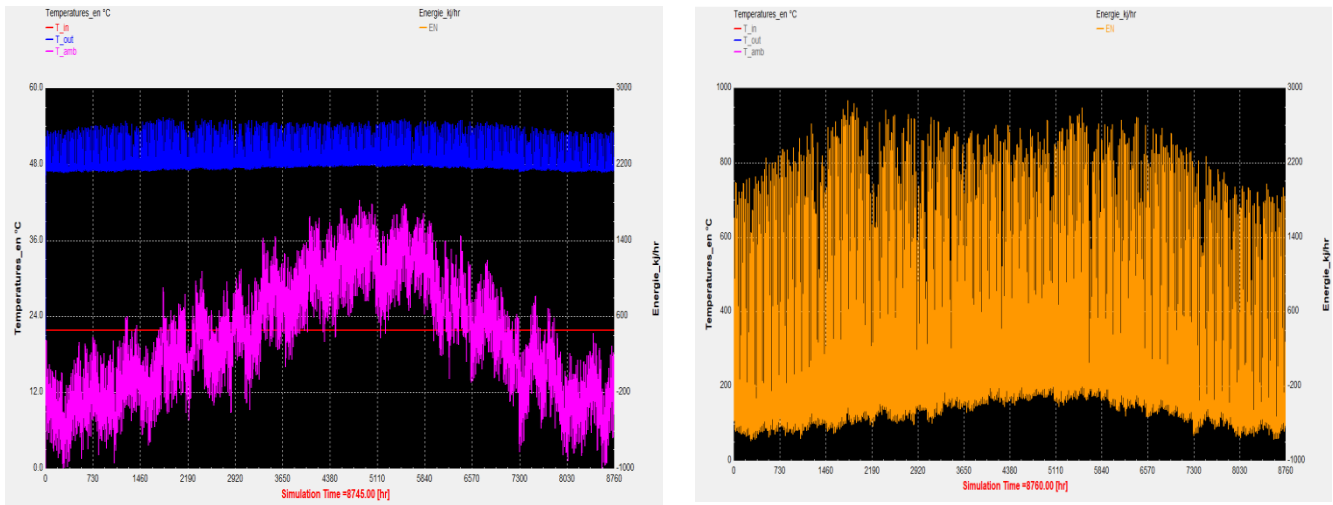


Figure III. 11:L'évolution des températures et de l'énergie en fonction de temps.

D'après la figure III.11 nous constatons une légère augmentation au niveau de la température pour une inclinaison de 30° et une surface de $1m^2$. Le maximum de la température de sortie dans ce cas est de $55,42^\circ\text{C}$.

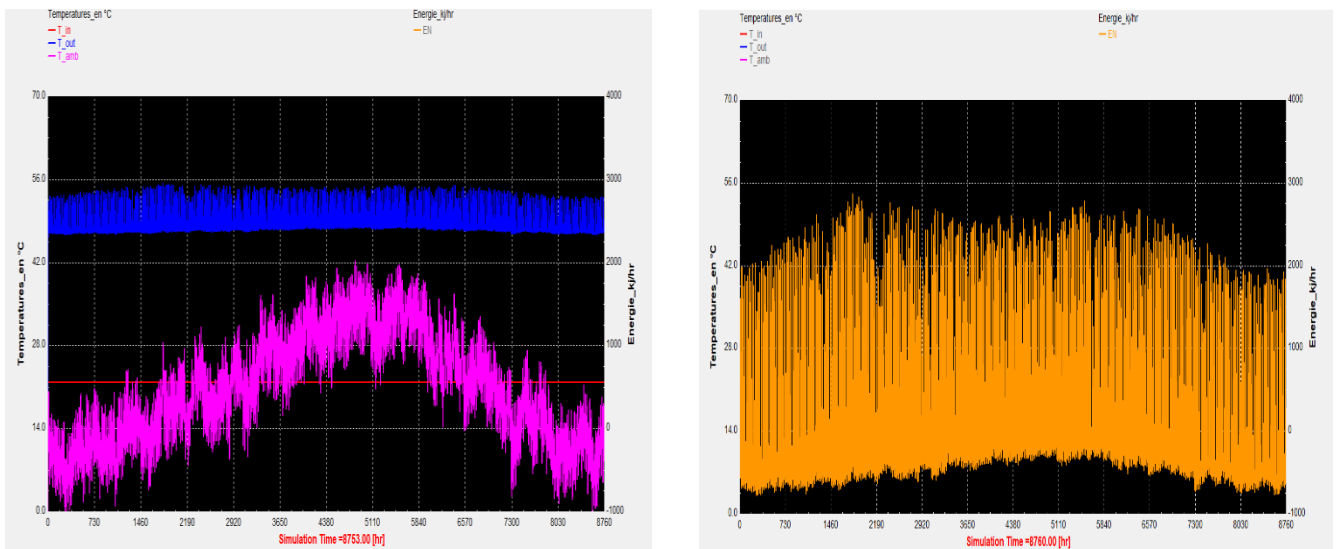


Figure III. 12:L'évolution des températures et de l'énergie en fonction de temps.

Dans la figure III.12, nous remarquons que la température et l'énergie diminuent pour une inclinaison de 60° et une surface de $1m^2$ durant un an. La température de sortie maximale est de $52,23^\circ\text{C}$ et le maximum d'énergie est d'environ 2252 kJ/h .

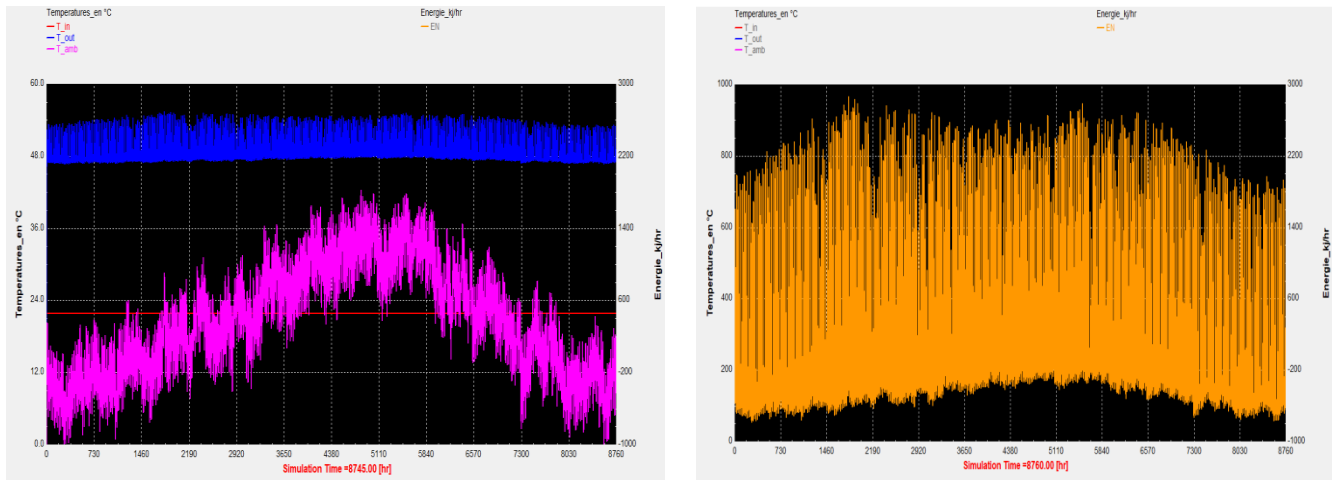


Figure III. 13: La variation de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie, ainsi que la température ambiante en fonction du temps.

La figure III.13 montre que la température de sortie maximale est de 50,01°C pour une inclinaison de 80° et une surface de 1m² pour une année et l'énergie maximale est de 2163 kJ/h.

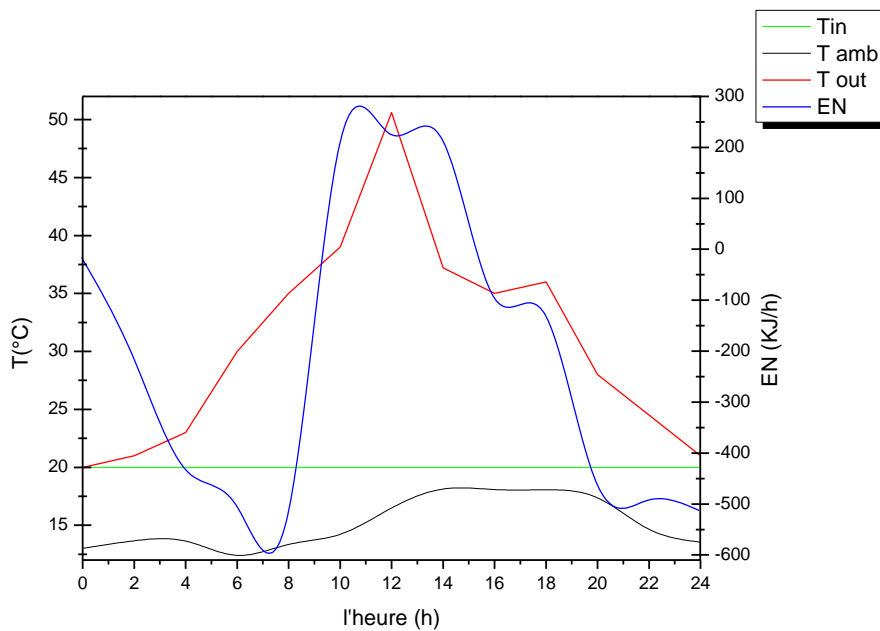


Figure III.14: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante pour le 1 janvier.

La figure III.14 montre l'évolution de l'énergie et des températures en fonction de temps pour le 1 janvier. Nous constatons une augmentation au niveau de la température et une évolution de l'énergie ($EN_{max} = 1608kj/h$, $EN_{min} = -488,8kj/h$) pour une inclinaison de 30° .

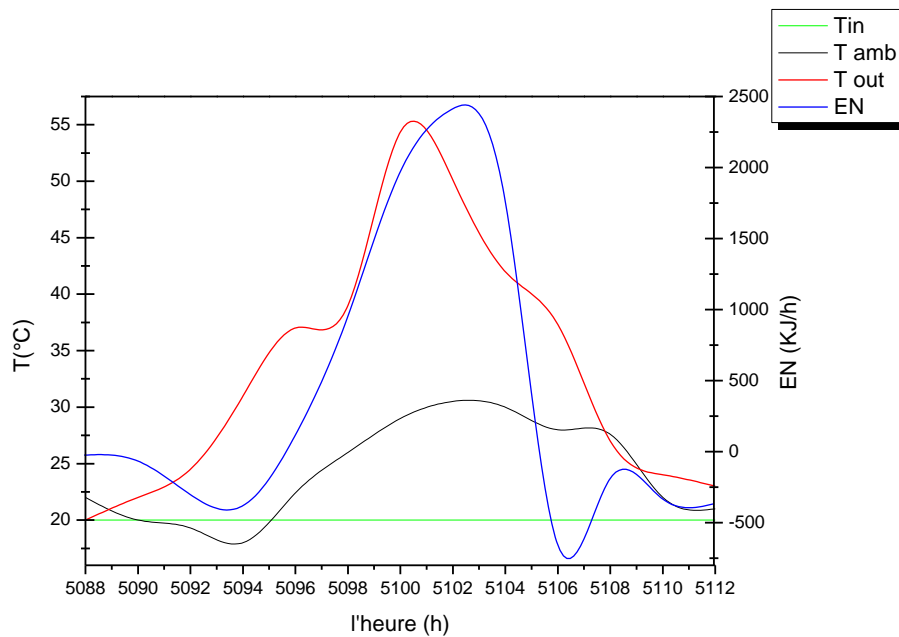


Figure III.15: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante pour le 1 août.

La figure III. 15 présente l'évolution de l'énergie et les températures en fonction de temps pour le 1 août. Nous constatons une augmentation au niveau de la température et de l'énergie ($EN_{max} = 2399kj/h$, $EN_{min} = -317,6kj/h$) pour une inclinaison de 30° et une surface de $1m^2$. La température maximal de sortie est de $54,30^{\circ}C$ de duré de 24h (1 août).

Finalement, pour déterminer l'inclinaison optimale nous devons calculer le rendement du capteur. La formule de rendement est donnée par :

$$\eta = \beta - a_1 \times \frac{(T_m - T_a)}{P} - a_2 \times \frac{(T_m - T_a)^2}{P} \quad \text{III.5}$$

β : Facteur optique du capteur (sans dimension)

a_1 : Coefficient de déperditions thermiques par conduction du capteur

a_2 : Coefficient de déperditions thermiques par convection du capteur

P : Irradiation solaire reçu par le capteur

Les résultats calculés pour les mois de janvier et aout sont résumé dans le tableau III-6.

Tableau III-6: Le rendement en fonction de l'inclinaison du capteur plan. (1 aout et 1 janvier) d'un capteur plan

L'inclinaison(°) Mois	Rendement(%)	
	Janvier	aout
10	68,1	68,1
30	81	81
60	73,6	73,6
80	45,95	45,95

Donc nous pouvons constater que pour une inclinaison de 30° le rendement est maximal pour les deux journées dans l'année. Ça nous permet de dire que l'inclinaison optimale adapté pour la zone de Tlemcen est de 30°.

6.5.2. L'influence de la surface

Dans cette partie, nous présentons l'effet de la surface sur la température de sortie à fin d'obtenir une surface optimale pour le site de Tlemcen. Les résultats obtenus par TRNSYS pour des différentes surfaces sont résumé dans les figures suivantes.

CHAPITRE III : Résultats et Discussion de la simulation d'un CES

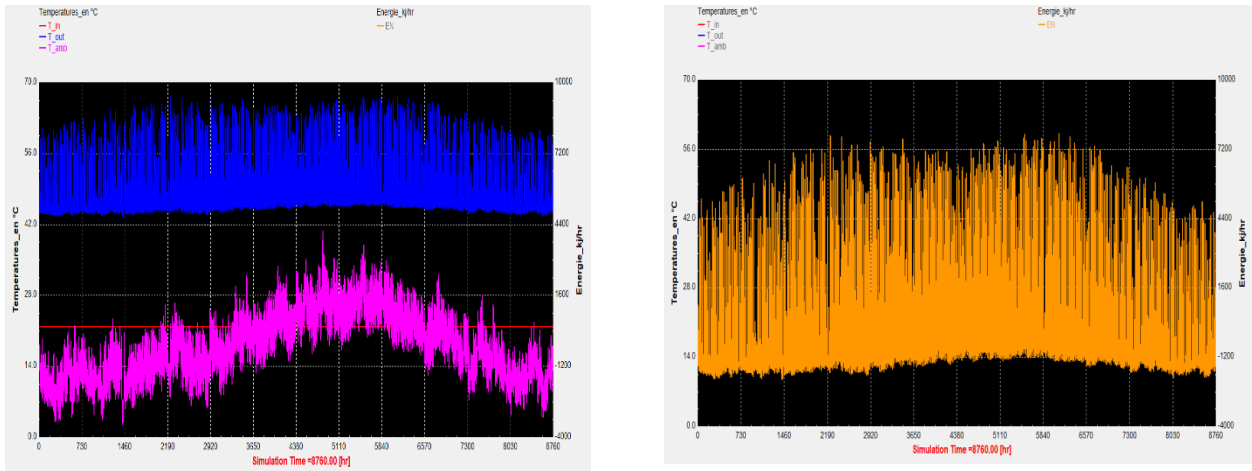


Figure III.16: L'évolution de l'énergie en fonction du temps, ainsi que celle des températures.

La figure III. 16- représente l'évolution de la température et de l'énergie durant l'année pour une inclinaison de 30° et une surface de $3m^2$. Où nous constatons une augmentation au niveau de température et une évolution de l'énergie avec un maximum d'énergie $EN_{max} = 6807kj/h$, et un maximum de température de sortie $68,48^\circ C$.

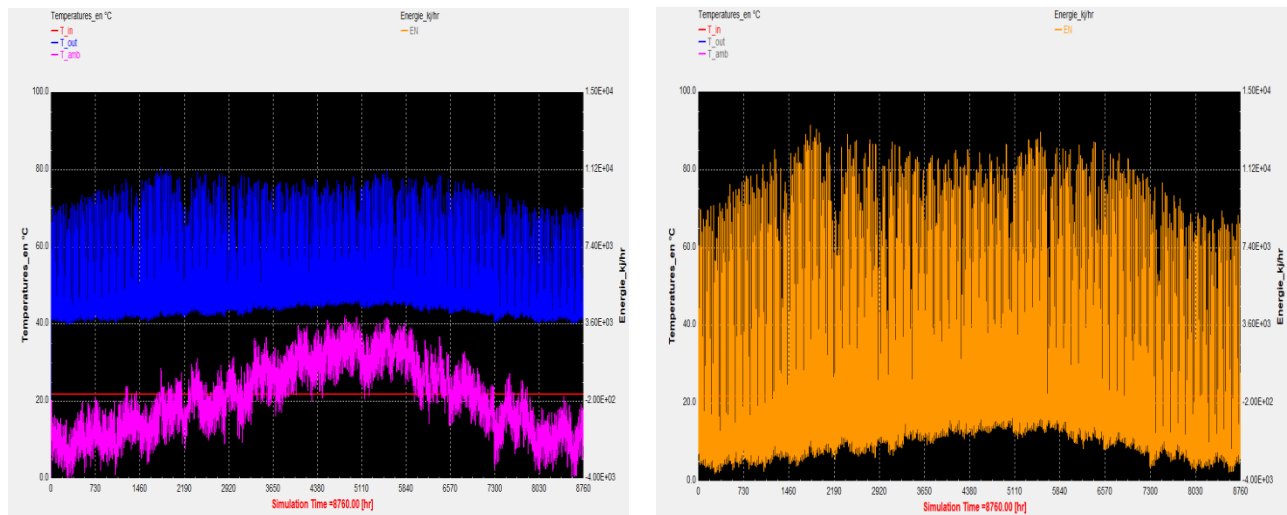


Figure III. 17: L'évolution de l'énergie, ainsi que celle des températures d'entrée et de sortie et de la température ambiante, en fonction du temps.

La figure III. 17-présente l'évolution de la température et de l'énergie durant l'année pour une inclinaison de 30° et une surface de 5m². OÙ nous constatons une augmentation au niveau de température et une évolution de l'énergie avec un maximum d'énergie $EN_{max} = 10958\text{kJ/h}$ et un maximum de température de sortie 74°C

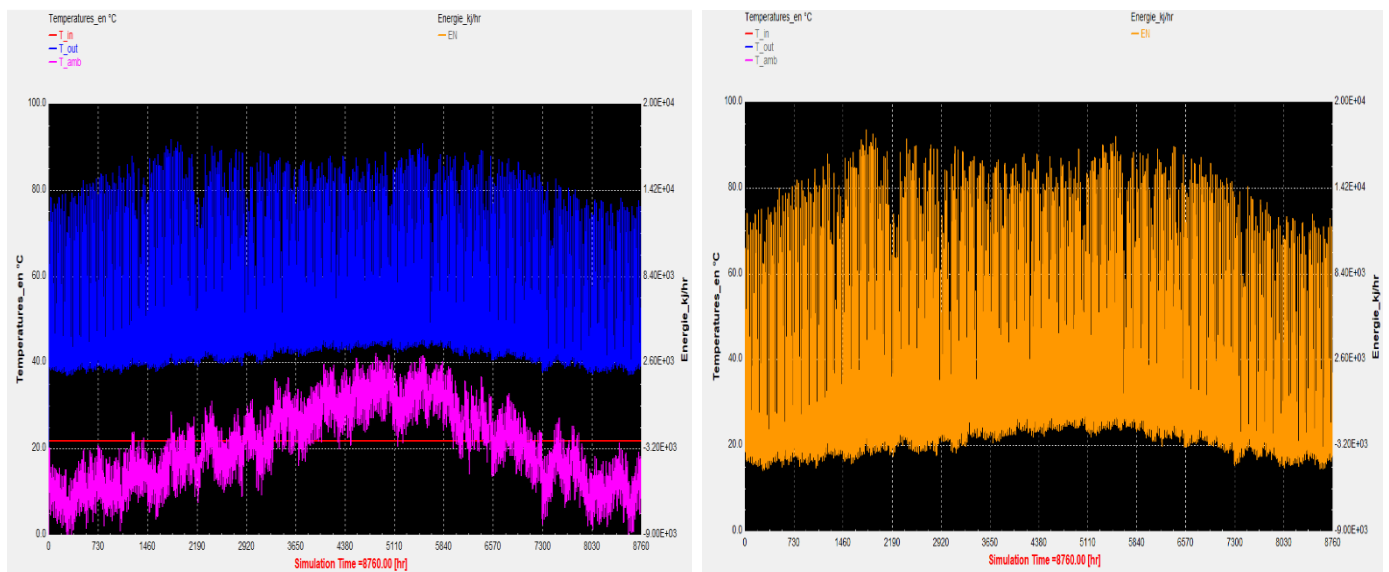


Figure III. 18: L'évolution de l'énergie, ainsi que celle des températures d'entrée et de sortie et de la température ambiante, en fonction du temps.

La figure III.18 illustre l'évolution de la température et de l'énergie durant l'année pour une inclinaison de 30° et une surface de 7m². OÙ nous constatons une augmentation au niveau de température et aussi une évolution de l'énergie avec un maximum d'énergie $EN_{max} = 14824\text{kJ/h}$ et un maximum de température de sortie 84°C.

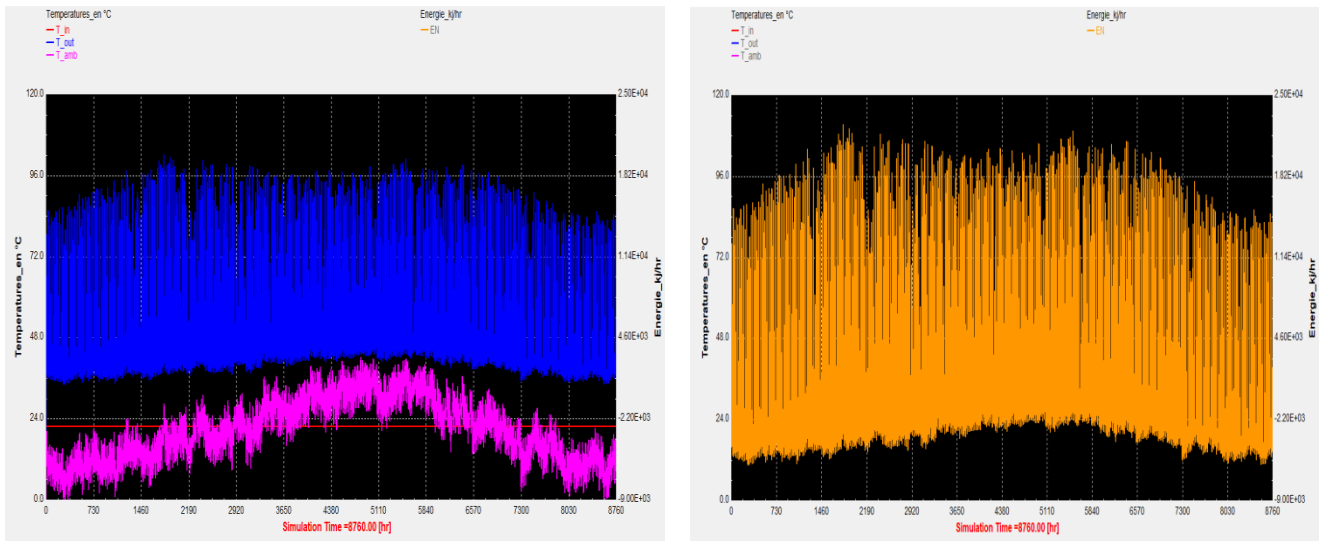


Figure III. 19: La variation de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie, ainsi que la température ambiante en fonction du temps.

La figure III.19 présente l'évolution de la température et de l'énergie durant l'année pour une inclinaison de 30° et une surface de 9m^2 . Où nous constatons une augmentation au niveau de température et une évolution de l'énergie avec un maximum d'énergie $EN_{\text{max}} = 20843\text{kJ/h}$ et un maximum de température de sortie 92°C .

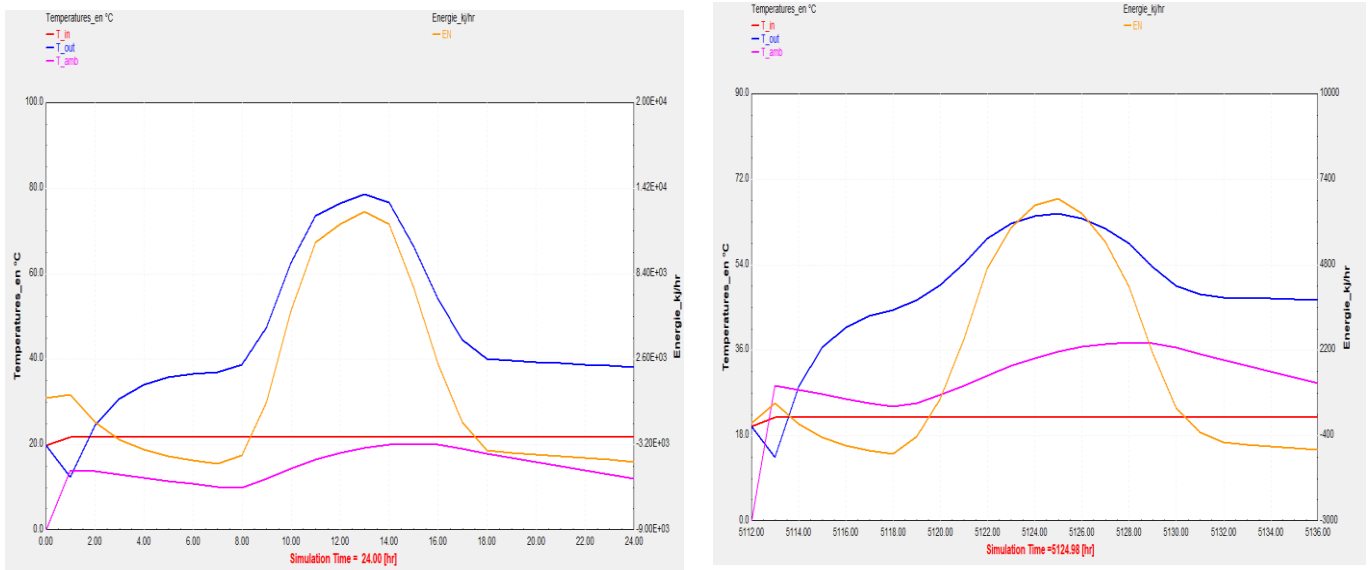


Figure III. 20: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée, de sortie et la température ambiante en fonction de temps à gauche le 1 janvier et à droite le 1 aout.

D'après les résultats obtenus par TRNSYS, nous remarquons que pour une surface supérieure à $3m^2$ la température de sortie est supérieure à $70^{\circ}C$. En revanche, il y a davantage de chances que des bactéries thermophiles, comme la légionellose, forment. Pour cela, nous pouvons dire que la surface optimum est de $3m^2$.

6.6. CES à Capteur à tube sous vide

Une fois que toutes les étapes de conception du projet sont terminées, comprenant la préparation du fichier météo, la sélection du capteur à tube sous vide, l'installation de la pompe, etc..., nous sommes prêts à passer à la phase de simulation pour le capteur à tube sous vide.

Pour cela, la figure III.21 illustre le schéma de l'installation d'un chauffe-eau solaire à capteur sous vide simulé par TRNSYS.

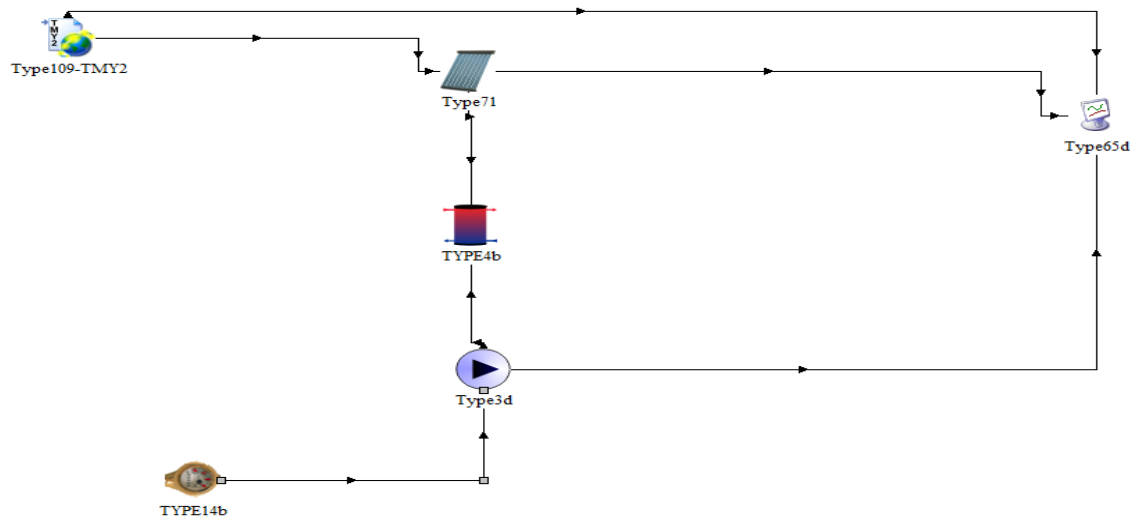


Figure III.21: Schéma de l'installation d'un chauffe-eau solaire à capteur sous vide par TYRNSYS.

6.6.1. Optimisation de l'angle de l'inclinaison

Afin de déterminer l'inclinaison optimale du capteur, nous examinons l'impact de l'inclinaison sur la température de sortie et l'énergie utile. Nous supposons que tous les autres facteurs, tels que la surface et le débit, restent constants, et que l'orientation est fixée plein sud avec un azimut de 0 degré.

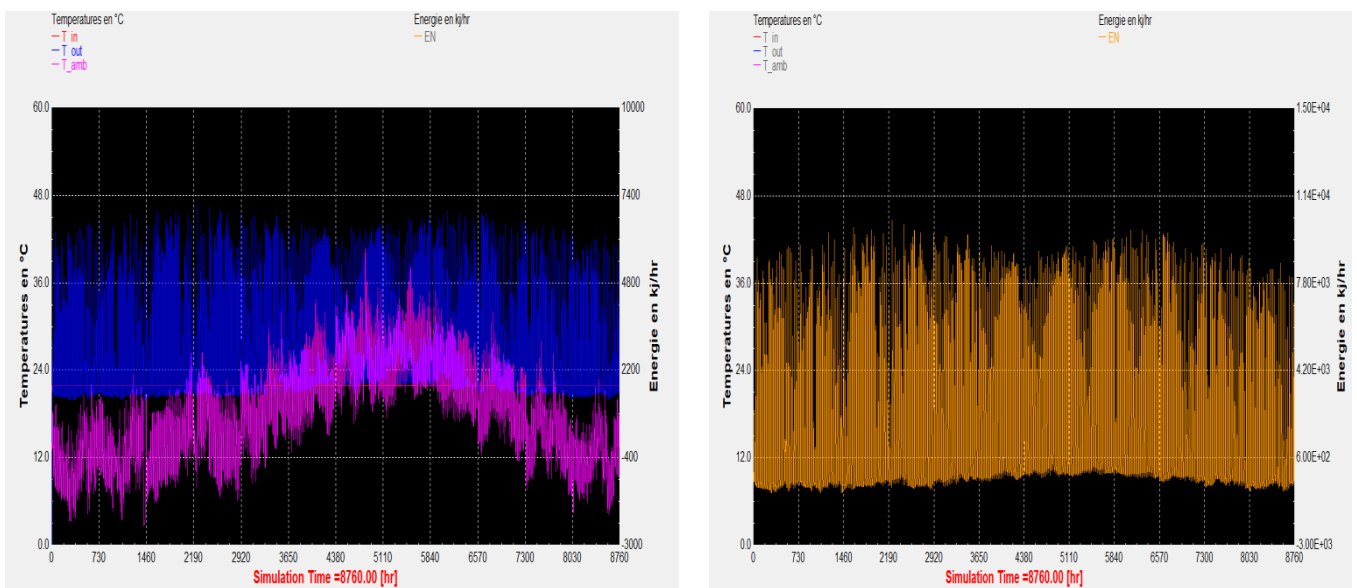


Figure III. 22: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante en fonction de temps, 10° et 2m².

D'après la figure III. 22 nous constatons une légère augmentation au niveau de la température pour une inclinaison de 10° et une surface de 2m^2 . Le maximum de la température de sortie est de $46,45^\circ\text{C}$.

La figure III. 23 montre que, pour une inclinaison de 30° et une surface de 2m^2 , la température de sortie maximale est de $46,46^\circ\text{C}$ et l'énergie maximale est de 9905 kJ/h .

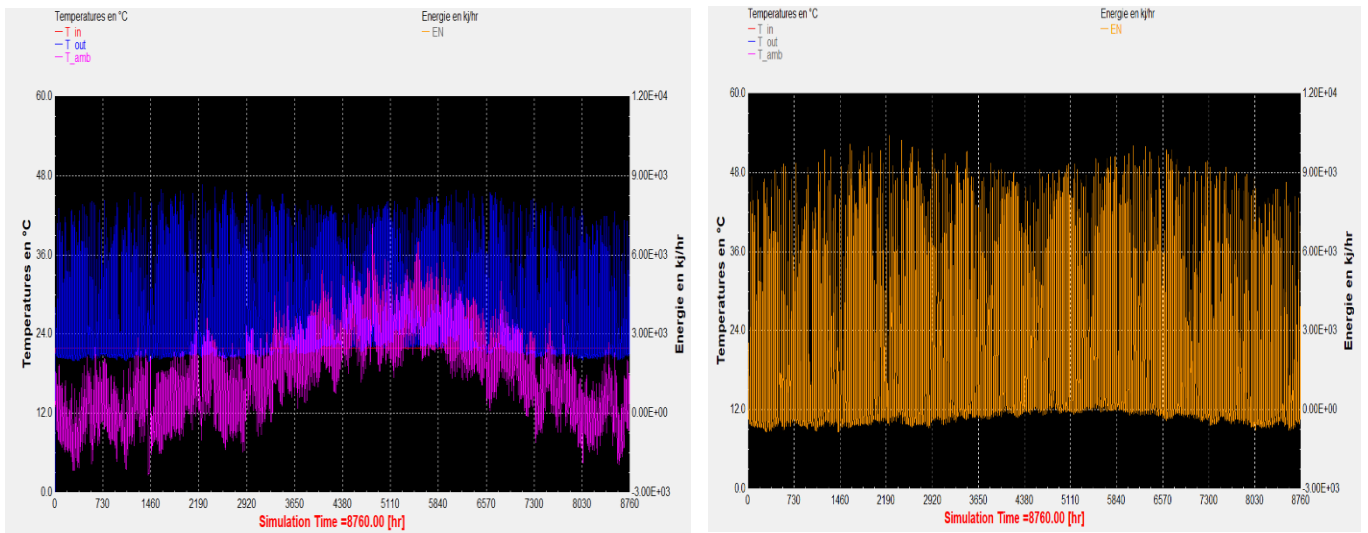


Figure III. 23: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante en fonction de temps, 30° et 2m^2

La figure III.24 montre que la température de sortie maximale est de $45,46^\circ\text{C}$ et l'énergie maximale est de 9505kJ/h pour une inclinaison de 60° et une surface de 2m^2 .

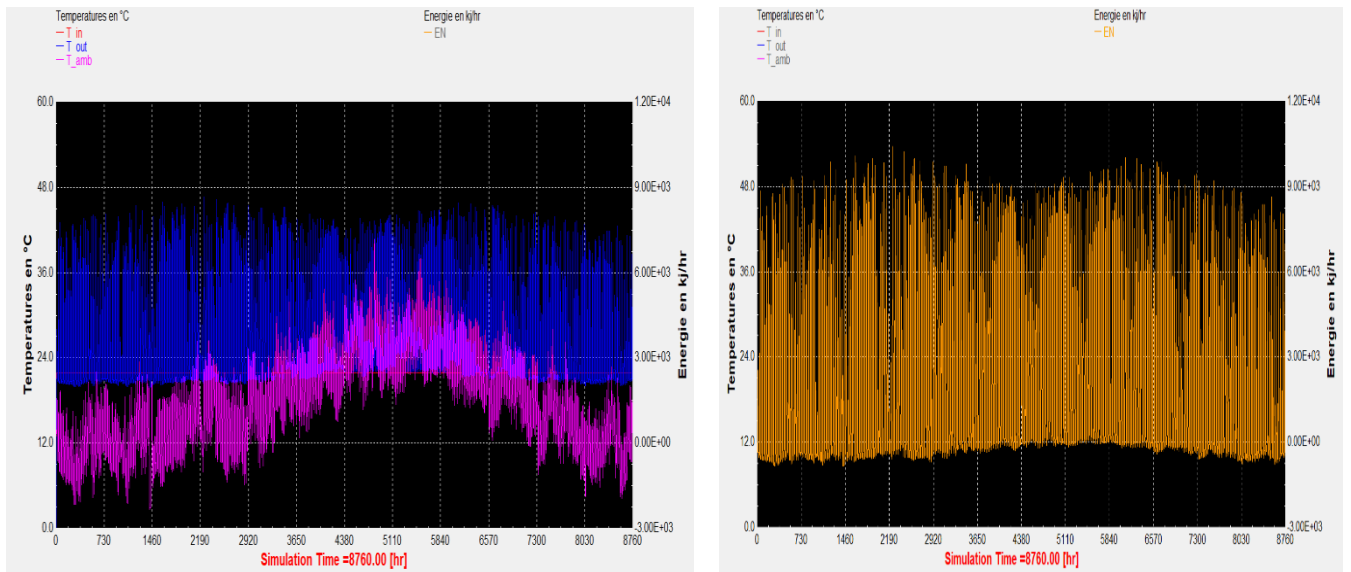


Figure III. 24: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante en fonction de temps, 60° et 2m²

Dans la figure III. 25, nous remarquons que la température et l'énergie diminuent pour une inclinaison de 80° et une surface de 2m² durant un an. La température de sortie maximale est de 44,66 °C et le maximum d'énergie est d'environ de 9348 kJ/h.

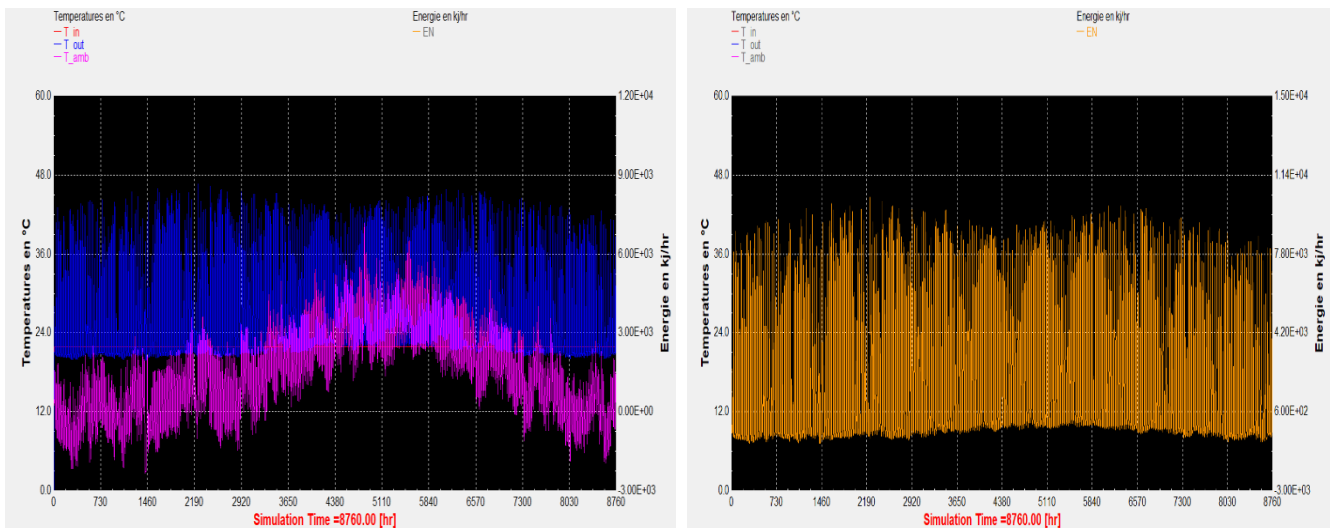


Figure III.25: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante en fonction de

CHAPITRE III : Résultats et Discussion de la simulation d'un CES

Lors de la simulation, Nous avons remarqué que la température et l'énergie sont restées stables pour une inclinaison de 10° à 60°. Mais, ces deux paramètres ont commencé à diminuer à partir de 80° en inclinaison.

Tableau III-7 : La température de sortie maximal et l'énergie maximal pour 10° à 60° et 2m²

Température maximale °C	46,45
Energie maximal kJ/h	9968
Energie minimal kJ/h	-806,4

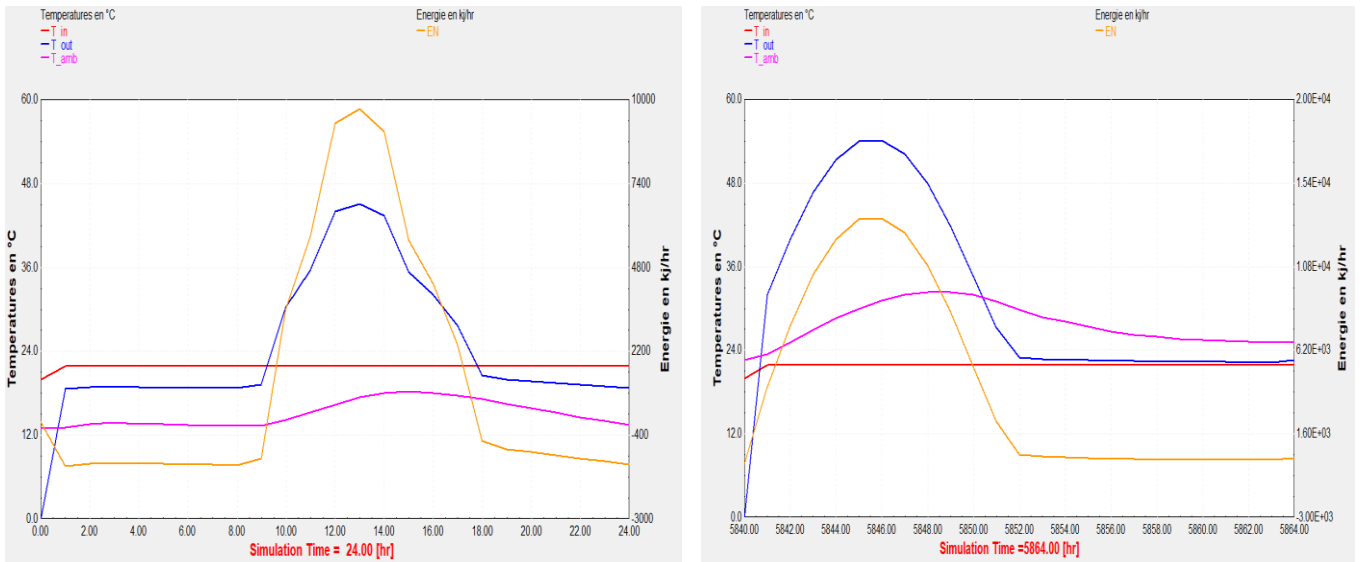


Figure III.26: L'évolution de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante en fonction de temps à gauche le 1 janvier et à droite le 1 aout.

La figure III. 26 présente la variation de l'énergie et les températures d'entrée et de sortie et la température ambiante pour une inclinaison de 30° et une surface de 2m². Nous constatons une augmentation au niveau de la température.

Pour le 1 janvier, les limites d'énergie sont $EN_{max} = 3802\text{kJ/h}$ et $EN_{min} = -509,4\text{kJ/h}$ aussi la température maximale de sortie est de 44,01°C.

Pour le 1 aout, l'énergie a un maximum de 9257kJ/h et un minimum de -298,4kJ/h. Aussi, la température maximale de sortie est de 46,45°C.

Le tableau III.8 résume l'effet de l'inclinaison du capteur à tube sous vide sur le rendement pour le 1 aout et le 1 janvier.

Tableau III-8 : Le rendement en fonction de l'inclinaison.

L'inclinaison(°) Mois	Rendement(%)	
	Janvier	aout
10	55,98	55.98
30	72,15	72.15
60	60,56	60,56
80	38,95	38,95

Pour la zone de Tlemcen sur une année entière, l'inclinaison optimale pour avoir un maximum du rendement est de 30°.

6.6.2. Optimisation de la surface

Cette section présente l'impact de la surface sur la température de sortie afin de déterminer la surface optimale du capteur à tube sus vide pour le site de Tlemcen. Les résultats obtenus par TRNSYS pour différentes surfaces sont récapitulés dans les figures ci-dessous

Pour une inclinaison de 30° et surface de 3m².

La figure III. 27 présente l'évolution de la température et de l'énergie pour une inclinaison de 30° et une surface de 3m². Où nous constatons une augmentation au niveau de température et une évolution de l'énergie avec un maximum d'énergie $EN_{max} = 10219\text{kJ/h}$ et un maximum de température de sortie 70,47°C.

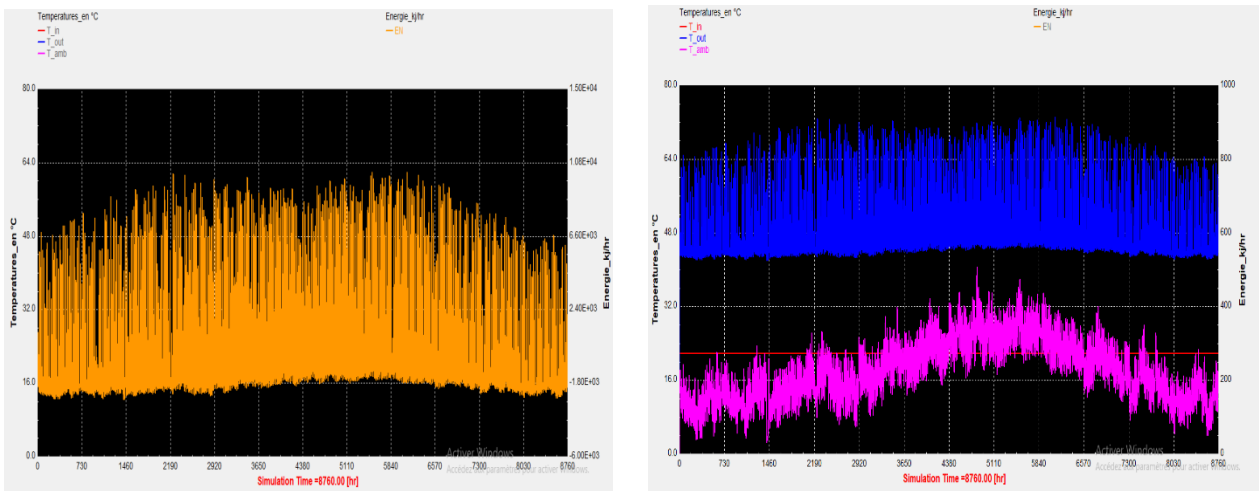


Figure III.27: L'évolution des températures d'entrée, de sortie, et la température ambiante, et de l'énergie en fonction de temps.

Pour une inclinaison de 30° et une surface de 5m².

La Figure III. 28 illustre la variation de la température et de l'énergie sur une période d'un an, en utilisant une inclinaison de 30° et une surface de 5m². On observe une augmentation de la température et une évolution de l'énergie, atteignant des valeurs maximales de $EN_{max} = 12976\text{kJ/h}$ pour l'énergie et de 80,90°C pour la température de sortie.

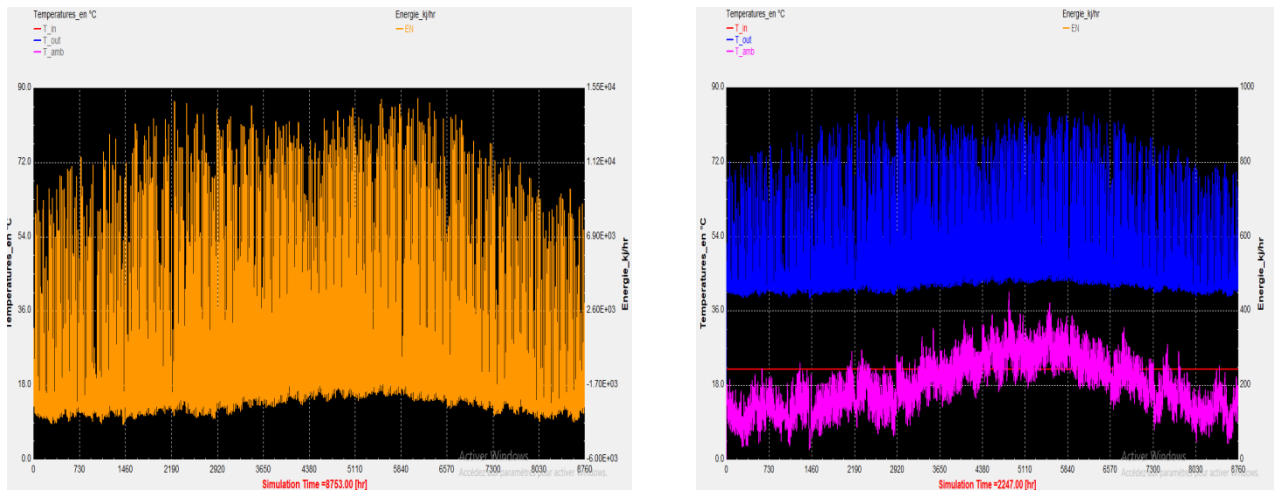


Figure III.28: Cette visualisation présente l'évolution de l'énergie et des températures d'entrée et de sortie ainsi que de la température ambiante en fonction du temps.

Pour une inclinaison de 30° et de surface de 7m².

La Figure III. 29 présente l'évolution de la température et de l'énergie sur une année entière pour une inclinaison de 30° et une surface de 7m². Au cours de cette période, nous observons une augmentation progressive de la température et une évolution de l'énergie, atteignant des valeurs maximales respectives 94,09°C et $EN_{max} = 18505 \text{ kJ/h}$.

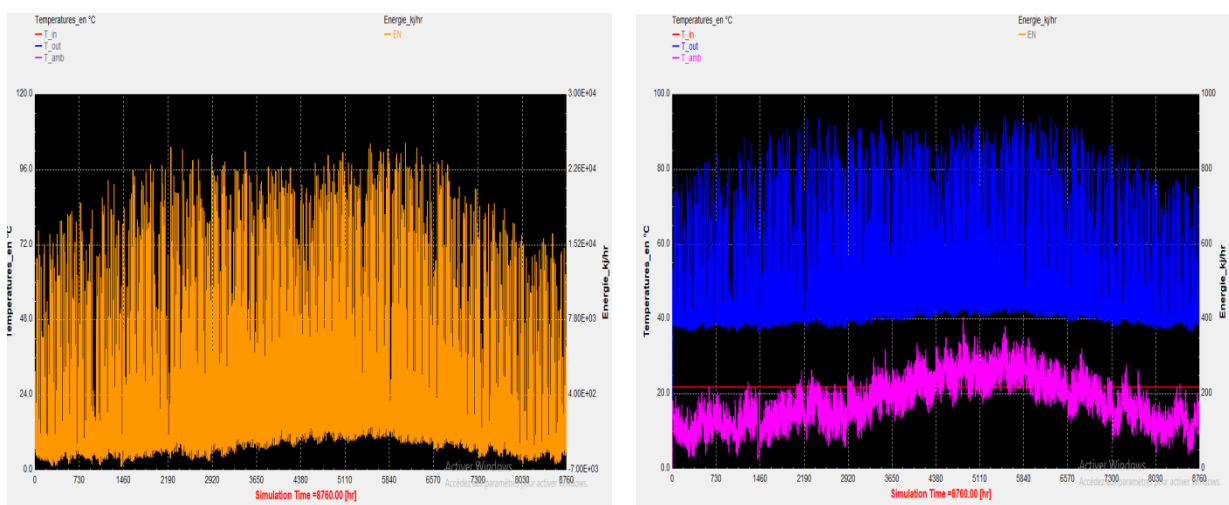


Figure III. 29: L'évolution de l'énergie, des températures d'entrée et de sortie, et de la température ambiante au fil du temps.

Pour une inclinaison de 30° et de surface de 9m²

La Figure III. 30 présente l'évolution annuelle de la température et de l'énergie pour une inclinaison de 30° et une surface de 9m². Pendant toute cette période, nous pouvons observer une augmentation régulière de la température et une progression de l'énergie, atteignant 24080 kJ/h en énergie et 108,1°C en température de sortie.

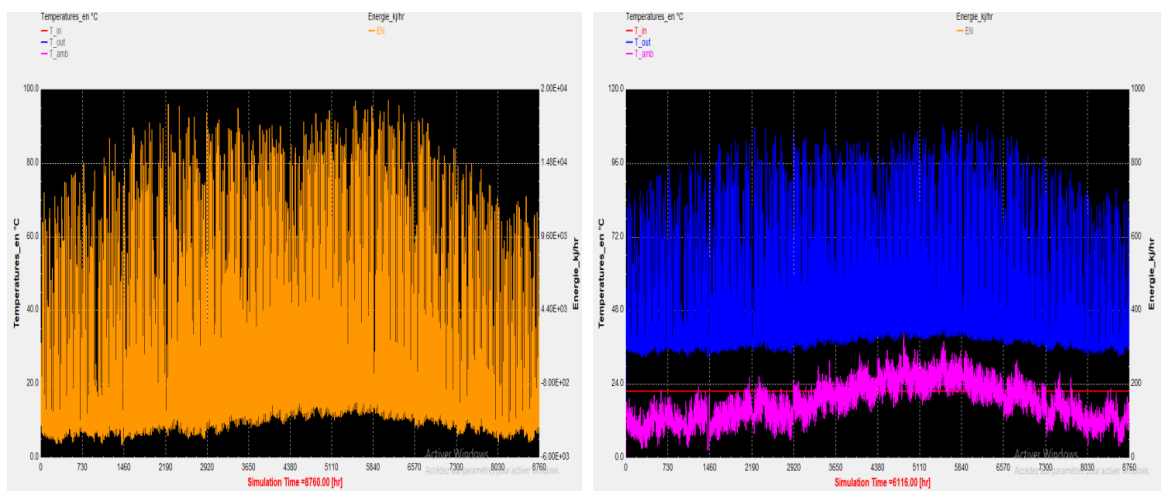
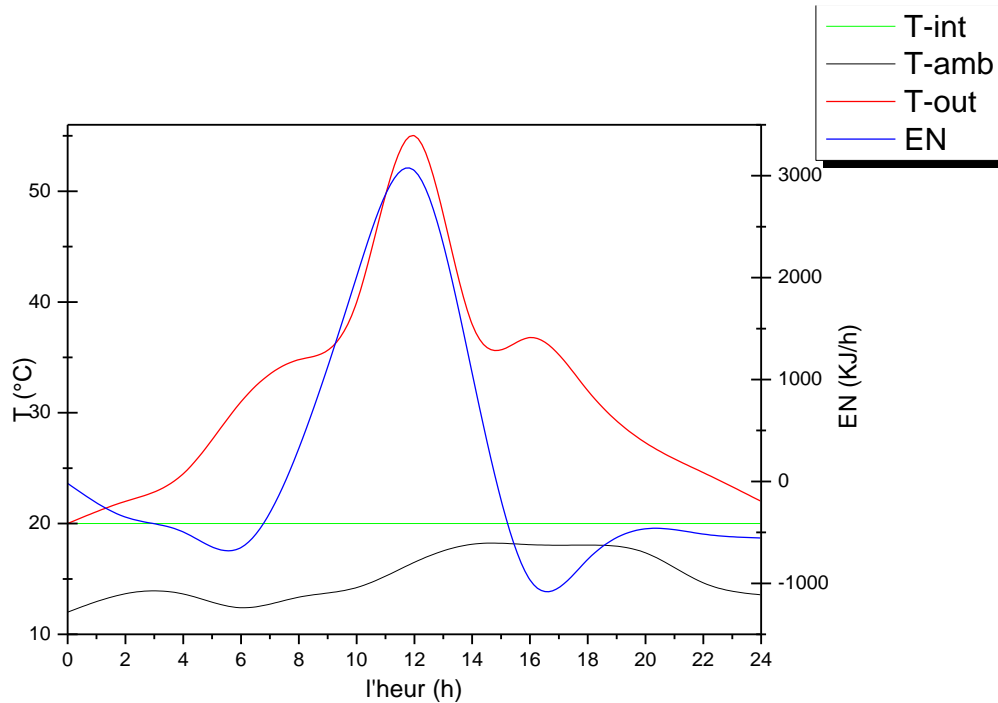


Figure III. 30: L'évolution de l'énergie, les températures d'entrée et de sortie, et la température ambiante en fonction du temps.

- 1 janvier



- 1 aout

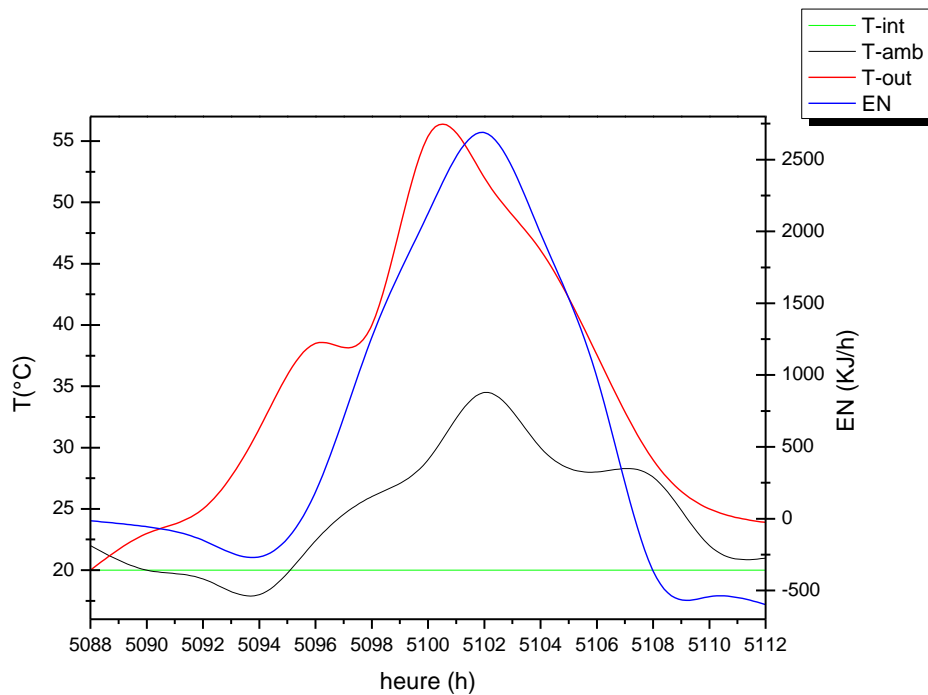


Figure III. 31: L'évolution de l'énergie et les différentes températures pour le 1 janvier et le 1 aout.

Nous remarquons à travers les résultats de la simulation que la température de sortie et l'énergie s'élèvent lorsque nous augmentons la superficie du capteur solaire.

Tableau III-9 : L'évolution de la température et de l'énergie en fonction de la surface.

Surface m^2	Température de sortie $^{\circ}C$	Energie maximale KJ/h
3	70,47	10219
5	80,90	12976
7	94,09	18505
9	108,1	24080

6.7. Comparaison entre les résultats obtenu par capteur solaire plan et capteur solaire à tube sous vide

Nous choisissons le 1 janvier et le 1 aout pour comparais la température de sortie et l'énergie maximal. Le tableau III.10 résume les résultats déjà montré dans les figures III.28 et III.20 pour une inclinaison de 30° et une surface de $3 m^2$.

Tableau III -10 : Les températures de sortie (T_{out}) et d'énergie maximale (En_{max}) d'un capteur plan et un capteur sous vide à une inclinaison de 30° et une surface de $3 m^2$.

Paramètres		Capteur plan		Capteur sous vide	
		T_{out}	En_{max}	T_{out}	En_{max}
Inclinaison 30° Surface $1 m^2$	1 janvier	50,6	226	55	3050
	1 aout	54,36	2409	55,4	2688

En comparant les performances du capteur plan et du capteur à tube sous vide, pour une inclinaison 30° et surface de $9m^2$, nous remarquons que la température de sortie du capteur plan atteint les $92.6^\circ C$ au cours de l'année, pendant que la température de sortie du capteur à tube sous vide arrive au $108,1^\circ C$. Aussi pour l'énergie produite par le système, la limite maximale pour le capteur plan est de $20843kj/h$, et pour le capteur à tube sous vide est estimée à $24080kj/h$. En revanche, d'après les résultats obtenus par TRNSYS, nous avons remarqué qu'il y a une énergie minimale pour les deux systèmes, $-6015 kJ/h$ pour Capteur plan et $-6601 kJ/h$ Pour capteur à sous vide. Pour cela, nous avons besoin d'un système d'appoint.

Un système d'appoint est un système utilisé pour compléter la production d'énergie principal lorsque la production du système initial ne peut pas répondre aux besoins en énergie.

Dans le cas des systèmes solaires thermiques, le système d'appoint est utilisé lorsque l'ensoleillement est insuffisant ou la température de l'eau produite n'est pas suffisamment élevée. Les systèmes d'appoint couramment utilisés sont les résistances électriques, les chaudières à gaz et les pompes à chaleur, choisis en fonction des besoins énergétiques, de la disponibilité de sources d'énergie et des contraintes techniques et économiques. [9]

En général, le rendement d'un capteur plan vitré est faible et diminue avec la température. Pour améliorer son rendement, il est nécessaire de réduire la réflexion de la surface vitrée, d'atténuer la convection autour de l'absorbeur et de diminuer la température du fluide caloporteur. Par contre, les capteurs sous vide présentent un rendement supérieur et une meilleure stabilité avec l'augmentation de la température. C'est pourquoi ils sont généralement utilisés pour les applications à hautes températures.

Les capteurs à tubes sous vide offrent une protection et une isolation efficaces pour les absorbeurs situés à l'intérieur des tubes, tandis que les capteurs plans ont une

grande surface d'entrée d'absorbeur, mais leur isolation se limite principalement à leur fond et à leurs côtés

7. Conclusion

Nous avons utilisé le logiciel TRNSYS pour vérifier la validité de notre modèle en intégrant les données climatiques du site, à partir de METEONORM. Aussi nous avons comparés, analysés et interprétés deux différents capteurs solaires thermiques.

En effectuant une évaluation précise des besoins énergétiques, il est possible de concevoir un système adapté de 30° en inclinaison et 3 m² en surface pour satisfaire la demande du site choisi.

Bibliographie

[1] M. Thomas, « Modélisation en régime dynamique d'une maison basse énergie Etude de cas « Maison Politehnica » », Mémoire de master, 3 septembre 2014.

[2] L. B. Affouda Léon, « Simulation d'une maison à consommation énergétique nette nulle », Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2004.

[3] M. C. Guemmouli et A. Gohmes, « Etude d'un système de conditionnement d'air alimenté par une source géothermique », Thèse de doctorat, juin 2018.

[4] F. Sahnoune, « Contribution à la modélisation et à l'expérimentation d'une installation solaire de production d'eau chaude équipée d'un système de télésurveillance », Thèse de doctorat, 15 mars 2016.

[5] D. Boualamallah, A. Merdji, A. Ghazi, et A. Miloudi., « Optimisation d'un chauffe- eau solaire », Revue des matériaux et énergies renouvelable, vol. 6, no 1, p. 29-39. 24 janvier 2021.

[6] G.B.Smith, R.C. Mcphedran, G.H. Derrick, « Surface Structure and the Optical Properties of Black Chrome », Applied Physics A ,vol. 36, p. 193-204, 2007.

[7] A. Benmerah, « Effet de différentes techniques du travail du sol et d'amendement organique sur les populations de Lombricidés (vers de terre). », Thèse de doctorat, 20 septembre 2020.

[8] Y. Khetir, « Etude comparative entre deux capteurs solaires Capteur cylindro-parabolique et capteur plan », Thèse de doctorat, 29 mai 2014.

[9] D. Lavigne, « Outil d'évaluation des impacts technologiques de politiques ´énergétiques et environnementales » Bulletin AMQ, vol. 51, no 1, p. 12, 2011.

Conclusion générale

Conclusion générale

Comme toute technologie solaire, le chauffe-eau solaire peut réduire la facture d'eau chaude jusqu'à 75 % et couvrir 60% de besoins eau domestique, donc pour une maison individuelle le chauffe-eau solaire est une solution économique, performante et durable.

En conclusion, la simulation d'un chauffe-eau solaire dans une maison individuelle à travers l'utilisation de logiciel TRNSYS offre une méthode efficace pour évaluer les performances du système et optimiser sa conception. En utilisant les données climatiques du site et en prenant en compte les besoins en eau chaude sanitaire, il est possible de déterminer les paramètres clés pour atteindre une efficacité maximale. Les résultats de la simulation permettent de comprendre et de comparer différents types de capteurs solaires.

Les informations obtenues grâce à cette simulation peuvent guider les décisions de conception et d'installation de systèmes de chauffe-eau solaires dans les maisons individuelles, contribuant ainsi à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Résumé

Ce travail présente une simulation d'un chauffe-eau solaire dans une maison individuelle située à Tlemcen, en centre-ville, à la latitude 34.89. Les résultats de la simulation obtenus par TRNSYS permettent de comparer deux types des capteurs solaires thermiques. En fin, cette étude contribue à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Abstract

This work presents a simulation of a solar water heater in a single-family home located in Tlemcen at the latitude 34.89. The simulation results obtained by TRNSYS permit to compare two types of thermal solar collectors. Eventually, this study contributes to the energy transition and the reduction of greenhouse gas emissions.

ملخص

يقدم هذا العمل محاكاة لسخان مياه يعمل بالطاقة الشمسية في منزل فردي يقع في تلمسان على خط عرض 34.89. تسمح نتائج المحاكاة باستخدام برنامج TRNSYS17 بمقارنة نوعين من مجمعات الطاقة الشمسية الحرارية. في النهاية، تساهم هذه الدراسة في انتقال الطاقة وتقليل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري.