REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES TLEMCEN

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية تلمسان

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

Filière : Electrotechnique

Spécialité : énergie et environnement

Présenté par : **TIOURSI Salah eddine**

BOUKADRI Hicham

Thème

Étude, modélisation et simulation d'un système de chauffe-eau solaire pour une habitation résidentielle à Béchar

Soutenu publiquement, le **30 / 09 / 2026**, devant le jury composé de :

Mr Bachir Chikh-BLED	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme Djamila KHERBOUCHE	MCA	ESSA Tlemcen	Co-Encadreur
Mr Mohamed MEBROUKI	MCA	ESSA Tlemcen	President
Mr Anis CHIALI	MCA	ESSA Tlemcen	Examinateur
Mme Amina GHOMRI	Pr	ESSA Tlemcen	Examinateur

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

En tout premier lieu, on remercie le Dieu, tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu voir le jour ni atteindre cette qualité sans l'aide et l'encadrement de
***Mr .Bachir Chikh BLED** et **Mme. Djamila KHERBOUCHE**.*
Nous leur adressons nos sincères remerciements pour la qualité exceptionnelle de leur encadrement, ainsi que pour leur patience.

*Nous adressons nos sincères remerciements à **Mr.Mohamed MEBROUKI** président du jury, ainsi qu'à **Mr. Anis CHIALI** et **Mme. Amina GHOMRI** , membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.*

Nous les remercions pour le temps consacré à son évaluation ainsi que pour leurs remarques et recommandations constructives.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation,

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin à la réalisation de ce modeste mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail :

- *à mon père (paix à son âme) et ma mère et pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, pour leur soutien continu tout au long de ma période d'études ;*

- *à mes frères Yasser et Rachad, et ma sœur Feriel que Dieu les garde, je leurs souhaite une vie pleine de succès et de réussite ;*

- *à tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'á ce jour présent ;*

- *enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.*

TIOURSI

Salaheddine

Tlemcen, le

Dédicace

Je dédie ce travail :

- *À ma chère maman, qui m'a soutenu et encouragé durant toutes ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude et de ma sincère reconnaissance pour son amour, sa patience et ses sacrifices.*
- *À mon cher père, qui a toujours été un pilier de force, de courage et de sagesse dans ma vie.. Sans toi, ce travail n'aurait jamais vu le jour.*

- *À mes chers frères, Mostafa, Anis et Yaagoub, ainsi qu'à ma chère sœur Rania,. Que Dieu les protège et leur accorde bonheur, santé et réussite.*

- *Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.*

BOUKADRI
Hicham
Tlemcen, le

Résumé

Notre étude a fait le point sur la modélisation et la simulation électrotechnique d'un système de chauffe-eau solaire pour une habitation résidentielle à Béchar. Il s'inscrit dans le cadre de la valorisation de l'énergie solaire, particulièrement abondante dans les régions sahariennes. Le système étudié comprend les capteurs solaires, le ballon de stockage, ainsi que les dispositifs de circulation et de régulation. Une modélisation a été réalisée afin de décrire le comportement des différents composants. La simulation a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink pour analyser les performances du système. Les résultats obtenus montrent une bonne couverture des besoins en eau chaude sanitaire. Cette étude confirme l'intérêt des systèmes solaires thermiques comme solution durable et efficace pour le secteur résidentiel.

Abstract

Our study reviewed the electrotechnical modeling and simulation of a solar water heating system for a residential dwelling in Béchar. It falls within the framework of harnessing solar energy, which is particularly abundant in Saharan regions. The system studied includes solar collectors, a storage tank, and circulation and regulation devices. A model was developed to describe the behavior of the various components. The simulation was performed using MATLAB / Simulink software to analyze the system's performance. The results obtained demonstrate good coverage of domestic hot water needs. This study confirms the potential of solar thermal systems as a sustainable and efficient solution for the residential sector.

ملخص

استعرضت دراستنا النمذجة والمحاكاة الكهروتقنية لنظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية لمنزل سكني في بشار. يندرج هذا النظام ضمن إطار تسخير الطاقة الشمسية، المتوفرة بكثرة في المناطق الصحراوية. يتضمن النظام المدروس مُجمِّعات شمسية، وخزان تخزين، وأجهزة تدوير وتنظيم. تم تطوير نموذج لوصف سلوك المكونات المختلفة.

أُجريت المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB / Simulink لتحليل أداء النظام . تُظهر النتائج المُتحصَّل عليها تغطية جيدة لاحتياجات المياه الساخنة المنزلية. تؤكد هذه الدراسة إمكانات أنظمة التسخين الشمسي كحل مستدام وفعال للقطاع السكني .

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE 14

CHAPITRE I : Généralités sur les chauffe eau solaires 3

I.1 Introduction 4

I.2 Définition 4

I.3 Types des chauffe-eau solaires 5

I.3.1 Chauffe-eau solaire thermique 5

I.3.2 Chauffe-eau solaire photovoltaïque (Hybride) : 7

I.4 Le choix du capteurs solaires thermiques 8

I.4.1 Les types des capteurs solaires thermiques 8

I.4.2 Rendement global du capteur 10

I.5 Le circuit hydraulique 12

I.5.1 Les différents types des fluides caloporteurs 12

I.5.2 Débit du fluide caloporteur 13

I.5.3 Pompe de circulation 15

I.5.4 Tuyauteries et échangeurs de chaleur 16

I.6 Système d'énergie d'appoint (SSC) 17

I.6.1 Les types de système d'appoint 18

I.6.2 Régulation circuit solaire 21

CHAPITRE II : Analyse énergétique et évaluation des besoins en eau chaude sanitaire 22

II.1 Introduction 23

II.2 Généralités sur l'eau chaude sanitaire 24

II.3 Analyse énergétique du site de Béchar 25

II.3.1 Situation géographique et climatique 25

II.3.2 Potentiel solaire 26

II.4 Données climatiques mensuelles de Béchar 27

II.5 Besoins en eau chaude sanitaire (ECS) 28

Table des matières

II.5.1 Définition et usages 28

II.5.2 Consommation journalière 29

II.5.3 Calcul de l'énergie nécessaire 29

II.5.4 Calcul de la surface du capteur nécessaire : 31

CHAPITRE III : Modélisation et Simulation d'un type de chauffe-eau solaire 32

III.1 Introduction 33

III.2 Présentation du logiciel (MATLAB/Simulink) 33

III.3 Présentation du modèle étudié 34

III.4 Modélisation des composants du système 35

III.4.1 Implémentation du modèle sous MATLAB/Simulink 38

III.5 Résultats de la simulation et interprétations 43

III.5.1 Les données météorologiques 43

III.5.2 Consommation ECS 44

III.5.3 Température de l'eau chaude sanitaire (ECS) fournie 45

III.5.4 Fonctionnement de la pompe de circulation du collecteur 46

III.5.5 Comparaison de la température à l'entrée et à la sortie du collecteur 46

III.6 Étude de l'effet des paramètres de fonctionnement sur les performances du chauffe-eau solaire 47

III.6.1 Influence des conditions climatiques saisonnières 47

III.6.2 Influence de la consommation d'eau chaude sanitaire (soutirage) sur la température de l'eau chaude sanitaire 48

III.6.3 Les paramètres influant sur la performance du capteur solaire 49

III.7 Conclusion 51

CHAPITRE IV : Optimisation et Étude technico-économique d'un type de chauffe-eau solaire 52

IV.1 Introduction 53

IV.2 Optimisation du système étudié 53

IV.2.1 Intégration de l'appoint électrique 53

IV.2.2 Optimisation des paramètres de système 56

IV.2.3 Validation de la configuration optimale 57

Table des matières

IV.3 Etude économique 58

IV.3.1 Introduction 58

IV.3.2 Estimation du coût d'investissement 58

IV.3.3 Économie d'énergie réalisée 60

IV.3.4 Temps de retour sur investissement (TRI) 61

IV.3.5 Valeur Actuelle Nette (VAN) 62

IV.3.6 Analyse de rentabilité 63

IV.3.7 Comparaison avec un chauffe-eau électrique classique 64

IV.4 Conclusion 65

CONCLUSION GENERALE 66

Bibliographie……..69

Liste des Figures

Figure 1: Chauffe-eau solaire domestique CES 4
Figure 2: Schéma de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire monobloc 5
Figure 3: Schéma de fonctionnement d'un thermosiphon séparés. 6
Figure 4: Schéma de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire à circulation forcée 6
Figure 5: Schéma d'un chauffe-eau solaire photovoltaïque 7
Figure 6 : Capteur solaire plan non vitré 8
Figure 7:Capteur solaire plan vitré 9
Figure 8: Schéma de principe d'un capteur solaire plan vitré 9
Figure 9: Capteurs solaire à tubes sous vide 10
Figure 10: Bilan énergétique d'un capteur solaire plan vitré 10
Figure 11: Variation du rendement thermique en fonction de ΔT 11
Figure 12: schéma de rendement optique d'un capteur plan 12
Figure 13: Schéma de circulation du fluide 15
Figure 14: Pompe de circulation 15
Figure 15: Schéma de calcul de la hauteur manométrique 16
Figure 16: Système solaire combiné 18
Figure 17: : Résistance thermoplongeur solaire 3KW 19
Figure 18 : Système d'appoint électrique 19
Figure 19: Schéma d'appoint par chaudière GAZ 20
Figure 20: Schéma des composants d'une installation CES avec un régulateur 24
Figure 21: Besoin eau chaude sanitaire (ECS) 25
Figure 22 Situation géographique de Béchar 26
Figure 23: Potentiel solaire et température à Béchar 28
Figure 24: Besoins en eau chaude et solaire à Béchar 30
Figure 25: : Schéma d'un chauffe eau solaire domestique 34
Figure 26: schéma d'un capteur thermique 35
Figure 27: schéma d'un ballon de stockage 36
Figure 28: Schéma fonctionnel du modèle de collecteur 39
Figure 29 : Schéma fonctionnel du modèle de Ballon 40
Figure 30: Schéma fonctionnel du modèle de la pompe C 41
Figure 31 : : Schéma bloc d'un système de chauffage solaire d'ECS 42
Figure 32: L'évolution de la température extérieure dans une journée 43
Figure 33: : La variation journalière de rayonnement global horizontal 44
Figure 34: : fonctionnement de la pompe de réservoir (consommation ECS) 44
Figure 35: Température de l'ECS dans le ballon 45
Figure 36: *:* fonctionnement de la pompe du collecteur 46
Figure 37: Évolution des températures d'entrée et de sortie du collecteur 47

Liste des Figures

Figure 38: Température de l'ECS dans la saison estivale _____ 47
Figure 39: Température de l'ECS dans la saison hivernale _____ 47
Figure 40: Température de l'ECS dans la saison estivale _____ 48
Figure 41: Température de l'ECS dans la saison hivernale _____ 48
Figure 42: consommation d'ECS dans la journée _____ 49
Figure 43: Température de l'ECS dans le ballon _____ 49
Figure 44: Module photovoltaïque _____ 50
Figure 45: Schéma fonctionnelle de la résistance électrique _____ 54
Figure 46: fonctionnement de la résistance électrique _____ 55
Figure 47: Température de l'ECS dans le ballon équipé d'une résistance é _____ 55
Figure 48: Evolution de la température Tst ,Tcol _____ 57

Liste des Tableaux

Tableau 1: Données climatiques mensuelles de Béchar 27
Tableau 2 : Variation saisonnière des besoins ECS 30
Tableau 3 : Paramètres du Collecteur 39
Tableau 4 : Paramètres du ballon 41
Tableau 5 : Influence des paramètres du système sur les températures Tst , Tcol 56
Tableau 6 : Coût total du système 59
Tableau 7 : Analyse de la rentabilité du système 63
Tableau 8: Comparaison entre le chauffe-eau solaire avec appoint électrique et le chauffe-eau électrique classique 64

Liste des abréviations

CES : Chauffe Eau Solaire

CESI : Chauffe Eau Solaire Individuel

ECS : Eau chaude sanitaire

SWH : Solar Water Heater

CFC : ChloroFluoroCarbures

ETH : Ethylene

LF : Low Flow

HF : High Flow

PEX : Polyéthylène réticulé

SCC : Système Solaire Combiné

MV : Monovalent

PAC : Pompe à Chaleur

COP : Coefficient de Performance

DPE : Diagnostic De Performance Énergétique

TEP : Tonne Équivalent Pétrole (unité énergétique)

EPS : Expansé

GHI : Rayonnement Global Horizontal

TDC : Taux De Couverture

VAN : valeur actuelle nette

TRI : Temps de Retour sur Investissement

AC : Courant Alternatif

DC : Courant Continu

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
Q	Energie ou quantité de chaleur	(J) ou (kWh)
m	Masse	Kg
C_p	Capacité thermique	(J / Kg . K)
ΔT	Différence de température	(°C) ou (K)
V	Volume	(L) ou (m^3)
G	Irradiation horizontale moyenne annuelle	kWh/m²
Tes	Température de l'eau de soutirage	°C
Tef	Température de l'eau froide entrant dans le ballon de stockage	°C
L	longueur	m
T	Température	(°C) ou (K)
D	Diamètre	m
v	Vitesse de fluide	m/s
$\dot{m}$	Débit massique de fluide	Kg/s
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
f	Coefficient de frottement	//
ΔP	Pertes des charges	W
A	Surface	m^2
R	Résistance	Ω
V	Tension	V
I	Courant	A
α	Absorptivité de l'absorbeur	//
τ_v	Transmissivité de la vitre	//

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des dernières décennies, la consommation mondiale d'énergie a connu une croissance rapide, soutenue par l'augmentation de la population, l'urbanisation accélérée et le développement industriel. Cette évolution s'accompagne d'une dépendance importante aux énergies fossiles, telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, qui représentent encore une part dominante du mix énergétique mondial.

Cependant, l'exploitation intensive de ces ressources engendre des conséquences majeures, notamment l'épuisement progressif des réserves, la volatilité des prix de l'énergie et, surtout, l'aggravation des problèmes environnementaux tels que le réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre.

Grace à ces défis, la transition vers des sources d'énergie renouvelables s'impose comme une nécessité incontournable pour assurer un développement durable. Parmi ces sources, l'énergie solaire se distingue par son abondance, sa disponibilité et son caractère propre. Elle constitue une solution particulièrement adaptée pour répondre aux besoins énergétiques dans le secteur résidentiel, notamment pour la production de l'eau chaude sanitaire, qui représente une part significative de la consommation énergétique des ménages.

Dans le contexte algérien, la problématique énergétique présente des spécificités importantes. L'Algérie dispose d'un potentiel solaire exceptionnel, avec un ensoleillement parmi les plus élevés au monde, notamment dans les régions sahariennes telles que Béchar. Malgré cet avantage naturel considérable, l'utilisation des systèmes solaires thermiques reste encore limitée, en particulier dans le domaine résidentiel. Par ailleurs, la forte dépendance aux énergies conventionnelles, largement subventionnées, contribue à une consommation excessive d'énergie et à une faible sensibilisation à l'efficacité énergétique.

En outre, le secteur résidentiel en Algérie représente une part importante de la consommation globale d'énergie, notamment en raison des besoins croissants en confort thermique et en eau chaude sanitaire. Les systèmes traditionnels, fonctionnant principalement à l'électricité ou au gaz, présentent des coûts d'exploitation élevés à long terme et participent indirectement aux émissions polluantes.

Dans ce contexte, l'intégration de solutions basées sur les énergies renouvelables, telles que les chauffe-eau solaires, apparaît comme une alternative stratégique permettant de réduire la consommation d'énergie primaire, de limiter les impacts environnementaux et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

C’est dans cette perspective que s’inscrit le présent travail, qui porte sur l’étude, la modélisation et la simulation électrotechnique d’un système de chauffe-eau solaire destiné à une habitation résidentielle à Béchar. L’objectif est d’analyser les performances énergétiques du système proposé, d’évaluer sa capacité à couvrir les besoins en eau chaude sanitaire.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les chauffe-eau solaires. Il présente leur principe de fonctionnement, leurs principaux composants, les différentes technologies existantes .

Le deuxième chapitre porte sur l’analyse énergétique ainsi qu’à l’évaluation des besoins en eau chaude sanitaire dans le secteur résidentiel et déterminer les caractéristiques et les dimensions des différents composants du système. Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et à la simulation du système à l’aide du logiciel MATLAB / simulink afin d’analyser ses performances énergétiques.

Enfin, le quatrième chapitre présente une étude technico-économique du système ainsi que des pistes d’optimisation visant à améliorer sa rentabilité et son efficacité.

CHAPITRE I : Généralités sur les chauffe eau solaires

I.1 Introduction

La croissance de la demande énergétique et la réduction des émissions de CO_2 placent l'énergie solaire au cœur des stratégies énergétiques. Grâce à un gisement solaire important, l'Algérie dispose d'un fort potentiel pour le développement de cette ressource. Parmi ses applications, le chauffage solaire de l'eau apparaît comme l'une des solutions les plus rentables et les plus prometteuses à court terme.

I.2 Définition

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné pour fournir partiellement ou totalement de l'eau chaude sanitaire (ECS). Généralement, il se compose d'un réservoir de stockage de l'eau chaude, d'un panneau solaire thermique ou photovoltaïque installé sur un plan, d'un régulateur électrique, relié entre eux avec une pompe qui permet de transporter l'énergie solaire (thermique) entre le réservoir et le capteur [1] .



Figure 1: Chauffe-eau solaire domestique CES

Il assure un ensemble de fonctions :

- Captage de l'énergie solaire et conversion du rayonnement en chaleur par les capteurs solaires thermiques.
- Transfert de la chaleur des capteurs vers l'eau chaude sanitaire par une boucle fermée à circulation naturelle ou forcée.
- Stockage de l'énergie dans le ballon solaire.
- Distribution de l'eau chaude vers le système d'appoint et les points de puisage [2].

I.3 Types des chauffe-eau solaires

I.3.1 Chauffe-eau solaire thermique

- **Monobloc :**

Le chauffe-eau solaire monobloc est un système dans lequel les capteurs solaires et le ballon de stockage sont regroupés dans une seule unité compacte.

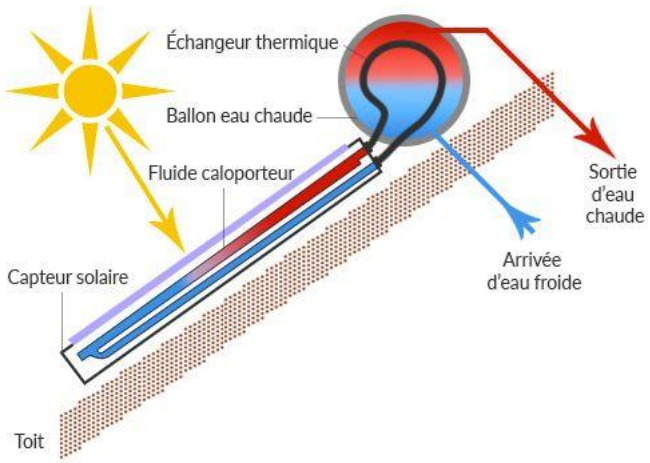

Figure 2: Schéma de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire monobloc

Son fonctionnement est généralement basé sur la circulation naturelle de l'eau. Lorsque le soleil chauffe les capteurs, l'eau à l'intérieur du monobloc se réchauffe, devient plus légère et monte vers la partie haute du ballon intégré. L'eau plus froide prend sa place et descend vers la zone de captation pour être chauffée à son tour. Ce processus se fait sans pompe ni système électrique, mais seulement en fonction des différences de température. En raison de sa simplicité que le chauffe-eau monobloc est une solution pratique et économique, surtout adaptée pour les régions bien ensoleillées et pour les besoins modérés en eau chaude [3].

- **Le chauffe-eau solaire à éléments séparés à circulation naturelle :**

C'est un système qui fonctionne sans pompe et sans électricité, il est constitué de deux parties : les capteurs solaires chargés de capter l'énergie solaire, et un ballon de stockage qui se trouve au-dessus des capteurs solaires. Ce système permet à l'eau de circuler de manière naturelle en fonction du principe du thermosiphon [3] .

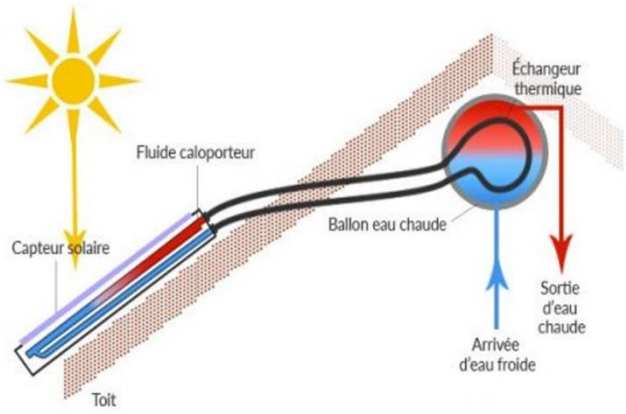

Figure 3: Schéma de fonctionnement d'un thermosiphon séparés.

- **Le chauffe-eau solaire à éléments séparés à circulation forcée**

Le chauffe-eau solaire à circulation forcée est un système dans lequel les capteurs solaires et le ballon de stockage sont installés séparément, mais dans lequel la circulation du fluide est assurée par une pompe, appelée circulateur, pilotée par un système de régulation.

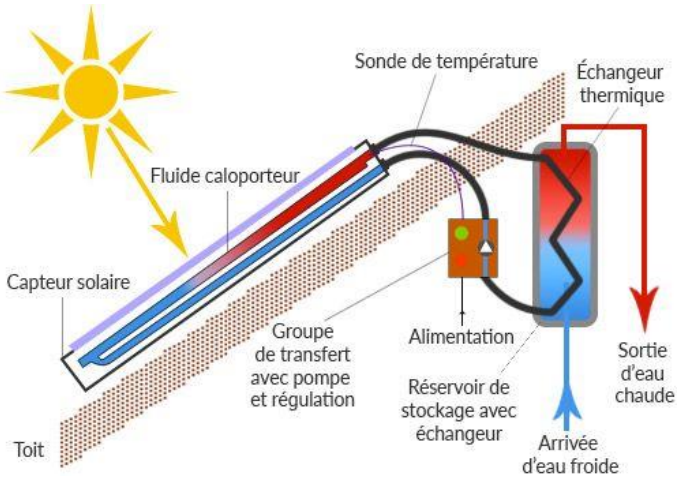

Figure 4: Schéma de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire à circulation forcée

Thermosiphon : Le terme thermosiphon est un principe de circulation naturelle utilisé notamment dans les chauffe-eaux solaires. Il repose sur un phénomène physique simple : Lorsqu'un fluide est chauffé, il devient plus léger et monte, tandis que le fluide plus froid, (plus dense), descend. Ce phénomène se produit de manière spontanée, sans moteur ni pompe [4].

I.3.2 Chauffe-eau solaire photovoltaïque (Hybride) :

Le chauffe-eau étudié est un nouveau système de chauffage qui utilise une source d'énergie solaire autre que l'énergie solaire thermique qui est l'énergie photovoltaïque, différent de la plupart des applications photovoltaïques à usage domestique, ce système ne recourt pas aux batteries et aux convertisseurs DC/AC [5].

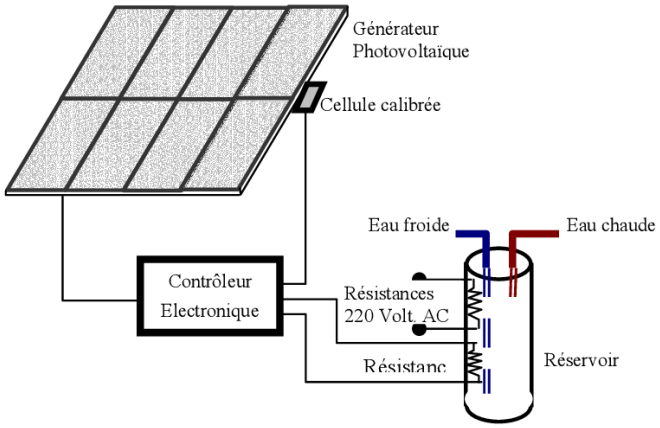

Figure 5: Schéma d'un chauffe-eau solaire photovoltaïque

Le système fonctionne même avec un faible éclairement solaire, l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque est convertie instantanément en énergie thermique à l'aide d'un ensemble de résistances dans le réservoir. L'eau chaude produite est stockée dans le réservoir pour une utilisation immédiate ou ultérieure. Les composants du chauffe-eau photovoltaïque sont un générateur photovoltaïque, un système de mesure et de contrôle et un réservoir d'eau équipé d'éléments chauffants (résistances) [5].

I.4 Le choix du capteurs solaires thermiques

Ce choix repose principalement sur l'analyse des besoins en eau chaude sanitaire définis au chapitre précédent, ainsi que sur les caractéristiques climatiques spécifiques à la région de Béchar, marquée par un fort ensoleillement, des températures ambiantes élevées et des amplitudes thermiques importantes entre le jour et la nuit.

I.4.1 Les types des capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires constituent l'élément principal de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique. Ils se présentent sous plusieurs types, selon leur conception et leur niveau de performance.

- **Capteur solaire plan non vitré :**

C'est le modèle le plus basique, le plus abordable, mais aussi le moins performant. Il s'agit généralement d'une simple plaque métallique ou plastique (absorbeur) sur laquelle sont fixés plusieurs tubes contenant un fluide caloporteur [6].

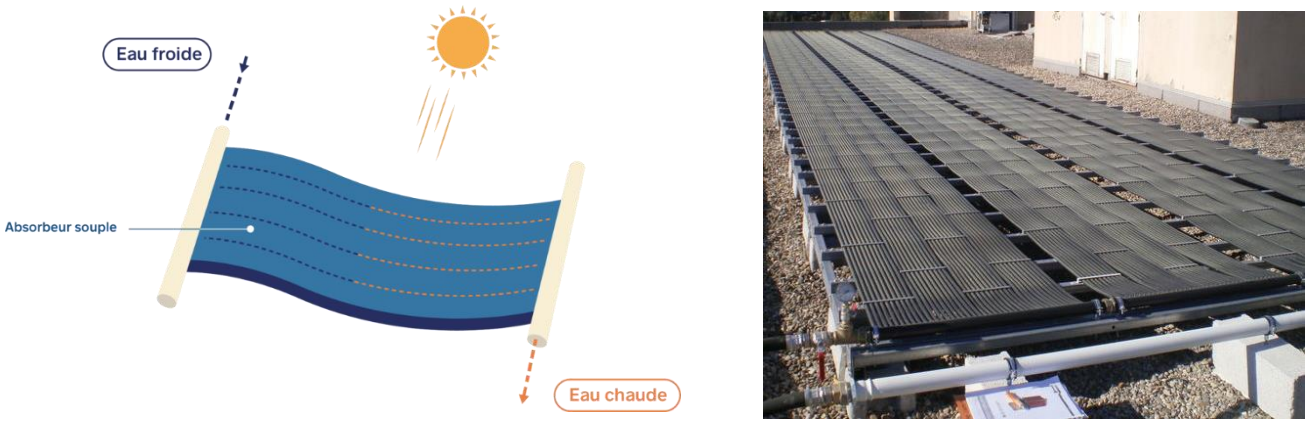

Figure 6: Capteur solaire plan non vitré

Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur le devant ; ils sont plus adaptés à des applications à basse température (moins de 30°C).

L'usage principal de ces capteurs est le réchauffement des piscines en extérieur. Sans vitrage, ces détecteurs captent une bonne portion de l'énergie solaire [6].

- **Capteur solaire plan vitré :**

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus, ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air qui conviennent aux applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre **30°C** et **70°C**.

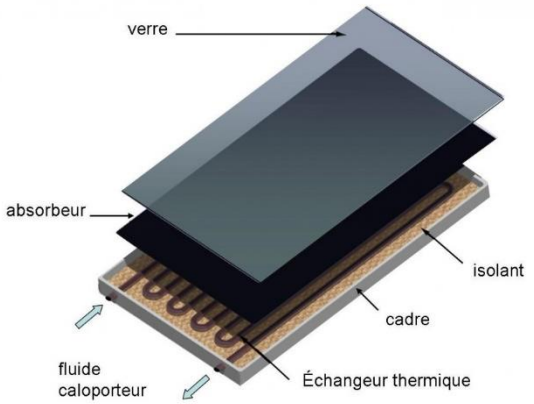

Figure 7:Capteur solaire plan vitré

Il se présente sous la forme d'un caisson isolé, recouvert sur sa face supérieure par une vitre transparente qui laisse passer le rayonnement solaire tout en limitant les pertes de chaleur grâce à l'effet de serre.

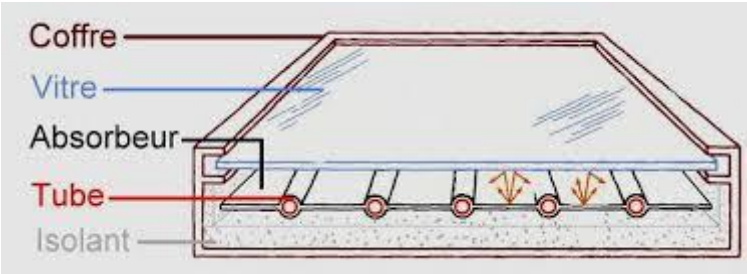

Figure 8: Schéma de principe d'un capteur solaire plan vitré

A l'intérieur de ce capteur, on trouve un absorbeur, généralement en cuivre ou en aluminium, de couleur sombre afin de capter le maximum d'énergie solaire. Cet absorbeur est traversé par des tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur, lorsque le soleil chauffe l'absorbeur, la chaleur est transmise au fluide, qui est ensuite acheminée vers un ballon de stockage pour le chauffage sanitaire.

- **Capteur solaire à tubes sous vide :**

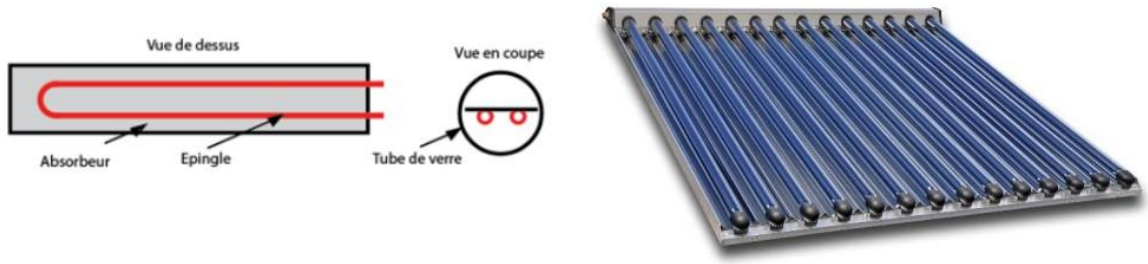

Figure 9: Capteurs solaire à tubes sous vide

Ils sont les plus performants, composés de tubes en verre dans lesquels le vide joue le rôle d'isolant thermique, permettent d'atteindre des températures de l'ordre de 150°C avec des rendements corrects ce qui réduit fortement les pertes de chaleur. Grâce à cette technologie, ils restent efficaces même par un temps froid ou lorsque l'ensoleillement est faible. En contrepartie, ils sont plus coûteux et peu fragiles, mais ils constituent un excellent choix lorsque la recherche d'un rendement élevé tout au long de l'année [7].

Dans ce travail, le choix s'est porté sur des **capteurs solaires plans vitrés**, en raison de leur simplicité de conception, de leur robustesse et de leur coût relativement modéré.

I.4.2 Rendement global du capteur

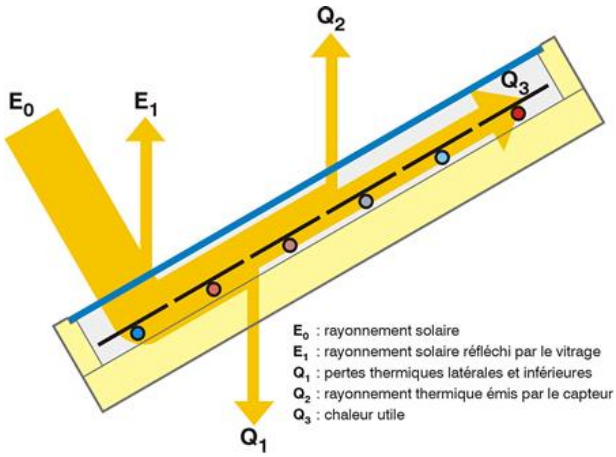

Figure 10: Bilan énergétique d'un capteur solaire plan vitré

La figure **-10-** illustre le bilan énergétique d'un capteur solaire thermique et permet de comprendre les différentes étapes de conversion du rayonnement solaire en chaleur utile.

Le rayonnement solaire incident $\mathbf{E_0}$ arrive sur la surface du capteur. Une partie de ce rayonnement est réfléchie par le vitrage et constitue la perte optique $\mathbf{E_1}$. Le rayonnement restant est absorbé par le capteur et transformé en énergie thermique. Cette énergie se répartit ensuite entre les pertes thermiques vers l'environnement $\mathbf{Q_1}$, le rayonnement thermique émis par le capteur $\mathbf{Q_2}$ et la chaleur utile $\mathbf{Q_3}$ transférée au fluide caloporteur.

Le rendement global d'un capteur solaire est déterminé par la combinaison de deux contributions principales : le rendement optique et le rendement thermique [8] .

Le rendement thermique :

Lorsque le fluide caloporteur circulant dans le capteur s'échauffe, une partie de la chaleur reçue est perdue par convection et par rayonnement vers l'extérieur. Ces pertes sont caractérisées par un coefficient k exprimé en (W/m². °C)

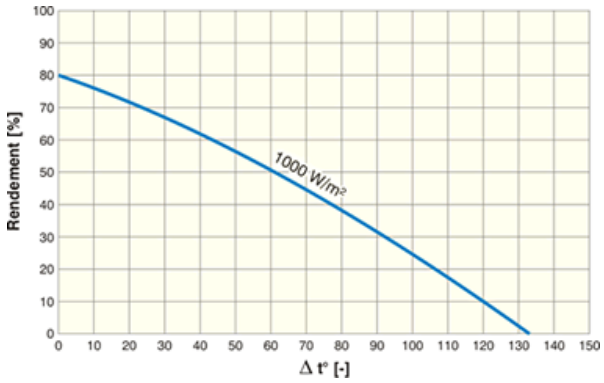

Figure 11: Variation du rendement thermique en fonction de ΔT

Le rendement optique :

Le rendement optique d'un capteur solaire thermique mesure sa capacité à convertir le rayonnement solaire incident en chaleur, représentant la part d'énergie traversant la vitre et absorbée par l'absorbeur. Il est généralement compris entre 75 et 85% pour des capteurs plans vitrés et peut atteindre 90% pour des tubes sous vide [8] .

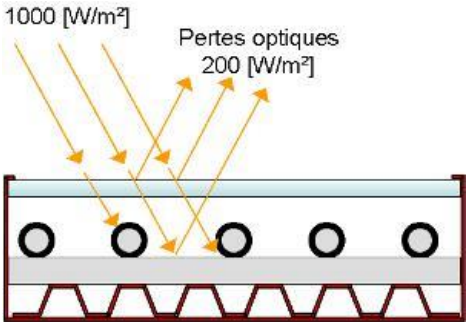

Figure 12: schéma de rendement optique d'un capteur plan

Le rendement global est défini par la relation suivante [8]:

$$\eta_g = \eta_o - \frac{K(T_{mf} - T_a)}{G}$$

Avec :

η_o : Le rendement optique

K : Coefficient de pertes thermiques (W/m². K)

T_{mf} : Température moyenne du fluide caloporteur (°C)

T_a : Température ambiante (°C)

G : Rayonnement solaire

I.5 Le circuit hydraulique

I.5.1 Les différents types des fluides caloporteurs

Il existe plusieurs fluides caloporteurs avec différentes propriétés selon l'utilisation souhaitée.

- **L'eau**

L'eau constitue le fluide caloporteur le plus simple à se procurer et le moins coûteux pour les installations de chauffage solaire. Ses atouts majeurs résident dans son faible coût et son caractère naturel, il peut être utilisée pour des températures dépassant les 100°C, en font un liquide idéal. En revanche, son principal inconvénient est sa sensibilité au gel lorsque la température descend en dessous de 0°C, pour cette raison, l'utilisation de l'eau seule n'est pas recommandée dans les régions soumises à des hivers rigoureux [9].

- **Les glycols**

Les glycols sont des mélanges composés d'eau et d'un agent antigel, généralement à base d'éthylène glycol ou de propylène glycol. Par rapport à l'eau, ces fluides présentent l'avantage de résister au gel, même à des températures négatives. Ils sont donc particulièrement adaptés aux zones géographiques où le gel est fréquent durant la saison hivernale [9].

- **Les huiles thermiques**

Les huiles thermiques font également partie des fluides caloporteurs utilisés dans les installations solaires, leur principal intérêt réside dans leur excellente tenue face aux températures très élevées. Grâce à cette propriété, elles sont privilégiées dans les systèmes solaires fonctionnant à haute température, notamment les installations équipées de capteurs solaires thermiques spécifiques [9].

- **Le dioxyde de carbone supercritique (CO_2)**

Ce fluide est principalement utilisé dans les centrales solaires thermodynamiques à concentration, car il permet un transfert efficace de la chaleur à des niveaux de température élevés.

En conclusion, chaque fluide caloporteur possède des caractéristiques propres qui le rendent plus ou moins adapté selon le type d'installation solaire et les conditions climatiques.

I.5.2 Débit du fluide caloporteur

Deux modes de circulation du fluide caloporteur peuvent être distingués dans le circuit primaire d'une installation solaire thermique, selon la vitesse d'écoulement adoptée :

- **Low flow** (faible débit) : Le mode repose sur une circulation du fluide à faible débit dans la boucle primaire, cette configuration permet l'utilisation de canalisations de petit diamètre et se caractérise par des écarts de température élevés entre l'entrée et la sortie de l'absorbeur. Le principe consiste alors à produire un volume réduit de fluide atteignant une élévation de température importante, généralement comprise entre 20 et 40°C.

Ce type de fonctionnement reste peu répandu et se limite principalement aux installations où l'eau chauffée par les capteurs est utilisée directement, sans passer par un échangeur thermique. [10]

- **High flow (**débit élevé) : A l'inverse, ce mode est basé sur une circulation du fluide à débit élevé dans le circuit primaire à l'aide d'une pompe de circulation.

Cette solution implique l'emploi de tuyauteries de diamètre plus conséquent et conduit à des différences de température plus faibles lors de l'échange thermique. Elle permet ainsi de chauffer un volume plus important de fluide, mais avec une augmentation de température plus modérée, de l'ordre de 10°C [10].

Le débit massique du fluide peut être estimé à partir de la relation suivante :

$$\dot{m} = \frac{P}{C_P . \Delta T}$$

Avec :

ṁ : Débit massique du fluide (kg/s).

P : La puissance thermique transmise (W).

C_p : La capacité thermique massique du fluide (J/kg· K).

ΔT : La différence de température entre l'entrée et la sortie du circuit (K).

I.5.3 Pompe de circulation

Pour assurer la circulation du fluide caloporteur entre les capteurs solaires, le ballon de stockage et le transfert efficace de la chaleur captée vers le point d'utilisation, en utilise un circulateur.

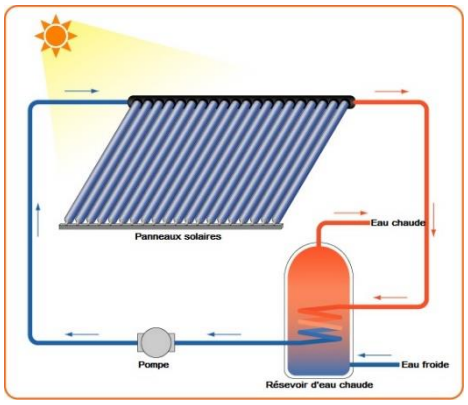

Figure 13: Schéma de circulation du fluide



Figure 14: Pompe de circulation

Rôle principal :

- Maintenir un débit constant ou variable du fluide caloporteur dans le circuit.
- Garantir un transfert thermique optimal entre les capteurs et le stockage.
- Adapter la circulation en fonction des conditions d'ensoleillement et de la demande thermique. [11]

Le choix de la pompe repose sur deux paramètres essentiels :

- Le débit nécessaire Q en fonction de la puissance thermique des capteurs qui est donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{P}{\rho . C_P . \Delta T}$$

Avec :

P : La puissance thermique transmise (W)

ρ : La masse volumique du fluide (kg/m³)

C_p : La Capacité calorifique du fluide (J/kg· K)

ΔT : La différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur (K).

- La hauteur manométrique H

La pompe doit être capable de surmonter les pertes de charge du circuit (tuyauteries, coudes, échangeur, etc.) [12].

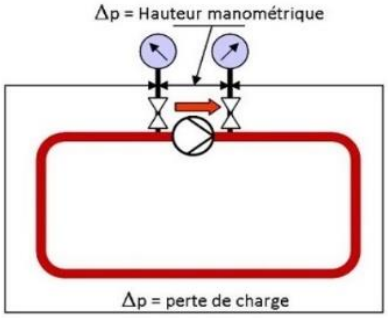

Figure 15: Schéma de calcul de la hauteur manométrique

Plus le circuit est long ou complexe, plus la hauteur manométrique requise est élevée.

I.5.4 Tuyauteries et échangeurs de chaleur

Les tuyauteries constituent le réseau de circulation du fluide caloporteur entre les capteurs solaires, le ballon de stockage et éventuellement un échangeur thermique.

L'échangeur de chaleur permet de transférer la chaleur du circuit solaire au circuit secondaire d'eau sanitaire [13].

Caractéristiques

- **Diamètre** : Plus le diamètre est grand, plus le fluide circule facilement, mais cela augmente le coût et le volume de fluide nécessaire.
- **Longueur** : Les circuits plus longs entraînent davantage la résistance à l'écoulement.
- **Matériau** : Les matériaux courants sont le cuivre, le PEX ou le polypropylène, choisis pour leur résistance à la chaleur et à la corrosion.
- **Isolation** : Les tuyaux doivent être bien isolés pour limiter les pertes de chaleur pendant le trajet du fluide.

Pertes de charge

Les pertes de charge représentent la résistance que rencontre le fluide lorsqu'il circule dans les tuyaux, elles sont causées par :

- Les frottement du fluide sur les parois du tuyau sur toute la longueur du circuit.
- Les coudes, réductions, vannes et raccords, qui perturbent l'écoulement et augmentent la résistance.
- Eléments annexes tels que l'échangeur thermique, le filtre ou le vase d'expansion.

Ces pertes de charge sont données par l'expression suivante :

$$\Delta P = f.\frac{L}{D}.\frac{\rho v^2}{2}$$

Avec :

ΔP : Pertes de charge (Pa)

f : Coefficient de frottement dépendant du matériau et de l'écoulement.

L : Longueur du tuyau (m)

D : Diamètre intérieur du tuyau (m)

ρ : Masse volumique du tuyau (Kg/m)

v : Vitesse du fluide (m/s)

I.6 Système d'énergie d'appoint (SSC)

Les capteurs solaires thermiques ne sont pas en mesure d'assurer à eux seuls la totalité des besoins en chaleur tout au long de l'année. Leur fonctionnement dépend directement des conditions climatiques et du niveau d'ensoleillement, qui varient selon les saisons, les conditions météorologiques et les périodes de la journée. Ainsi, lors des phases de faible rayonnement solaire ou lorsque la demande en eau chaude ou en chauffage est élevée, la production solaire devient insuffisante [14].

Il est donc nécessaire d'intégrer un système d'appoint ou un *Système Solaire Combiné (SSC)* afin de garantir la continuité du service et de maintenir un niveau de confort thermique constant pour l'utilisateur.

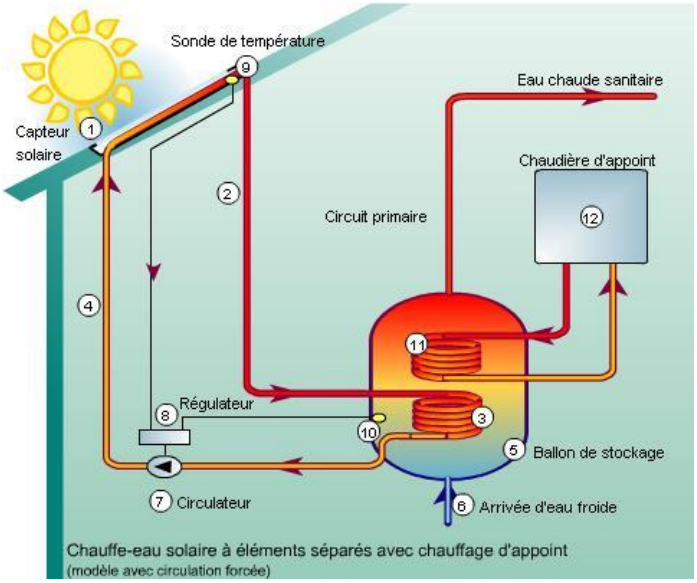

Figure 16: Système solaire combiné

I.6.1 Les types de système d'appoint

Plusieurs technologies d'appoint peuvent être mises en œuvre, en fonction des contraintes techniques, énergétiques et économiques de l'installation.

➢ Appoint électrique

Il est assuré par une résistance électrique intégrée au ballon de stockage. Il se distingue par sa simplicité d'installation, sa réactivité et sa facilité de régulation. La résistance se met en fonctionnement lorsque la température de l'eau descend en dessous d'une valeur seuil définie par le système de régulation [15].

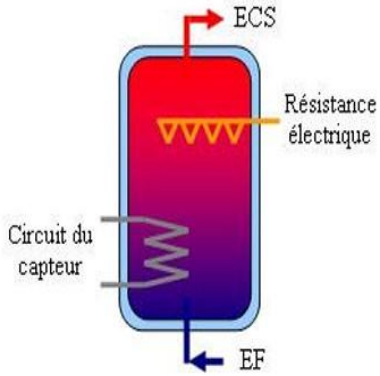

Figure 18: Système d'appoint électrique



Figure 17: : Résistance thermoplongeur solaire 3KW

La résistance électrique représente l'élément chauffant, quand le courant traverse cette résistance, elle s'oppose au passage du courant et transforme l'électricité en chaleur (effet Joule).

- **Ses Caractéristiques**

  Puissance : Exemples courants **500 W** jusqu'à **2000 W**

  Tension : En général **230 V** (réseau domestique en Europe).

  Valeur de résistance Calculée par la formule : $\boldsymbol{R = U^2 / P}$

  Exemple : 1000 W sous 230 V → R ≈ **53 Ω**

- **Types de résistance**

  Fil résistif (nichrome) : simple, robuste

  Résistance blindée : protégée par un tube métallique

  Résistance céramique : chauffe vite, utilisée dans les soufflants

- **Température de fonctionnement**

  Peut monter entre **300°C et 800°C** selon le type.

Cependant, ce type d'appoint présente un rendement énergétique limité et peut engendrer une consommation électrique élevée, ce qui augmente les coûts d'exploitation s'il est sollicité de manière fréquente.

➢ Appoint par chaudière (gaz, fioul ou biomasse)

L'appoint peut également être assuré par une chaudière, utilisant les différents combustibles tels que le gaz naturel, le fioul ou la biomasse. La chaleur produite est transmise à l'eau via un échangeur thermique.

Ce système offre une puissance thermique élevée et convient aux installations de grande capacité ou aux besoins importants en chauffage. Il permet de réduire la consommation électrique, mais nécessite une infrastructure plus complexe et un entretien régulier [16].

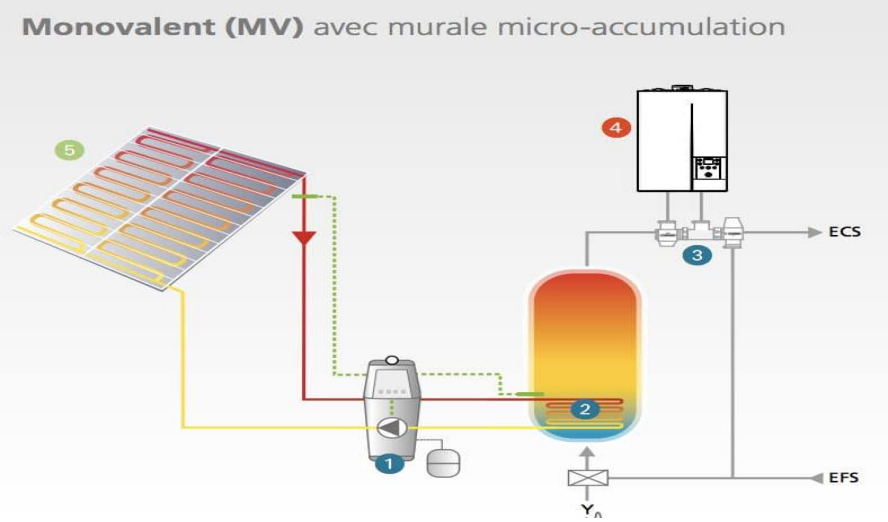

Figure 19: Schéma d'appoint par chaudière GAZ

➢ Appoint par pompe à chaleur

La *Pompe à Chaleur* (PAC) peut être utilisée comme un système d'appoint en complément des capteurs solaires, elle exploite les calories présentes dans l'air, le sol ou l'eau pour produire la chaleur avec un coefficient de performance élevé (COP).

Ce type d'appoint présente un bon compromis entre efficacité énergétique et impact environnemental, bien que son coût d'investissement soit plus élevé et que ses performances dépendent des conditions extérieures [17].

I.6.2 Régulation circuit solaire

La régulation a pour fonction d'enclencher le circulateur lorsque les capteurs peuvent fournir de la chaleur et de le déclencher dans le cas contraire. Le rôle de la régulation est de permettre par une commande appropriée, le transfert de l'énergie captée dans le cas où la température du fluide des capteurs est supérieure à celle de l'eau du ballon. Le contrôle de la bonne marche des pompes sera toujours de type différentiel, fonctionnant suivant l'écart de température entre la sortie du capteur et le réservoir d'accumulation solaire [18].

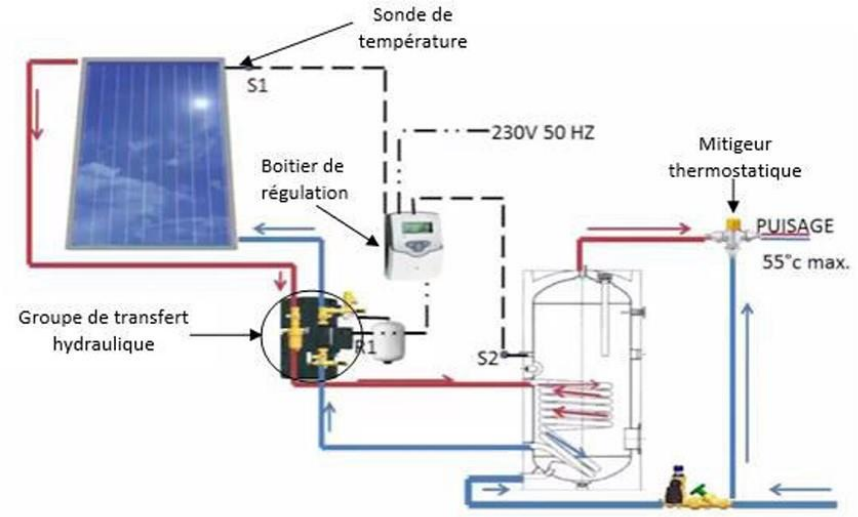

Figure 20: Schéma des composants d'une installation CES avec un régulateur

A partir de ce schéma on remarque qu'il y a deux sondes de températures :

- La sonde de capteur : Elle doit être placée de manière à mesurer la température de l'absorbeur à proximité de son raccord de sortie.
- La sonde de l'accumulateur : Celle-ci est placée un peu plus haut que le milieu de l'échangeur immergé.

Dans ce cas, le circulateur solaire fonctionne dès que la différence de température entre les capteurs et l'accumulateur est plus élevée que le seuil d'enclenchement réglé, donc le circulateur est automatiquement enclenché lorsque les capteurs sont à une température supérieure à l'accumulateur.

CHAPITRE II : Analyse énergétique et évaluation des besoins en eau chaude sanitaire

II.1 Introduction

Le chauffage de l'eau chaude sanitaire (ECS) constitue un besoin fondamental dans les habitations résidentielles et représente une part non négligeable de la consommation énergétique globale du secteur résidentiel. Cette consommation est généralement assurée par des systèmes conventionnels fonctionnant à l'électricité ou au gaz, ce qui engendre une augmentation de la demande énergétique ainsi que des coûts économiques et environnementaux importants.

Dans un contexte marqué par la croissance démographique, l'augmentation des besoins énergétiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'analyse des besoins en eau chaude sanitaire apparaît comme une étape essentielle avant l'intégration de solutions basées sur les énergies renouvelables.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser la consommation énergétique liée à la production de l'eau chaude sanitaire et d'évaluer les besoins réels d'une habitation résidentielle. Il s'agit d'identifier les principaux facteurs influençant cette consommation et d'estimer quantitativement les besoins journaliers en ECS. Les résultats obtenus dans ce chapitre serviront de base pour le dimensionnement, la modélisation et la simulation du système de chauffe-eau solaire étudié dans les chapitres suivants.

II.2 Généralités sur l'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire (ECS) désigne l'eau chauffée destinée aux usages domestiques tels que la toilette, la douche, le lavage du linge, le nettoyage et la préparation des aliments. Elle constitue un besoin essentiel dans les habitations résidentielles et joue un rôle important dans le confort des occupants. La production de l'ECS nécessite une quantité significative d'énergie, ce qui en fait l'un des principaux postes de consommation énergétique dans le secteur résidentiel.

Dans la majorité des logements, l'eau chaude sanitaire est produite à partir de systèmes conventionnels fonctionnant à l'électricité, au gaz naturel ou au gaz butane. Ces systèmes, bien que simples à mettre en œuvre, présentent des inconvénients majeurs liés à la consommation d'énergie primaire, à l'augmentation des coûts d'exploitation et aux impacts environnementaux, notamment les émissions de gaz à effet de serre [19].

La température de l'eau chaude sanitaire utilisée dans les applications domestiques varie généralement entre 45 °C et 60 °C, en fonction des besoins et des normes de confort. Le maintien de cette température nécessite un apport énergétique constant, particulièrement dans les régions où la consommation est répartie sur toute l'année. Par ailleurs, la température de l'eau froide d'alimentation dépend fortement des conditions climatiques et de la situation géographique, ce qui influence directement l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau [20].



Figure 21: Besoin eau chaude sanitaire (ECS)

Dans ce contexte, l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de production d'eau chaude sanitaire constitue un enjeu majeur. L'intégration de solutions basées sur les énergies renouvelables, notamment les systèmes de chauffe-eau solaires, apparaît comme une alternative pertinente pour réduire la consommation d'énergie conventionnelle et limiter les impacts environnementaux. Une bonne compréhension des caractéristiques et des besoins liés à l'ECS est donc indispensable avant toute étude de dimensionnement et de modélisation d'un système de chauffage de l'eau .

II.3 Analyse énergétique du site de Béchar

II.3.1 Situation géographique et climatique

La ville de Béchar, située au sud-ouest de l'Algérie, bénéficie d'un climat saharien chaud et sec. Cette région est caractérisée par :

- Un ensoleillement quasi permanent tout au long de l'année,
- Des étés très chauds et des hivers doux,
- Une faible humidité relative et peu de précipitations.



Figure 22: Situation géographique de Béchar

Ces conditions climatiques sont idéales pour l'exploitation de l'énergie solaire thermique. Le potentiel énergétique d'un site est déterminé principalement par la quantité d'irradiation solaire disponible, ainsi que par la température ambiante, qui influencent la performance des capteurs solaires thermiques [21].

Des études menées par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables et des relevés de la NASA indiquent que la région de Béchar reçoit en moyenne plus de 5 kWh/m²/jour d'irradiation solaire globale sur une surface horizontale, avec des variations saisonnières importantes [21].

Ces données constituent la base pour dimensionner un système solaire thermique capable de répondre aux besoins d'eau chaude sanitaire d'une habitation résidentielle. La connaissance du potentiel solaire est également essentielle pour estimer la couverture énergétique mensuelle et annuelle du système [22].

II.3.2 Potentiel solaire

Le potentiel solaire de Béchar est l'un des plus élevés d'Algérie et d'Afrique du Nord. Il se caractérise par :

- **Irradiation solaire moyenne annuelle** : ~2650 kWh/m²/an sur une surface horizontale, soit environ 5–7 kWh/m²/jour [23].
- **Durée d'ensoleillement annuelle** : entre 3000 et 3500 heures .
- **Variation saisonnière** : forte en été (~6 kWh/m²/jour), plus faible en hiver (~3,2–4 kWh/m²/jour) [23]

II.4 Données climatiques mensuelles de Béchar

Tableau 1: Données climatiques mensuelles de Béchar

Mois	Température moyenne (°C)	Heures d'ensoleillement moyen / jour	Irradiation solaire moyenne (kWh/m²/jour)
Janvier	10,0	8	3,5
Février	12,3	9	4,4
Mars	16,4	10	5,5
Avril	20,6	10,5	6,7
Mai	25,2	11	7,1
Juin	30,2	11,5	7,2
Juillet	34,2	11,5	7,0
Août	33,2	11	6,3
Septembre	28,2	10	5,5
Octobre	22,1	9	4,5
Novembre	15,2	8	3,6
Décembre	11,0	7,5	3,2

Ces valeurs montrent que l'irradiation solaire est maximale pendant les mois d'été (juin-juillet) et plus faible en hiver (décembre-janvier). Les températures moyennes influencent également la température d'alimentation de l'eau froide, ce qui impacte la performance thermique du système solaire [24] .

Commentaires

- En **été**, le rayonnement solaire élevé permet de couvrir la quasi-totalité des besoins en eau chaude sanitaire.
- En **hiver**, l'irradiation solaire est plus faible, ce qui peut nécessiter un **appoint énergétique** pour maintenir la température souhaitée de l'eau.
- La forte durée d'ensoleillement et le faible taux de nuages rendent Béchar particulièrement favorable pour les systèmes solaires thermiques domestiques.

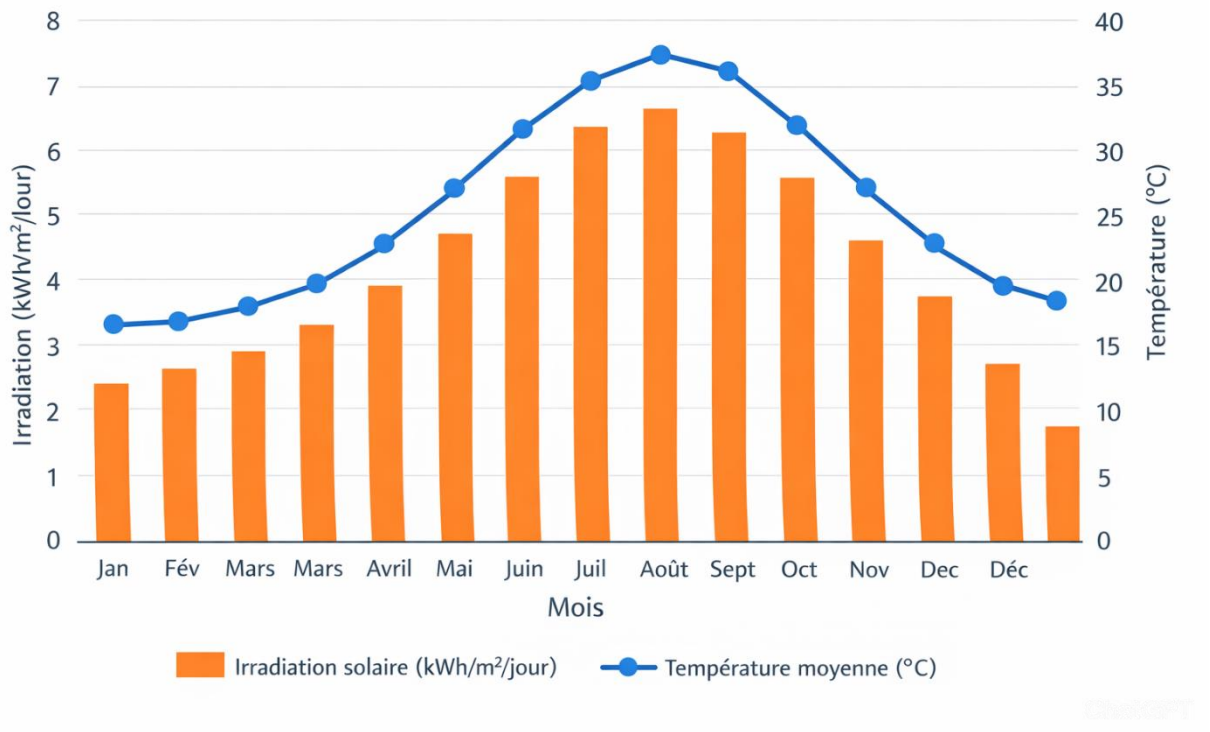

Figure 23: Potentiel solaire et température à Béchar

II.5 Besoins en eau chaude sanitaire (ECS)

II.5.1 Définition et usages

L'eau chaude sanitaire (ECS) est utilisée dans les habitations pour :

- Les douches et bains
- Le lavage des mains et des lavabos
- La vaisselle et les travaux domestiques
- Le nettoyage général

La température de confort pour l'ECS est généralement comprise entre **45 °C et 60 °C**, selon les normes sanitaires et les préférences des habitants [25].

II.5.2 Consommation journalière

La consommation d'ECS dépend :

- Du **nombre d'occupants**
- Des **habitudes de consommation**
- Du **type de logements et équipements**

Pour le dimensionnement d'un chauffe-eau solaire résidentiel, les valeurs typiques sont :

- **30–50 litres/personne/jour** dans les conditions standards
- Dans notre étude, nous considérons **4 personnes**, avec **40 L/personne/jour**

$$V_{Total} = 4 \times 40 = \mathbf{160\ L/jour}$$ [25]

$$\boldsymbol{V_{Ballon} = 100\ L}$$

Bien que les besoins journaliers en eau chaude sanitaire soient estimés à **160 L/jour**, un ballon de stockage d'une capacité de **100 L** a été retenu.

Ce choix se justifie par le fait que le ballon est continuellement réchauffé durant les périodes d'ensoleillement. Ainsi, l'eau chaude consommée est progressivement remplacée et réchauffée au cours de la journée, permettant de satisfaire les besoins journaliers sans qu'il soit nécessaire de stocker la totalité des 160 L en une seule fois. De plus, le choix d'un ballon de plus faible capacité permet de réduire les pertes thermiques et le coût global du système.

II.5.3 Calcul de l'énergie nécessaire

L'énergie nécessaire pour chauffer l'eau est donnée par la formule classique :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

où :

- **m** : masse d'eau (kg) ≈ volume en litres
- **Cp** =4185 J/kg·°C : chaleur spécifique de l'eau
- **ΔT** = $T_{chaude} - T_{froide}$: différence de température (°C)

Hypothèses

- Température de l'eau froide : **25 °C**
- Température souhaitée : **55 °C** → ΔT = **30 °C**
- Volume : 160 L ≈ **160 kg**

$$\boldsymbol{Q} = 160 \times 4185 \times 30 \; = \; 20\,088\,000J \; \approx \; 5{,}58\,kWh/Jour$$

Ainsi, la famille de 4 personnes nécessite **environ 5,5 à 6 kWh/jour** pour satisfaire ses besoins en ECS. [26]

Variation saisonnière :

Tableau 2 : Variation saisonnière des besoins ECS

Saison	Température eau froide	Énergie nécessaire approximative
Hiver	12–15 °C	6,5 kWh/jour
Printemps	16–22 °C	5,8 kWh/jour
Été	25–30 °C	4 –5 kWh/jour
Automne	20–22 °C	5,5 kWh/jour

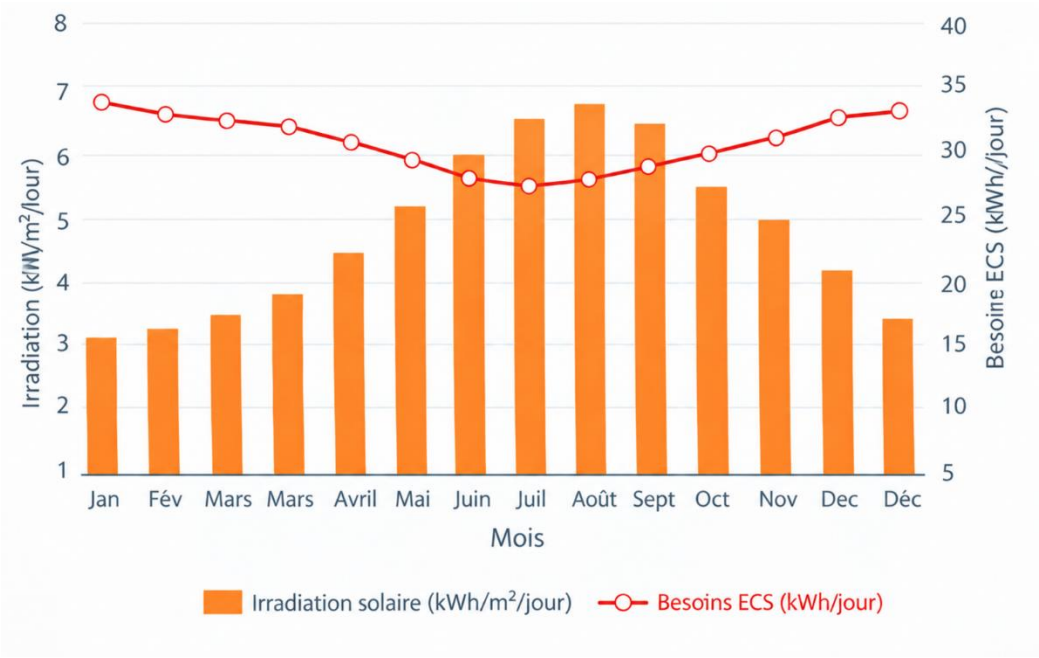

Figure 24: Évolution mensuelle des besoins en ECS à Béchar

II.5.4 Calcul de la surface du capteur nécessaire :

La surface du capteur est calculée afin de produire cette énergie quotidienne .

L'énergie produite par un capteur est :

$$Q_u = A_c \times G \times \mu$$

avec

- **Q_u** : énergie utile (kWh/j)
- ***A_c*** : surface du capteur (m²)
- ***G*** : irradiation solaire moyenne (kWh/m².j)
- ***μ*** : rendement moyen .

Pour Béchar

G = 5.38 kWh/m².j

Q = 5,58 kWh

***μ* = 0.7**

En isolant la surface :

$$A_C = \frac{Q_u}{G \times \mu} = \frac{5{,}58}{5{,}38 \times 0{,}7} = \mathbf{1,47\ m^2}$$

➢ On peut choisir une surface de capteur de **2 m²** pour garantir une production thermique adaptée aux besoins journaliers .

CHAPITRE III : Modélisation et Simulation d’un type de chauffe-eau solaire

III.1 Introduction

Chaque année, les énergies renouvelables prennent une place de plus en plus importante dans notre vie quotidienne. Leur utilisation permet de réduire la consommation d'énergie et de diminuer notre dépendance aux énergies fossiles.

L'énergie solaire est l'exemple le plus flagrant d'utilisation des énergies renouvelables ; elle permet d'obtenir une énergie propre et non polluante.

Des recherches sont menées à travers le monde sur les modèles, les conceptions et les comparaisons de systèmes de chauffage solaire pour les bâtiments résidentiels.

Ce chapitre est consacré, d'une part, au modélisation des différents équipements constituant le système solaire thermique, D'autre part, une étude par simulation sera réalisée afin d'analyser l'influence de certains paramètres opérationnels sur les performances du capteur solaire thermique.

III.2 Présentation du logiciel (MATLAB/Simulink)

MATLAB (**MAT**rix **LAB**oratory) est un environnement de calcul numérique développé par MathWorks. Il est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie, des sciences et de la recherche pour effectuer des calculs mathématiques, analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles de simulation [27].

SIMULINK est un environnement graphique intégré à MATLAB qui permet de modéliser, simuler et analyser le comportement dynamique de systèmes complexes à l'aide de diagrammes en blocs. Contrairement à la programmation classique, Simulink offre une approche visuelle où chaque composant du système est représenté par un bloc relié aux autres par des signaux [27].

Grâce à sa bibliothèque de blocs prédéfinis, Simulink facilite la modélisation de systèmes multidisciplinaires, notamment électriques, thermiques, mécaniques et de contrôle. Il permet également de simuler le fonctionnement d'un système dans différentes conditions de fonctionnement, d'observer l'évolution des variables en temps réel et d'évaluer les performances avant toute réalisation expérimentale [27].

Dans le cadre de cette étude, MATLAB/Simulink a été retenu pour modéliser et simuler le fonctionnement du système de chauffe-eau solaire. Ce logiciel offre une grande flexibilité dans l'implémentation des équations mathématiques du capteur solaire, du ballon de stockage et des pompes, permettant ainsi d'analyser l'évolution des températures et d'étudier l'influence des différents paramètres sur les performances du système [27].

III.3 Présentation du modèle étudié

Le modèle étudié dans ce travail est un chauffe-eau solaire thermique domestique, conçu pour fournir l'eau chaude sanitaire d'un habitat isolé à Béchar tout au long de l'année. une région au climat désertique caractérisé par un fort ensoleillement et de grandes variations de température .

Le système solaire se compose de plusieurs parties, afin de simplifier le processus.

La figure ci-dessous présente un système de chauffage solaire d'eau chaude sanitaire avec un serpentin d'échangeur de chaleur dans un ballon de stockage.

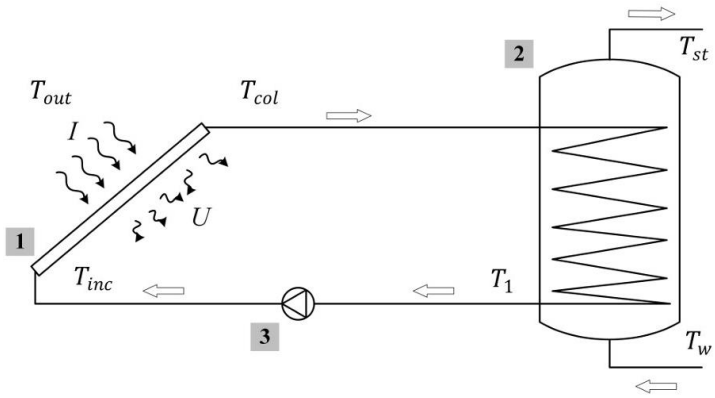

Figure 25: : Schéma d'un chauffe eau solaire domestique

III.4 Modélisation des composants du système

Une installation solaire thermique se compose généralement de plusieurs éléments , chacun ayant un rôle précis dans la production et la distribution d'eau chaude sanitaire (ECS) .

1. Capteur solaire :

Le capteur solaire constitue le composant principal du système. Il capte le rayonnement solaire et le transforme en énergie thermique.

Dans ce modèle, le capteur est un capteur plan vitré, adapté aux conditions climatiques de Béchar .

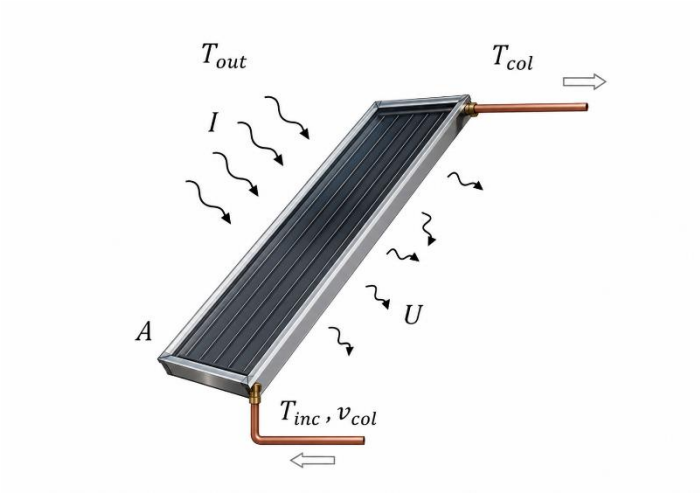

Figure 16 : schéma d'un capteur thermique

La modélisation du capteur plan vitré consistera principalement à étudier l'évolution de la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur en fonction du temps . En se basant sur l'énergie solaire absorbée par la plaque du capteur, les pertes de chaleur du capteur et la chaleur absorbée par le fluide , l'équation du bilan énergétique peut être donnée par [28] :

$$\frac{dT_{col}}{dt} = \frac{AI\eta}{C} - \frac{UA}{C}\left(T_{avg}(t) - T_{out}(t)\right) + \frac{v_{col}}{V_{col}}\left(T_1(t) - T_{col}(t)\right)$$

Tels que :

- $\boldsymbol{A}$: la surface du capteur .
- $\boldsymbol{I}$: l'irradiance solaire .
- $\boldsymbol{\eta}$: Le rendement du capteur .
- $\boldsymbol{U}$: Coefficient des pertes thermiques du capteur .
- $\boldsymbol{V_{col}}$: le volume du fluide dans le capteur .
- $\boldsymbol{v_{col}}$: le débit volumique du fluide caloporteur .

$\boldsymbol{C} = \rho_{col} \times c_{col} \times V_{col}$ est l'équation de calcul de la capacité thermique globale du fluide .

Où : ' $\boldsymbol{\rho_{col}}$ 'est la densité du fluide dans le collecteur et ' $\boldsymbol{c_{col}}$ ' est la capacité thermique massique du fluide .

- $\boldsymbol{T_{out}}$: la température ambiante .
- $\boldsymbol{T_1}$: la température du fluide à l'entrée du collecteur .
- $\boldsymbol{T_{avg}}$ est la température moyenne du fluide dans le collecteur , calculée par la relation :

$$T_{avg}(t) = \frac{T_1(t) + T_{col}(t)}{2}$$

2. Ballon de stockage :

Le ballon a pour fonction de conserver l'énergie thermique accumulée et de la restituer lorsqu'il y a une demande en eau.

Cette section présente le modèle mathématique du réservoir de stockage thermique utilisé dans le système. Le réservoir est constitué d'une cuve d'eau chaude équipée d'un échangeur de chaleur interne de type serpentin .

Le comportement thermique du réservoir est représenté par une fonction reliant la température de stockage aux principales variables de fonctionnement : $T_{st} = f\,(T_w\,,\, v_{col}\,,\, v_{st}\,,\, T_{col})$

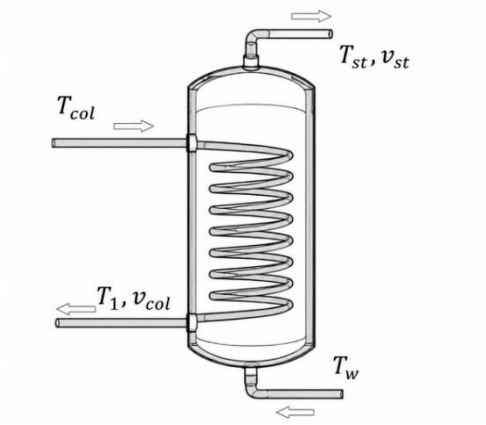

Figure 27 : schéma d'un ballon de stockage

En se basant sur l'équation du bilan énergétique du réservoir de stockage, l'équation peut être donnée par [29] :

$$\frac{dT_{st}}{dt} = \frac{v_{st}}{V_{st}}\left(T_w - T_{st}(t)\right) + \frac{v_{col}}{V_{st}}\left(T_{col}(t) - T_1(t)\right)$$

où

- V_{st} : Volume du ballon de stockage .
- T_w : la température de l'eau froide à l'entrée du réservoir .
- v_{st} : le débit volumique de l'eau chaude soutirée pour la consommation.

Après son passage dans le serpentin de l'échangeur de chaleur, le fluide caloporteur subit un échange thermique, ce qui entraîne une variation de sa température. La température du fluide en sortie de l'échangeur, notée $\mathbf{T_1}$, est calculée à partir de l'équation suivante [30] :

$$T1(t) = \left(T_{col}(t) - T_{st}(t)\right) e^{-\frac{U_{exc} \times A_{exc}}{v_{col} \times \rho_{col} \times c_{col}}} + T_{st}(t)$$

Tels que :

- U_{exc} : Coefficient de transfert thermique de l'échangeur de chaleur .
- A_{exc} : Surface du serpentin d'échangeur .

3. **Pompe de circulation** :

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du système de chauffe-eau solaire, il est nécessaire de contrôler les pompes des deux circuits : le circuit primaire du capteur solaire et le circuit de stockage.

Leur fonctionnement est entièrement automatisé et dépend des températures atteintes au niveau du capteur et du ballon de stockage.

La pompe du circuit primaire est activée lorsque la température du fluide à la sortie du capteur dépasse **40 °C** et reste inférieure ou égale à **90 °C**.

Dans cette plage de fonctionnement, le débit volumique est fixé à $\mathbf{2.9\times10^{-5}\ m^3/s}$. En dessous de **40 °C**, la pompe est arrêtée afin d'éviter un transfert de chaleur inefficace.

Cette condition s'écrit :

$$v_{col} = \begin{cases} \mathbf{2.9 \times 10^{-5}}\ \ m^3/s & ,\ \mathbf{40 < T_{col} \leq 90} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T_{col} \leq 40} \end{cases}$$

III.4.1 Implémentation du modèle sous MATLAB/Simulink

La simulation des différents composants du système est réalisée à l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink. À partir des modèles mathématiques établis précédemment, chaque composant du chauffe-eau solaire est implémenté individuellement sous Simulink, à savoir le capteur solaire, l'échangeur thermique, le ballon de stockage et le système de commande des pompes. Les schémas fonctionnels correspondants sont présentés dans les sections suivantes afin d'illustrer l'implémentation de chaque modèle. Une fois ces différents sous-modèles développés et validés, ils sont assemblés pour constituer le modèle global de simulation du système, qui sera présenté par la suite. [31]

a. Capteur solaire :

Le modèle Simulink du capteur solaire est développé à partir du modèle mathématique présenté dans la section précédente. Le schéma-blocs correspondant est illustré à la **figure 28**. Ce modèle permet de simuler le comportement dynamique du capteur et de déterminer la température du fluide à sa sortie. Les principaux paramètres d'entrée nécessaires à la simulation du capteur sont présentés ci-après .

Tableau 3 : Paramètres du Collecteur

Paramètre	Valeur	nomenclature	unité
I	0-1000	Irradiance solaire	W/m^2
A	2	Surface du capteur	m^2
η	0.7	Rendement optique du capteur	-
U	7	Coefficient des pertes thermiques du capteur	$W/(m^2 . °C)$
v_{col}	2.9×10^{-5}	Débit du fluide au collecteur	m^3/s
V_{col}	0.01	Volume du fluide au collecteur	m^3
c_{col}	3690	la capacité thermique massique du fluide	J/(kg.K)
ρ_{col}	1097	la densité du fluide dans le collecteur	kg/m^3

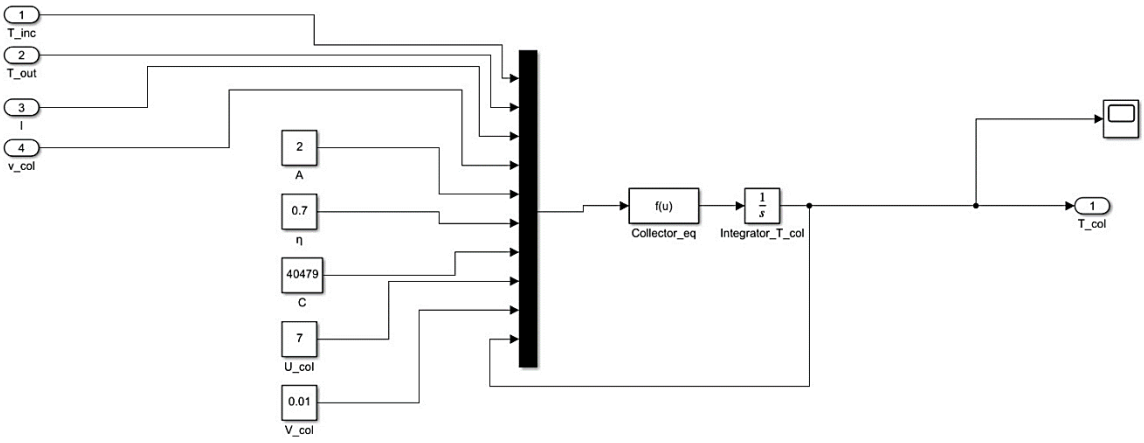

Figure 28 : Schéma fonctionnel du modèle de collecteur.

Le coefficient de perte thermique du capteur ***U*** est calculé par l'équation de l'article [32] .
Le coefficient optique du capteur solaire $\boldsymbol{\eta}$ est déterminé en utilisant l'expression mathématique proposée dans les références [32] et [33] .

$$\eta = \frac{v_{col} \times \rho_{col} \times c_{col}(T_{col} - T_1)}{IA}$$

b. Ballon de stockage :

Le modèle Simulink du ballon de stockage est élaboré à partir du modèle mathématique présenté précédemment. Le schéma-blocs correspondant est présenté à la **figure 29**.
Ce modèle permet de reproduire le comportement thermique du ballon et d'évaluer, par simulation, l'évolution de la température du fluide stocké.

Pour les simulations réalisées, un ballon de stockage d'une capacité de 100 litres (**0,1 m³)** a été retenu . Dans ce modèle, les pertes thermiques du réservoir vers l'environnement sont supposées négligeables. Cette hypothèse est justifiée par le fait que le ballon est installé à l'intérieur d'un bâtiment, où les échanges de chaleur avec le milieu ambiant restent limités.

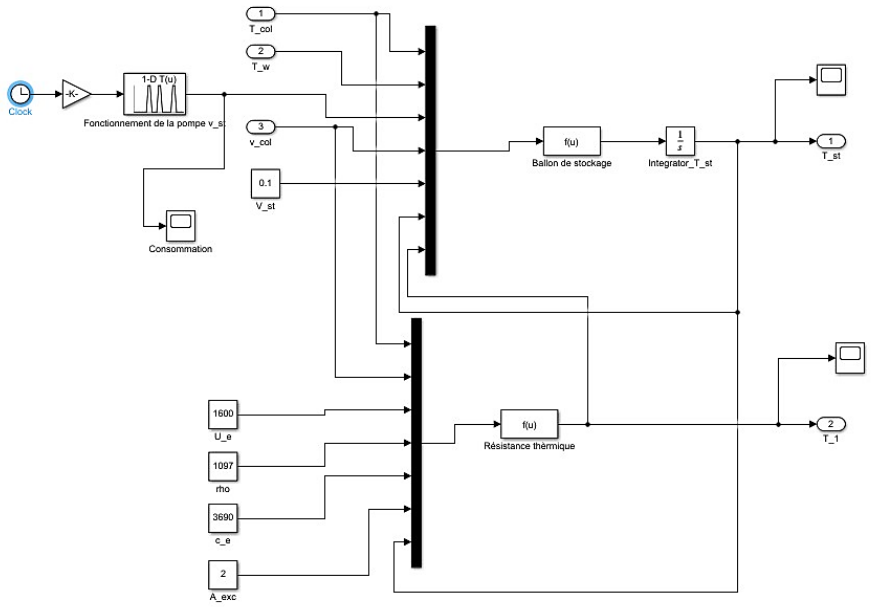

Figure 29 : Schéma fonctionnel du modèle de Ballon

Tableau 4 : Paramètres du ballon

Paramètre	Valeur	nomenclature	unité
U_{exc}	1600	Coefficient de transfert thermique de l'échangeur de chaleur Surface du capteur	W/(m^2 . °C)
A_{exc}	2	Surface du serpentin d'échangeur	m^2
v_{st}	5.9×10^{-5}	débit volumique d'eau chaude extraite	m^3/s
V_{st}	0.1	Volume du ballon	m^3

c. Pompe de circulation du fluide :

À partir de la stratégie de commande définie précédemment, un modèle de la pompe a été développé sous Simulink qui permet de reproduire le fonctionnement automatique de la pompe en fonction de la température du fluide circulant dans le capteur solaire.

Lorsque la température atteint le seuil de déclenchement, la pompe est activée afin d'assurer la circulation du fluide caloporteur vers le ballon de stockage ; dans le cas contraire, elle reste à l'arrêt. La (***figure 30)*** présente le schéma du modèle de la pompe implémenté dans Simulink.

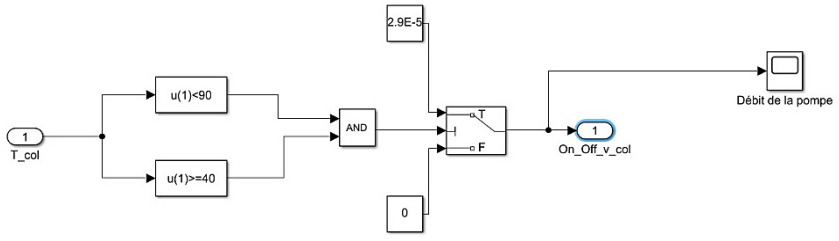

Figure 30 : Schéma fonctionnel du modèle de la pompe C

Après la modélisation des différents composants du système, notamment le capteur solaire, le ballon de stockage et la pompe de circulation, ces sous-système ont été intégrés dans un modèle global développé sous Simulink. Cette intégration permet de représenter le fonctionnement complet du système de chauffe-eau solaire ainsi que les interactions entre ses différents éléments.

Le modèle obtenu constitue un outil de simulation permettant d'analyser l'évolution des principales variables du système, telles que les températures du capteur et du ballon, le fonctionnement de la pompe et le transfert de chaleur au cours d'une journée de fonctionnement. La (***figure 31***) présente le schéma global du modèle Simulink développé .

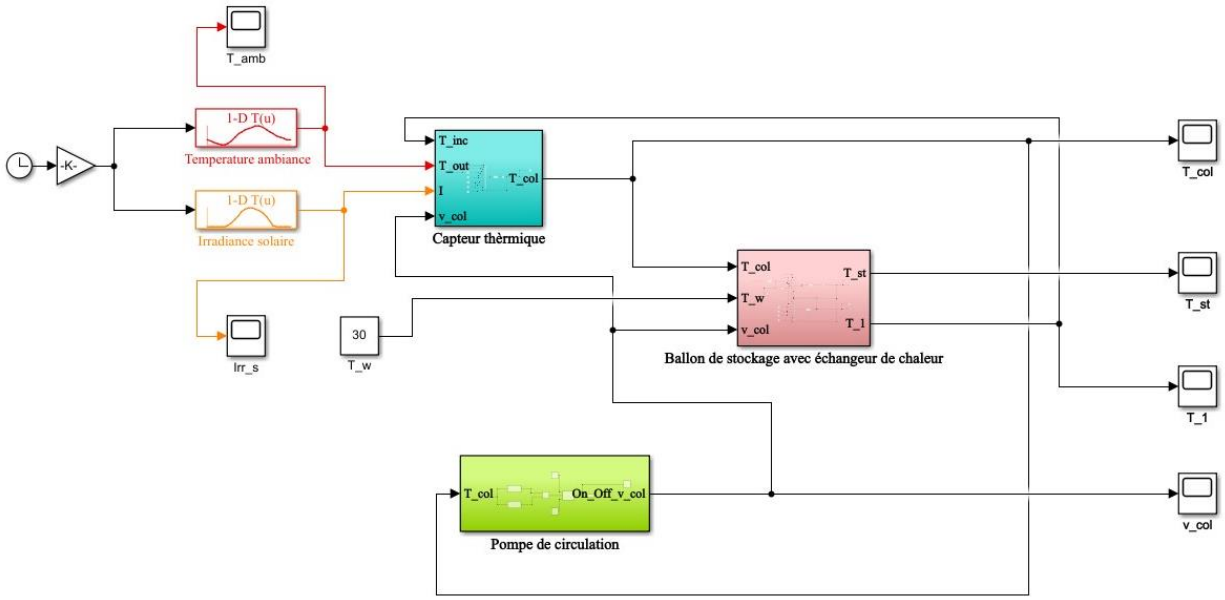

Figure 31 : Schéma bloc d'un système de chauffage solaire d'ECS

III.5 Résultats de la simulation et interprétations

Après la simulation dans MATLAB/Simulink on a permis d'obtenir plusieurs graphiques illustrant le comportement du système, lesquels seront analysés et interprétés dans ce qui suit.

III.5.1 Les données météorologiques

a) La température extérieure :

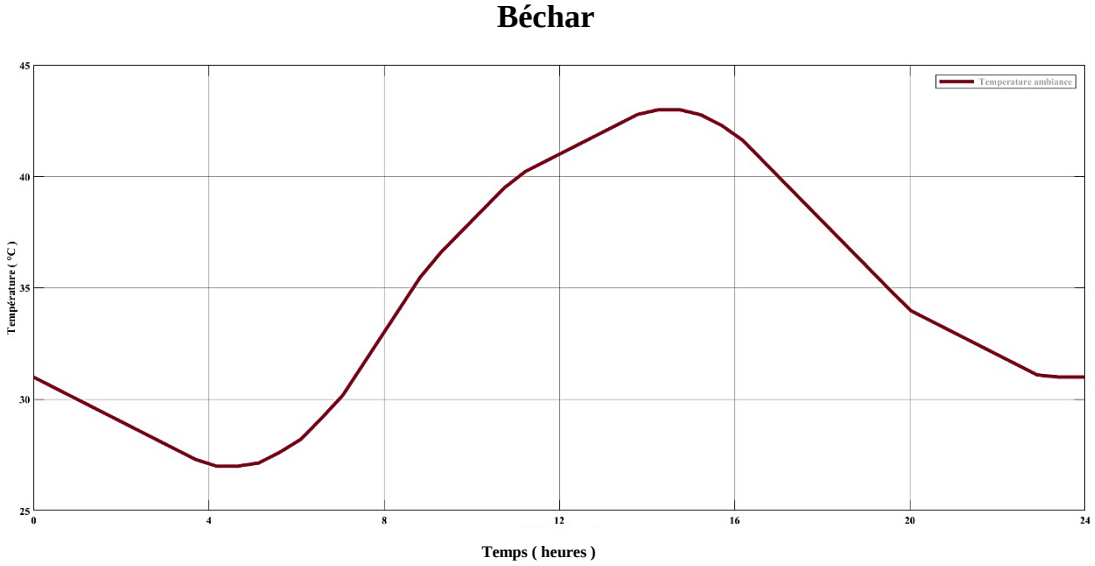

Figure 32 : : L'évolution de la température extérieure dans une journée

La figure ci-dessus (***Figure 32***) illustre la variation de la température ambiante dans une journée (**24h**) dans le mois du aout dans une zone isolée à Béchar , On constate que celle-ci atteint une valeur minimale d'environ **27 °C** dans dans la nuit_alors qu'elle augmente progressivement pour atteindre un maximum d'environ **43 °C** pendant la journée [34].

b) Le rayonnement globale Horizontal (GHI) :

Comme le montre la figure ci-dessous, l'irradiance solaire présente une évolution de forme sinusoïdale au cours de la journée. Elle augmente progressivement à partir du lever du soleil, atteint sa valeur maximale aux environs de midi solaire, lorsque le rayonnement incident est le plus intense, puis diminue progressivement jusqu'au coucher du soleil [35].

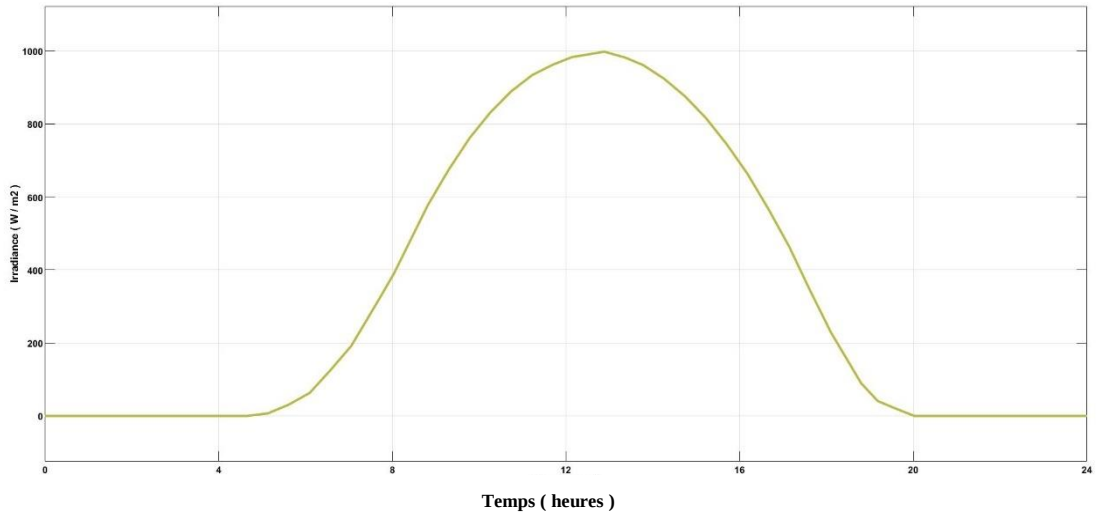

Figure 33 : La variation journalière de rayonnement global horizontal

III.5.2 Consommation ECS

La figure -**34-** présente le fonctionnement de la pompe du ballon en fonction de la demande en eau chaude sanitaire. La pompe est commandée selon un profil de consommation journalier, avec tois périodes principales d'utilisation correspondant aux habitudes domestiques . En dehors de ces plages horaires, la pompe reste à l'arrêt afin de limiter les pertes thermiques et de réduire la consommation d'énergie. Cette stratégie de commande permet de reproduire un fonctionnement plus réaliste du système de chauffe-eau solaire .

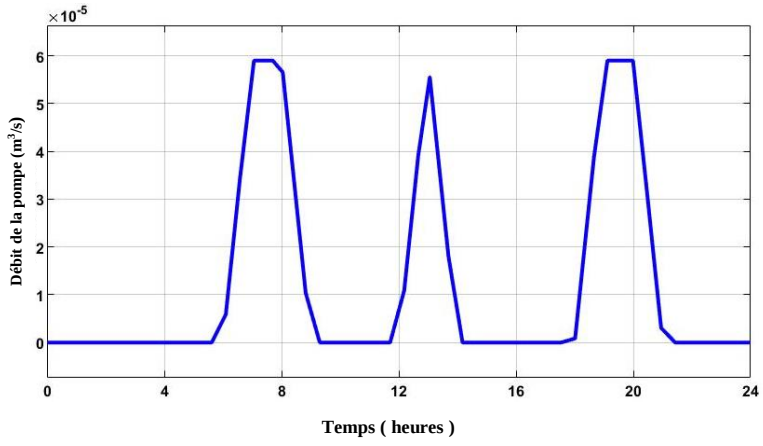

Figure 34 : fonctionnement de la pompe de réservoir (consommation ECS)

La pompe de distribution d'eau chaude sanitaire est commandée en mode **ON/OFF** selon les périodes de consommation. Les besoins journaliers en eau chaude sanitaire, déterminés lors du dimensionnement, sont de **160 L/jour** .

Lorsqu'elle est en fonctionnement, elle délivre un débit de **$5{,}9 \times 10^{-5}$ m³/s**, soit **212,4 L/h**.

Ce débit permet de satisfaire la demande quotidienne en un temps de fonctionnement inférieur à une heure, réparti sur les différentes périodes de consommation.

Si on veut calculer le temps nécessaire pour satisfaire les besoins dans la journée ,

on peut écrire :

$$\boldsymbol{t} = \frac{B_{ecs}}{Q_{pompe}} = \frac{160\ l/h}{212\ l/h} = 0.753\ h \approx \boldsymbol{45min}$$

III.5.3 Température de l'eau chaude sanitaire (ECS) fournie

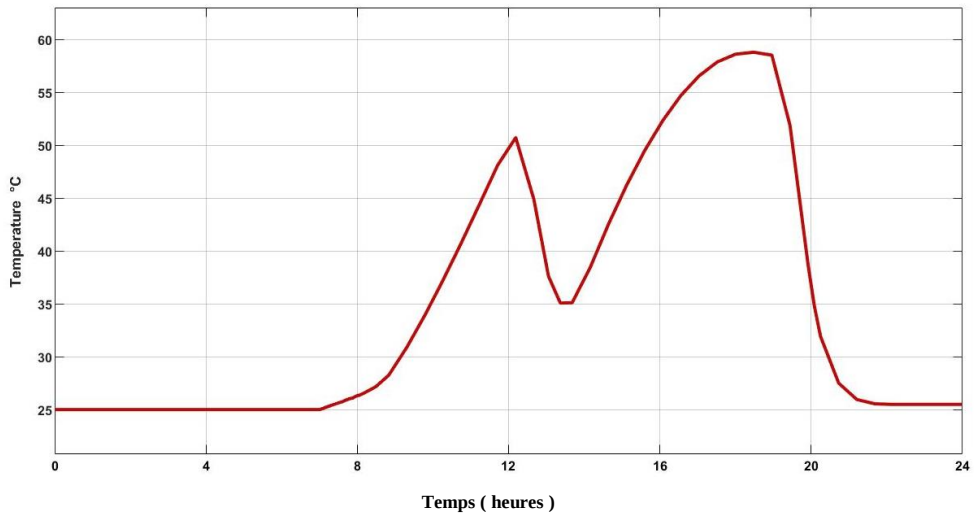

Figure 35 : Température de l'ECS dans le ballon

- La ***figure - 35 -*** présente l'évolution de la température de l'eau dans le ballon de stockage sur une période de 24 heures. La température initiale de l'eau froide a été fixée à **25 °C**.
- Durant les premières heures de la journée, la température reste pratiquement constante en raison de l'absence d'irradiation solaire. À partir de 8 h, elle augmente progressivement grâce à l'énergie thermique fournie par le capteur solaire, jusqu'à atteindre une valeur maximale d'environ **59 °C** en fin d'après-midi.

- Les baisses observées vers midi et en soirée correspondent aux périodes de soutirage d'eau chaude sanitaire, durant lesquelles l'eau chaude est remplacée par de l'eau froide à 25 °C, ce qui entraîne une diminution temporaire de la température du ballon .

III.5.3 Fonctionnement de la pompe de circulation du collecteur

La pompe est commandée en mode ON/OFF en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire (***figure 36***) . Durant la nuit et les premières heures de la matinée, la pompe reste à l'arrêt (débit nul) en raison de la faible irradiation. À partir d'environ 7 h, elle se met en marche avec un débit constant de **$2{,}9 \times 10^{-5}$ m³/s**, assurant la circulation du fluide caloporteur entre le collecteur et le ballon de stockage. Elle fonctionne pendant toute la période d'ensoleillement afin de transférer la chaleur récupérée par le capteur, puis s'arrête vers 20 h lorsque l'irradiation devient insuffisante.

Les brèves commutations observées au démarrage sont dues à la logique de commande ON/OFF de la pompe .

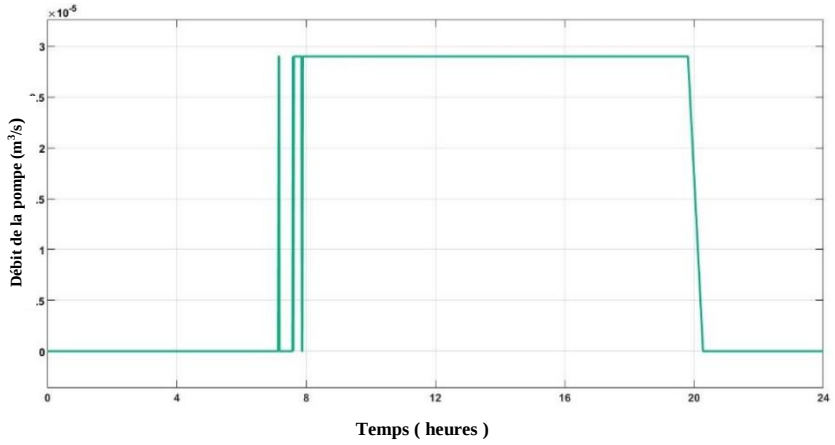

Figure 36: : fonctionnement de la pompe du collecteur

III.5.4 Comparaison de la température à l'entrée et à la sortie du collecteur

La figure **-37-** présente l'évolution des températures du fluide à l'entrée **T_1** et à la sortie **T_col** du collecteur solaire au cours d'une journée. Les deux températures suivent la même tendance, avec une augmentation progressive à partir du lever du soleil sous l'effet de l'irradiation solaire, puis une diminution en fin de journée.

La température de sortie du collecteur reste constamment supérieure à celle d'entrée, ce qui confirme le transfert de chaleur du collecteur vers le fluide caloporteur. L'écart de température est plus important pendant les périodes de forte irradiation, traduisant une meilleure efficacité du collecteur solaire .

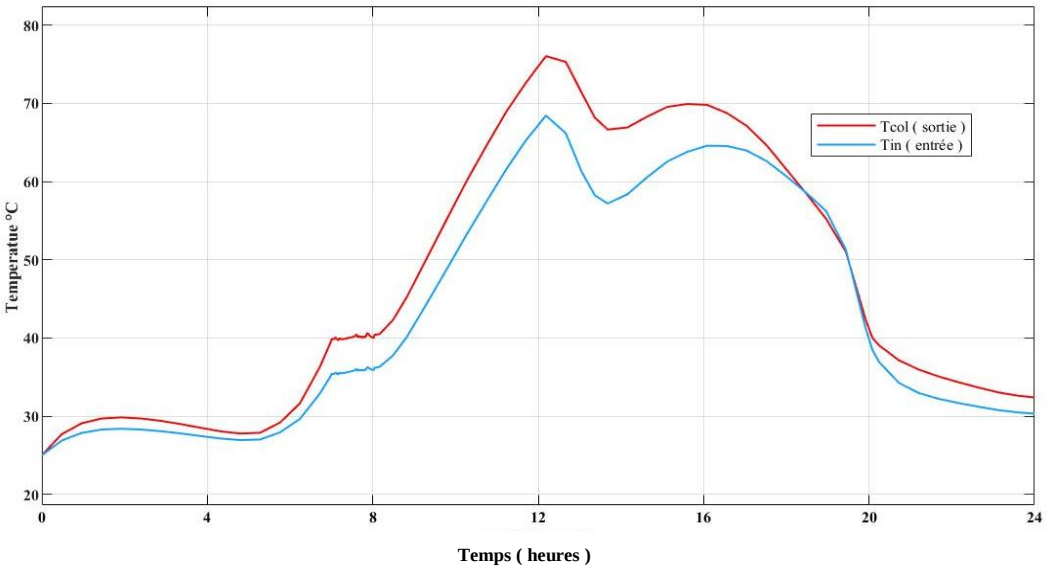

Figure 37 : Évolution des températures d'entrée et de sortie du collecteur

III.6 Étude de l'effet des paramètres de fonctionnement sur les performances du chauffe-eau solaire

III.6.1 Influence des conditions climatiques saisonnières

a. Influence de la température :

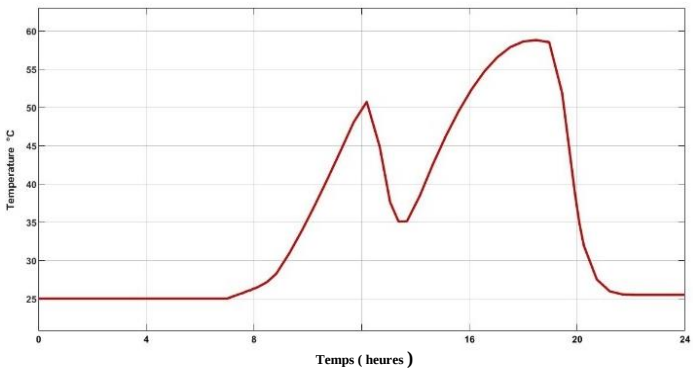

Figure 38 :Température de l'ECS dans la saison estivale

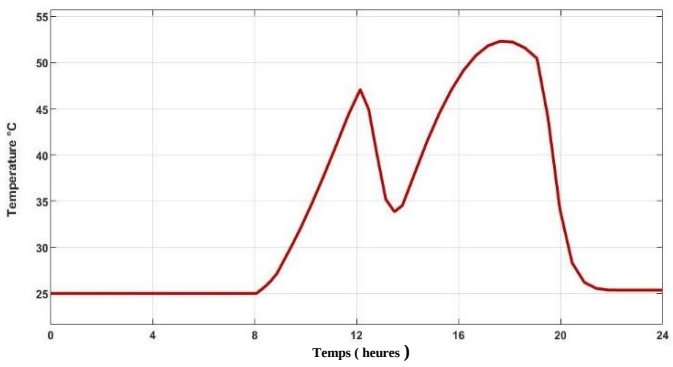

Figure 39 : Température de l'ECS dans la saison hivernale

b. Influence du rayonnement solaire :

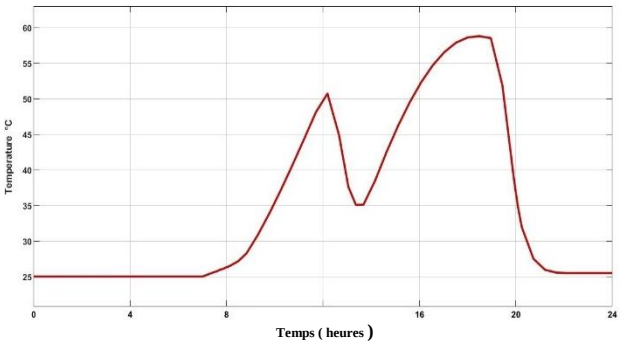

Figure 40 : Température de l'ECS dans la saison estivale

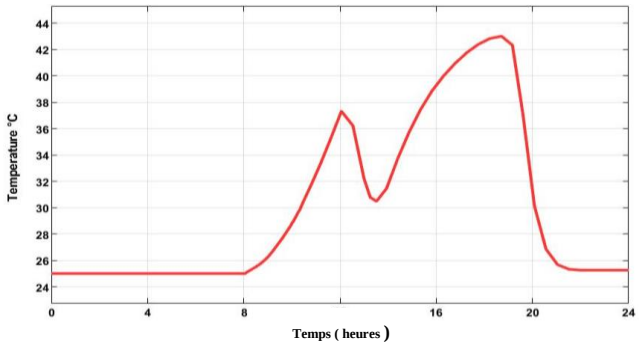

Figure 41 : Température de l'ECS dans la saison hivernale

Interprétation :

- Les résultats montrent que l'augmentation de la température ambiante favorise l'élévation de la température de l'eau dans le ballon de stockage. En été, le ballon atteint des températures plus élevées (***figure 38***) qu'en hiver grâce à des pertes thermiques plus faibles et à des conditions climatiques plus favorables . (***figure 39***)
- Les figures (***40 - 41***) illustrent l'influence du rayonnement solaire sur la température de l'eau chaude sanitaire. En été, l'irradiation plus importante permet d'atteindre une température maximale d'environ **59 °C**, tandis qu'en hiver, la température maximale est limitée à environ **43 °C** en raison d'un rayonnement solaire plus faible.
- Ces résultats mettent en évidence l'impact direct du rayonnement solaire sur les performances du chauffe-eau solaire.

III.6.2 Influence de la consommation d'eau chaude sanitaire (soutirage) sur la température de l'eau chaude sanitaire

Une consommation importante entraîne l'entrée d'eau froide, Le mélange avec l'eau chaude déjà stockée provoque une diminution de la température moyenne de l'eau dans le ballon. ce qui fait diminuer sa température .

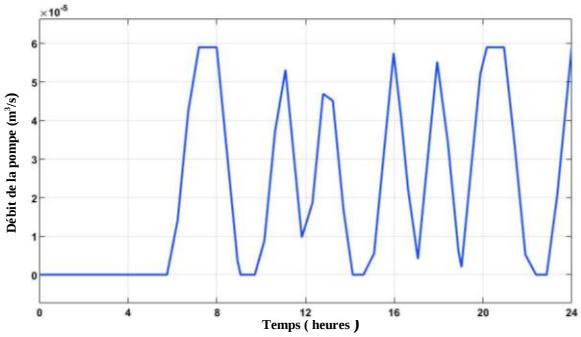

Figure 42 : consommation d'ECS dans la journée

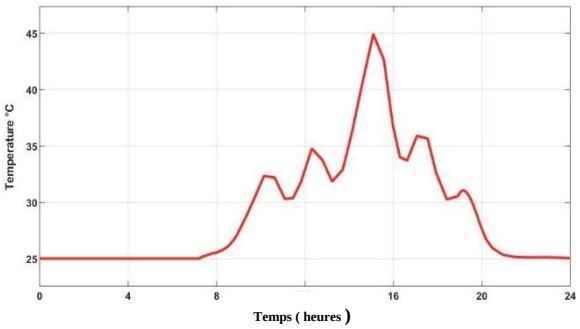

Figure 43 : Température de l'ECS dans le ballon

Interprétation :

- La **figure-43** montre que l'augmentation de la consommation d'eau chaude sanitaire entraîne une diminution de la température de l'eau dans le ballon de stockage.
- Les soutirages successifs provoquent l'entrée d'eau froide dans le ballon, ce qui se traduit par plusieurs chutes de température au cours de la journée. Malgré le réchauffement assuré par le collecteur solaire, la température maximale n'atteint qu'environ **45 °C**, soit une valeur inférieure à celle obtenue avec une faible consommation.
- Ces résultats montrent qu'une consommation importante réduit la capacité du système à maintenir une température élevée dans le ballon de stockage.

III.6.3 Les paramètres influant sur la performance du capteur solaire

➢ L'inclinaison du collecteur

Les capteurs solaires doivent recevoir le plus de soleil possible pour obtenir un rendement maximal. Le degré d'inclinaison idéal est **de 30 degrés** vers le sud . Sur un toit en pente [36].

➢ Orientation des capteurs solaires

Il est recommandé d'installer les capteurs solaires **vers le sud**. Lorsqu'ils sont installés vers l'est, le nord ou l'ouest, le rendement du chauffe-eau peut chuter de **20 %**. Pour augmenter le rendement, vous devez aussi éviter qu'il n'y ait aucune ombre provenant d'un arbre ou d'un bâtiment sur les capteurs.

➢ Isolation de l'habitation

L'installation d'un chauffe-eau solaire présente un intérêt limité si l'habitation n'est pas correctement isolée. En effet, lorsque le système est associé au système de chauffage de l'habitation, une mauvaise isolation peut entraîner des pertes thermiques importantes. Une isolation efficace permet de limiter les déperditions de chaleur vers l'extérieur, d'améliorer le confort thermique à l'intérieur du logement et de réduire la consommation énergétique globale [36].

➢ Les paramètres de construction

Parmi lesquels nous citons :

L'absorbeur reçoit :

Une puissance rayonnée par le soleil, transmise par la vitre et absorbée par l'absorbeur P_{ab}, donnée par l'équation suivante :

$$Pab = \alpha ab \times \tau v \times G \times Aab$$

Où :

- α_{ab} : absorptivité de l'absorbeur.
- τ_v : transmissivité de la vitre.
- A_{ab} : surface de l'absorbeur.

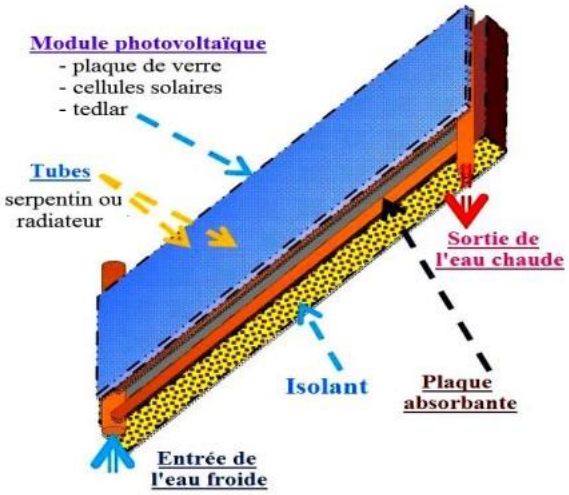

Figure 44 : module photovoltaïque

L'isolant cède :

Une quantité d'énergie par rayonnement $qris$ au sol :

$$qris = hris \times Ai \times (Tie - Ts)$$

Une quantité d'énergie par convection $qcia$ au milieu ambiant :

$$qcia = hcia \times Ai \times (Tie - Ta)$$

III.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a été consacré à la modélisation mathématique des différents composants du système de chauffe-eau solaire, notamment le capteur solaire, le ballon de stockage, l'échangeur de chaleur et la pompe de circulation. Les équations gouvernant le comportement thermique de chaque composant ont été établies puis implémentées sous l'environnement MATLAB/Simulink afin de développer un modèle global du système.

Les simulations réalisées permettent de reproduire son comportement dynamique sous différentes conditions climatiques et de fonctionnement.

Ce modèle constitue ainsi un outil d'analyse permettant d'évaluer les performances thermiques du système et d'étudier l'influence des différents paramètres sur son fonctionnement.

CHAPITRE IV : Optimisation et Étude technico-économique d’un type de chauffe-eau solaire

IV.1 Introduction

Après avoir développé le modèle mathématique du chauffe-eau solaire et validé son fonctionnement par simulation sous MATLAB/Simulink, il est nécessaire d'étudier l'influence des principaux paramètres du système sur ses performances. En effet, les caractéristiques des différents composants ainsi que les conditions de fonctionnement jouent un rôle déterminant dans la quantité d'énergie thermique récupérée, la température de l'eau stockée et le recours à l'énergie électrique d'appoint.

L'optimisation d'un chauffe-eau solaire consiste à identifier les valeurs des paramètres permettant d'améliorer les performances thermiques du système tout en réduisant la consommation d'énergie électrique. Cette démarche vise à exploiter au mieux l'énergie solaire disponible afin d'assurer une production d'eau chaude répondant aux besoins des utilisateurs avec un rendement élevé .

IV.2 Optimisation du système étudié

IV.2.1 Intégration de l'appoint électrique

Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire dépend directement de la disponibilité du rayonnement solaire. En période de faible ensoleillement, pendant les journées nuageuses ou durant les heures nocturnes, l'énergie captée par le collecteur devient insuffisante pour assurer le chauffage de l'eau jusqu'à la température souhaitée.

Cette situation peut entraîner une baisse de la température de l'eau stockée et ne plus satisfaire les besoins des utilisateurs [37].

Afin d'assurer la continuité de la production d'eau chaude sanitaire, un système d'appoint électrique est intégré au modèle développé sous MATLAB/Simulink.

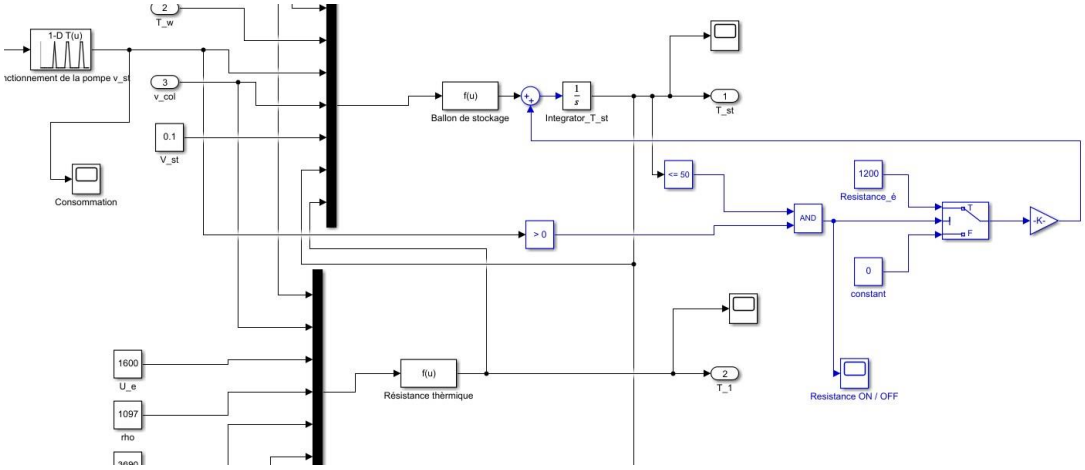

Figure 45: Schéma fonctionnelle de la résistance électrique

L'appoint est représenté par une résistance électrique de puissance ($\boldsymbol{P_{res}}$), commandée en fonction de la température de l'eau dans le ballon. Lorsque la température du ballon ($\boldsymbol{T_{st}}$) est inférieure à la température de consigne ($\mathbf{T_{set}}$ **= 50 °C**), la résistance est activée et délivre une puissance thermique constante. Si non la résistance est désactivée afin d'éviter une consommation électrique inutile.

La logique de commande peut être exprimée par la relation suivante :

$$P_{app} = \begin{cases} \boldsymbol{P_{res}} & \boldsymbol{T_{st} < T_{set}} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{T_{st} \geq T_{set}} \end{cases}$$

L'énergie thermique fournie par la résistance est alors introduite dans le bilan énergétique du ballon sous la forme d'un terme de génération de chaleur.

On peut le comprendre à partir du bilan énergétique :

$$P = m\, C_p \frac{dT}{dt}$$

avec

- **P** : puissance thermique (W).
- **m**= ρ V_{st} : masse d'eau dans le ballon (kg).

D'où

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{\rho C_p V_{st}}$$

Ce terme représente la contribution de la résistance électrique à l'élévation de la température de l'eau dans le ballon .

Donc l'équation de la dynamique thermique du ballon devient :

$$\frac{dT_{st}}{dt} = \frac{v_{st}}{V_{st}}\left(T_w - T_{st}(t)\right) + \frac{v_{col}}{V_{st}}\left(T_{col}(t) - T_1(t)\right) + \frac{P}{\rho C_p V_{st}}$$

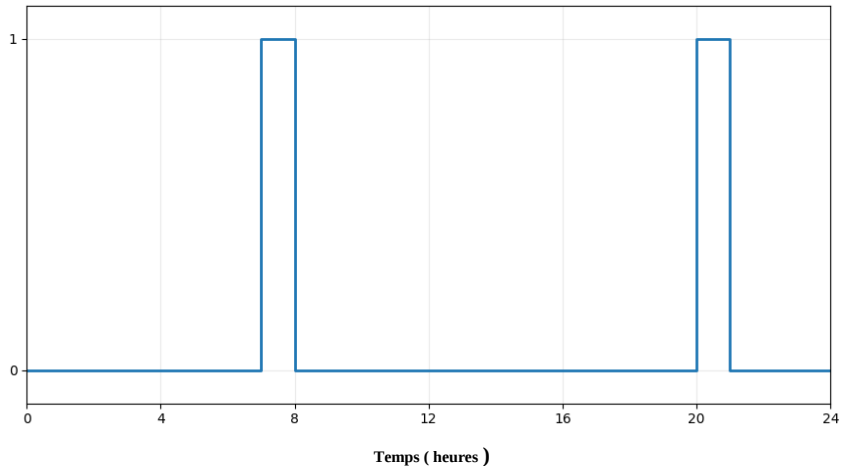

Figure 46: fonctionnement de la résistance électrique

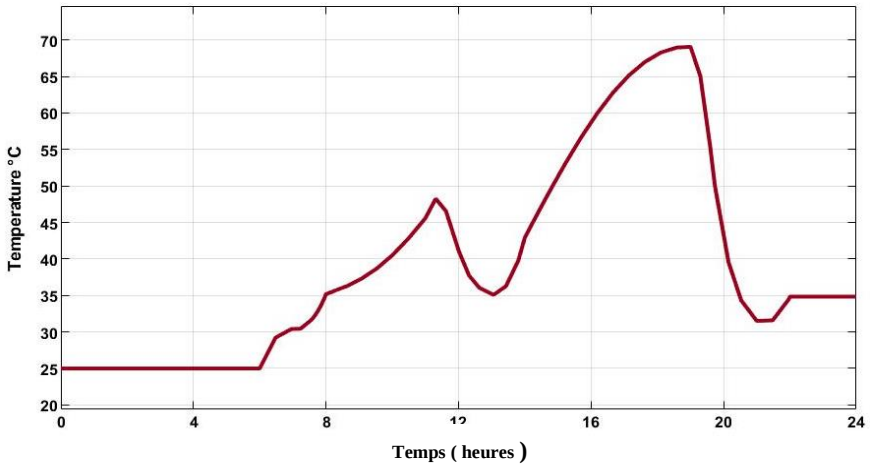

Figure 47: Température de l'ECS dans le ballon équipé d'une résistance é

La Figure **-47-** montre que la résistance électrique reste désactivée durant les périodes où l'énergie solaire est suffisante pour assurer le chauffage de l'eau. En revanche, elle s'active aux périodes de faible ou de nulle irradiation solaire (7h du matin) . Son intervention permet de maintenir la température du ballon à un niveau satisfaisant **(69 °C)** et de garantir la disponibilité de l'eau chaude malgré l'absence d'apport solaire.

Ces résultats montrent que l'appoint électrique ne fonctionne qu'en cas de besoin, limitant ainsi la consommation d'énergie tout en assurant la continuité du service

IV.2.2 Optimisation des paramètres de système

Cette étude consiste à analyser l'influence des principaux paramètres de conception et de fonctionnement (surface , volume , rendement du capteur …) sur le comportement thermique du système. Pour chaque paramètre, plusieurs simulations sont effectuées en faisant varier uniquement le paramètre étudié, tandis que les autres paramètres sont maintenus constants. Les performances sont ensuite évaluées à partir de l'évolution de la température du ballon et du capteur afin de déterminer la configuration la plus performante.

Le tableau suivant présente les résultats de la température du ballon obtenus pour les différentes valeurs des paramètres étudiés.

Tableau 5 : Influence des paramètres du système sur les températures Tst , Tcol

Paramètre	**Valeur**	**$Tcol_{max}$**	**Tst_{max}**
La surface du capteur (m^2)	1.5	**67 °C**	**57°C**
	2	**75°C**	**59°C**
	2.5	**81°C**	**66°C**
Le volume du ballon (L)	80	**75°C**	**62°C**
	100	**75°C**	**59°C**
	150	**76°C**	**55°C**
Le rendement du capteur	0.6	**69°C**	**54°C**
	0.7	**75°C**	**59°C**
	0.8	**81°C**	**66°C**
Puissance de la résistance (W)	800	**78°C**	**67°C**
	1000	**80°C**	**69°C**
	1200	**82°C**	**70°C**

Interprétation :

Les résultats montrent que les paramètres étudiés influencent directement les performances thermiques du chauffe-eau solaire.

- L'augmentation de la surface du capteur et du rendement optique améliore la quantité d'énergie solaire captée,
- Un volume de ballon plus faible favorise une élévation plus rapide de la température de l'eau.
- L'augmentation de la puissance de la résistance électrique permet d'assurer un appoint plus efficace lorsque l'énergie solaire est insuffisante.

Au regard des résultats obtenus, la configuration optimale correspond à une surface de capteur de **2,5 m²**, un ballon de **80 L**, un rendement du capteur de **0,8** et une résistance électrique de **1200 W,** offrant une température maximale du ballon de **70 °C** tout en garantissant les meilleures performances thermiques du système .

IV.2.3 Validation de la configuration optimale

À partir des résultats de l'étude paramétrique, les valeurs offrant les meilleures performances thermiques ont été retenues afin de constituer la configuration optimale du chauffe-eau solaire. Une simulation finale est ensuite réalisée en appliquant simultanément ces paramètres pour évaluer le comportement global du système et confirmer l'efficacité de la configuration proposée.

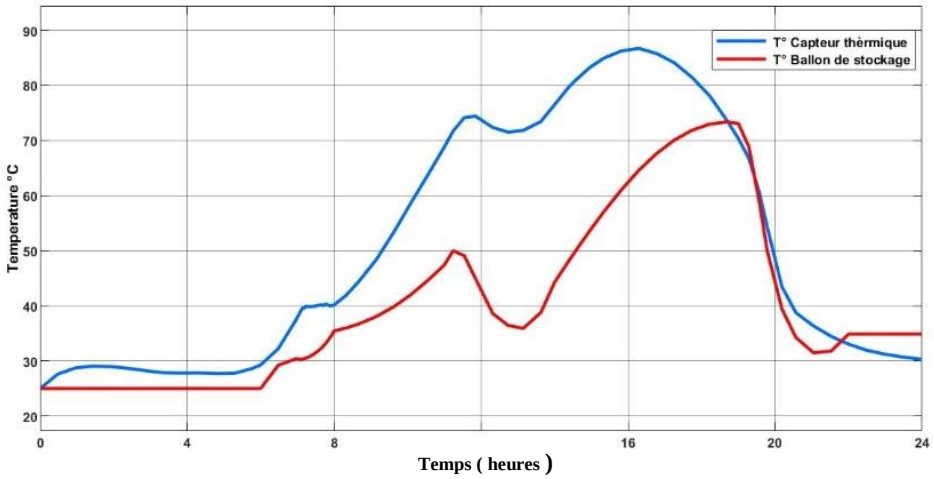

Figure 48: Evolution de la température Tst ,Tcol

IV.3 Etude économique

IV.3.1 Introduction

Selon les statistiques annoncées par le ministère de l'Énergie et des Mines en Algérie, les secteurs résidentiel et des services représentent 40 % de la consommation totale d'énergie du pays, dont une grande partie est consacrée au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude sanitaire. Par conséquent, l'utilisation de chauffe-eau solaires (CES) pour couvrir une grande partie de cette demande énergétique apparaît nécessaire, en cohérence avec le développement socio-économique et l'amélioration continue du niveau de vie [38] .

Des applications telles que le chauffage des locaux et de l'eau ne sont pas encore bien développées en Algérie, et il est évident que l'utilisation de logiciels de gestion de l'énergie constitue une excellente solution pour améliorer la gestion des systèmes basés sur le développement énergétique.

L'objectif principal de ces recherches est de mettre en parallèle leurs performances et leur rentabilité avec celles des systèmes de chauffage traditionnels, tant pour les usages domestiques qu'industriels.

Plusieurs facteurs expliquent les variations constatées dans les évaluations de la rentabilité commerciale de ces systèmes. Parmi eux figurent la disponibilité et le coût des matériaux, les politiques énergétiques et les incitations existantes, et surtout, le niveau spécifique d'irradiation solaire annuel propre à chaque région [39].

IV.3.2 Estimation du coût d'investissement

Le coût total d'investissement d'un système solaire thermique correspond à l'ensemble des dépenses engagées pour l'acquisition, l'installation et la mise en service de tous les composants du dispositif. Selon Duffie & Beckman , l'évaluation du coût initial doit prendre en compte non seulement les équipements (capteurs, ballon, pompe) mais aussi les coûts indirects relatifs à la main-d'œuvre et à la logistique. Cette estimation constitue une étape essentielle pour toute analyse de rentabilité économique d'un système énergétique renouvelable [6].

La répartition des coûts, ou allocations, consiste à ventiler le coût global entre les différents composants et phases d'un projet. Comme l'indiquent Zhang (2017***)***, une analyse détaillée des allocations permet d'identifier les composants à fort impact financier, ce qui facilite la prise de décision pour des options d'optimisation budgétaire [40].

Tableau 6 : Coût total du système

Composant	Prix unitaire (DA)
Capteur solaire	**55 000**
Ballon de stockage	**22 000**
Pompe électrique	**10 000**
Résistance électrique	**3 500**
Régulateur	**9 000**
Tuyauterie	**10 000**
Structure de support	**8 000**
Accessoires (Soupape ,clapet, purgeur, fluide ….)	**13 500**
Installation	**15 000**
Coût total	**146 000**

Les coûts des différents composants ont été estimés à partir des prix pratiqués sur le marché algérien en 2026. Les valeurs retenues correspondent à des prix moyens observés chez des fournisseurs et revendeurs locaux. Elles sont utilisées afin d'évaluer le coût global d'investissement du système étudié [41] .

Un chauffe-eau solaire complet de 100 à 200 L est proposé en Algérie autour de **120 000 à 200 000 DA** selon la capacité, la technologie et les accessoires [41].

Coût annuel de fonctionnement :

La consommation annuelle de la résistance est calculée à partir de la relation suivante :

$$E_{ann} = P_{res} \times t_{ann}$$

- E_{ann} : énergie électrique consommée annuellement (kWh)
- P_{res} : puissance de la résistance (kW)
- t_{ann} : durée annuelle de fonctionnement de la résistance (h)

Le coût annuel de l'énergie électrique est ensuite déterminé par :

$$C_{ann} = E_{ann} \times T_{é}$$

$T_{é}$: tarif de l'électricité (DA/kWh)

Donc si :

- Puissance de la résistance **P = 1200 W**
- Fonctionnement moyen **t = 1h /jour**
- Tarif de l'électricité = **4,18 DA/kWh** (tarif domestique de base Sonelgaz)

$$E_{ann} = 1{,}2 \times 1 \times 365 = \mathbf{438\ kWh/an}$$

$$C_{ann} = 438 \times 4{,}18 = \mathbf{1830\ DA/\ an}$$

IV.3.3 Économie d'énergie réalisée

L'intégration du chauffe-eau solaire permet de réduire considérablement la consommation d'énergie électrique destinée à la production d'eau chaude sanitaire. Afin d'évaluer les performances énergétiques du système proposé, une comparaison est effectuée entre un chauffe-eau électrique classique et le chauffe-eau solaire équipé d'un appoint électrique. L'économie d'énergie correspond à la différence entre l'énergie électrique consommée par le système conventionnel et celle consommée par l'appoint électrique du système étudié.

L'économie annuelle d'énergie est déterminée par la relation suivante :

$$E_{éco} = E_{classique} - E_{ces}$$

où :

- **$E_{éco}$** : économie annuelle d'énergie (kWh/an)
- **$E_{classique}$** : consommation annuelle d'un chauffe-eau électrique classique (kWh/an)
- **E_{CES}** : consommation annuelle d'énergie électrique de l'appoint du chauffe-eau solaire (kWh/an)

Le taux d'économie d'énergie est calculé à partir de :

$$\eta = \frac{\boldsymbol{E_{éco}}}{\boldsymbol{E_{classique}}} \times 100$$

On a déjà calculé l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau **5,58 kWh/Jour .**

$$\boldsymbol{E_{classique}} = 5{,}58 \times 365 \approx \boldsymbol{2037\ kWh/an}$$

En remplaçant par les valeurs obtenues :

$$\boldsymbol{E_{éco}} = \boldsymbol{2037 - 438 = 1599\ kWh/an}$$

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{1599}{2037} \times 100 \approx \boldsymbol{78{,}5\%}$$

L'économie annuelle (DA) :

$$\boldsymbol{G_{ann}} = 1599 \times 4{,}18 \approx \boldsymbol{6683\ DA}$$

Les résultats montrent que le chauffe-eau solaire avec appoint électrique permet de réduire la consommation d'énergie électrique de **1599 kWh par an**, soit une économie de **78 %** par rapport à un chauffe-eau électrique classique .

Ces résultats confirment l'intérêt énergétique du système proposé et mettent en évidence son efficacité pour diminuer la consommation d'électricité tout en assurant la continuité de la production d'eau chaude sanitaire.

IV.3.4 Temps de retour sur investissement (TRI)

Le **(TRI)** est défini comme la durée nécessaire pour que les économies générées compensent le coût initial de l'investissement. Ce concept est largement adopté dans les analyses financières des projets d'énergie renouvelable [18].

Un TRI inférieur à la durée de vie du système est généralement considéré comme signe de rentabilité.

Le temps de retour sur investissement est ensuite calculé par :

$$TRI = \frac{C_{inv}}{G_{ann}}$$

où :

- **C_{inv}** : coût total d'investissement (DA) ;
- **G_{ann}** : gain économique annuel (DA/an).

$$TRI = \frac{146000}{6683} \approx \mathbf{21,85\ ans}$$

Les résultats indiquent un temps de retour sur investissement d'environ **22 ans**. Cette durée relativement élevée s'explique principalement par le faible coût de l'électricité en Algérie, qui réduit les économies financières réalisées malgré une importante réduction de la consommation énergétique. Néanmoins, le système présente un intérêt sur le plan énergétique et environnemental, puisqu'il permet de diminuer significativement la consommation d'électricité tout en assurant une production continue d'eau chaude sanitaire.

IV.3.5 Valeur Actuelle Nette (VAN)

La Valeur Actuelle Nette (VAN) est un indicateur financier permettant d'évaluer la rentabilité d'un investissement en actualisant les flux financiers futurs. Elle représente la différence entre la somme des gains actualisés générés par le système et le coût initial de l'investissement.

La VAN est calculée par la relation suivante :

$$VAN = \sum_{t=1}^{N} \frac{G_{ann}}{(1+i)^t} - C_{inv}$$

où :

- ***i*** : taux d'actualisation = **8 %**
- ***N*** : durée de vie du système (années) = **20 ans**

$$VAN = \sum_{t=1}^{20} \frac{6683}{(1+0.08)^t} - 146000$$

$$\boldsymbol{VAN \approx -80378\ DA}$$

Interprétation :

La valeur actuelle nette obtenue est **négative** (-80378,6 DA), ce qui signifie que, dans les conditions économiques retenues (coût d'investissement, tarif de l'électricité et taux d'actualisation), le projet ne permet pas de récupérer totalement son investissement sur une durée de vie de 20 ans. Ce résultat s'explique principalement par le faible coût de l'électricité en Algérie, qui limite les économies financières réalisées malgré les importantes économies d'énergie obtenues. Néanmoins, le système reste intéressant du point de vue énergétique et environnemental, en réduisant significativement la consommation d'électricité et en favorisant l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable .

IV.3.6 Analyse de rentabilité

Tableau 7 : Analyse de la rentabilité du système

Coût total	**146000 DA**
le coût annuel de production	**1830 DA**
Coût du kWh	**4,18 DA /kWh**
TRI	**21,85 années**
VAN	**- 80378 DA**
Valeur actuelle des économies	**133660 DA**
Longévité	**20 ans**
Le taux d'économie d'énergie	**78,5 %**

L'étude économique réalisée montre que le chauffe-eau solaire avec appoint électrique permet de réduire significativement la consommation d'énergie électrique. En effet, le système présente une économie annuelle d'énergie de **1598,7 kWh**, soit un taux d'économie de **78,49 %** par rapport à un chauffe-eau électrique conventionnel.

Toutefois, malgré ces performances énergétiques, les indicateurs économiques obtenus mettent en évidence une rentabilité financière limitée. Le temps de retour sur investissement est estimé à **21,85 ans**, tandis que la **Valeur Actuelle Nette (VAN)** est négative (**−80 378,6 DA**). Cette situation s'explique principalement par le faible tarif de l'électricité en Algérie, qui réduit les gains financiers générés par les économies d'énergie réalisées.

Néanmoins, le système présente plusieurs avantages à long terme. Il contribue à la réduction de la consommation d'électricité issue du réseau, diminue les émissions indirectes de gaz à effet de serre et favorise l'exploitation d'une source d'énergie renouvelable et durable. De plus, une augmentation future du prix de l'électricité ou une diminution du coût des équipements solaires améliorerait sensiblement la rentabilité économique du système.

En conclusion, bien que le chauffe-eau solaire étudié ne soit pas entièrement rentable d'un point de vue financier dans les conditions économiques actuelles, il constitue une solution performante sur les plans énergétique et environnemental. Son adoption représente un investissement durable, particulièrement dans les régions à fort potentiel solaire comme Béchar.

IV.3.7 Comparaison avec un chauffe-eau électrique classique

Le tableau suivant compare les principales caractéristiques économiques du système proposé avec celles d'un chauffe-eau électrique classique de même capacité. Cette comparaison permet d'évaluer les avantages et les limites de chaque solution en termes d'investissement initial et de coût d'exploitation.

Les chauffe-eau solaires nécessitent généralement un investissement plus important, mais bénéficient d'une consommation électrique nettement réduite grâce à l'utilisation de l'énergie solaire [42].

Tableau 8: Comparaison entre le chauffe-eau solaire avec appoint électrique et le chauffe-eau électrique classique

Critère	**Chauffe-eau électrique classique**	**Chauffe-eau solaire avec appoint**
Coût d'investissement (DA)	**50 000**	**146 000**
Source d'énergie	Électricité	Énergie solaire + appoint
Consommation annuelle d'électricité (kWh/an)	**2036,7**	**438**
Coût annuel d'électricité (DA/an)	**8 513**	**1 830**
Économie d'énergie	—	**1599 kWh/an**
Taux d'économie d'énergie	—	**78,49 %**

IV.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'optimisation et à l'évaluation économique du chauffe-eau solaire étudié. Dans un premier temps, un appoint électrique a été implémenté dans le modèle MATLAB/Simulink afin d'assurer la production d'eau chaude pendant les périodes de faible ou de nulle irradiation solaire. Ensuite, une étude paramétrique a permis d'analyser l'influence de la surface du capteur, du volume du ballon, du rendement du capteur et de la puissance de la résistance électrique sur les performances thermiques du système.

Les résultats obtenus ont conduit au choix d'une configuration optimale garantissant une température de stockage plus élevée et un meilleur fonctionnement global.

L'étude économique a montré que le système permet de réaliser une économie d'énergie de **1599 kWh/an**, soit **78,5 %** par rapport à un chauffe-eau électrique classique. Bien que le temps de retour sur investissement soit relativement long en raison du faible coût de l'électricité en Algérie, le système proposé présente un intérêt énergétique et environnemental important, en réduisant la consommation d'électricité et en valorisant l'exploitation de l'énergie solaire.

L'analyse comparative entre le système solaire thermique et le chauffage électrique standard met en évidence l'intérêt économique et énergétique de l'intégration des énergies renouvelables dans le secteur résidentiel. Bien que le chauffage électrique présente un faible coût d'investissement initial, il engendre des dépenses d'exploitation élevées et continues en raison de la consommation d'énergie électrique. À l'inverse, le système solaire étudié, malgré un investissement initial plus important, permet de réduire significativement les coûts énergétiques grâce à l'exploitation d'une source d'énergie gratuite et inépuisable [37].

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, il apparaît clairement que les enjeux énergétiques actuels, tant à l'échelle mondiale qu'au niveau national, imposent une transition progressive vers des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement. La dépendance excessive aux énergies fossiles, combinée à l'augmentation continue de la demande énergétique, constitue un défi majeur qui nécessite l'intégration accrue des énergies renouvelables dans les différents secteurs de consommation, notamment le secteur résidentiel.

Dans ce contexte, l'énergie solaire s'impose comme une alternative particulièrement prometteuse, en raison de son abondance et de son faible impact environnemental. L'Algérie, bénéficiant d'un potentiel solaire exceptionnel, dispose d'atouts considérables pour exploiter cette ressource de manière optimale. Toutefois, son utilisation dans les applications domestiques, notamment pour la production de l'eau chaude sanitaire, demeure encore insuffisamment développée.

L'étude menée dans ce mémoire, portant sur la modélisation et la simulation d'un système de chauffe-eau solaire pour une habitation résidentielle à Béchar, a permis de mettre en évidence l'efficacité de cette technologie. Les résultats obtenus montrent que le système étudié est capable de couvrir une part importante des besoins en eau chaude sanitaire, particulièrement durant les périodes de forte irradiation solaire. Cette performance contribue à une réduction significative de la consommation d'énergie conventionnelle.

Par ailleurs, l'analyse technico-économique réalisée a démontré que, malgré un coût initial relativement élevé, l'investissement dans un chauffe-eau solaire peut être amorti sur une période raisonnable grâce aux économies d'énergie générées. Ainsi, ce type de système représente non seulement une solution écologique, mais également une option économiquement viable à long terme.

Néanmoins, certaines contraintes subsistent, notamment la variabilité des conditions climatiques, la nécessité d'un système d'appoint en période de faible ensoleillement, ainsi que le manque de sensibilisation et de politiques incitatives favorisant l'adoption de ces technologies. Ces limites soulignent l'importance de renforcer les efforts en matière de recherche, de formation et de soutien institutionnel.

En perspective, le développement des systèmes solaires thermiques en Algérie pourrait jouer un rôle clé dans la stratégie nationale de transition énergétique. L'intégration à grande échelle de ces solutions dans le secteur résidentiel permettrait de réduire la dépendance aux énergies fossiles, d'optimiser la consommation énergétique et de contribuer à la protection de l'environnement.

En conclusion, le recours aux chauffe-eau solaires constitue une réponse pertinente aux défis énergétiques actuels, et leur généralisation représente une opportunité majeure pour un avenir énergétique plus durable en Algérie.

Bibliographie

Bibliographie

[1] N. BELLOIR, «Le chauffe-eau solaire,» *Techniques de l'Ingénieur,* 2024.

[2] D. Boualamallah, «Optimisation D'un Chauffe- Eau Solaire,» Ghelizane, 2022.

[3] D. SEGGAI, «Réalisation d'une serre bioclimatique intégrant un chauffe eau solaire,» Ouargla, 2024.

[4] C.-W. Yu, C. S. Huang et R. H. Chen, «Experimental Observation of Natural Convection Heat Transfer Performance of a Rectangular Thermosyphon,» *Energies,* 2019.

[5] CDER, «Conception et Réalisation d'un Système de Chauffe-eau Solaire Photovoltaïque,» 2003.

[6] J. A. Duffie et William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Madison, USA, 2013.

[7] Tiwari GN et Sodha MS, Solar energy : fundamentals, design, modelling, and applications, Pangbourne, England, 2002.

[8] energieplus, «Rendement d'une installation solaire thermique,» 27 Aout 2010. [En ligne].

[9] A. Zacarías, «Performance Assessment and Heat Transfer Coefficient of Antifreeze Fluids in Low-Temperature Solar Collectors,» *Applied Sciences,* 2025.

[10] P. G. F, Cejudo-López JM et Domínguez Muñoz F, «An analysis of low flow for solar thermal system for water heating,» *Solar Energy,* pp. 67-73, 2019.

[11] P. Víg, I. Seres et P. Vladár, Improving efficiency of domestic solar thermal systems by a flow control, Hungary, 2021.

[12] «formation.xpair,» [En ligne].

[13] R. Vutukuru, A. Saikiran Pegallapati et Ramgopal Maddali , Applied Thermal Engineering, India, 2019.

[14] J. D. Osorio, Stiven Zea et Alejandro Rivera-Alvarez, Applied Thermal Engineering, Colombia, 2023.

[15] ECO infos, «les-energies-renouvelables.eu,» [En ligne].

[16] H. Mettali, Rousset François, Eric Bideaux et Clausse Marc, «Optimal Integration Of Heat-Pump And Solar Thermal Energy In The Pre-heating Loop Of Wood And Gas Boiler Based District Heating System,» *The 38th International Conference on Efficiency,* 2025.

[17] K.-A. Moon, Hwi-Ung Choi et Kwang-Hwan Choi, «Experimental Study on the Heat Pump Performance Combined with Dual-Purpose Solar Collector,» *Energies,* 2024.

[18] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering, 2 éd., Acadimic press, 2013.

[19] E.-J. Sarabia-Escriva, Víctor-Manuel Soto-Francés et José-Manuel Pinazo-Ojer, Economic and environmental analysis of domestic hot water systems for single-family homes, Spain, 2023.

[20] C. Graf, Peter Pärisch, Anna Marszal-Pomianowska et Martin Frandsen, Domestic hot water systems in well-insulated residential buildings: A comparative simulation study on efficiency and hygiene challenges, Germany, 2024.

[21] univ-tlemcen, 2020. [En ligne].

[22] CDER, «Atlas Solaire Algérien,» 2025. [En ligne].

[23] R. M. Saint, Céline Garnier, Francesco Pomponi et John Currie, «Thermal Performance through Heat Retention in Integrated Collector-Storage Solar Water Heaters,» *Energies,* 2018.

[24] climatsetvoyage, «Climat - Bechar (Algerie),» 2025. [En ligne].

[25] asder, «chauffage-energie-solaire-thermique - ASDER-,» 2023. [En ligne].

[26] A. Nawel et Mohcen Zoubida, «The Role of Solar Energy in Achieving Algeria's Sustainable,» *Algerian Business Performance Review (ABPR),* p. 131, 2025.

[27] MathWorks, «MATLAB and Simulink Documentation,» 2024. [En ligne]

[28] J.-H. Yoo, «Evaluation of solar hot water heating system applications to high-rise multi-family housing complex based on three years of system operation,» *Land & Housing Research Institute,* 2015.

[29] V. Badescu, Simulation analysis for the active solar heating system of a passive house, Romania, 2005.

[30] L. Zhang, Peng Xu, Jiachen Mao et Zhengwei Li, A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study, vol. 156, China: Applied Energy, 2015.

[31] M. Y. MARKMAL, «Simulation Numérique du Comportement Dynamique et Thermique d'un capteur solaire plan à eau (Doctoral dissertation, Directeur: Dr. KORTI Mohamed Choukri/Co-directeur: Dr. KHERBOUCHE Djamila Ep FARADJI).,» 2021.

[32] S. A. Klein, Calculation of flat-plate collector loss coefficients, vol. 17, Solar Energy, 2018, pp. 79-80.

[33] B. Bourges, European Simplified Methods for Active Solar System Design (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES), USA: Springer, 1991.

[34] Weather Spark, «Average High and Low Temperature in August at Bechar,» 2025. [En ligne].

[35] European Commission, «PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM,» 2026. [En ligne].

[36] R. M'Hamed, Mebrouk. Sellam et Abderrahmane Belghachi, «Conception and realization of sun tracking system of photovoltaic array in the south west Algerian,» *Renewable Energies,* 2009.

[37] J. Duffie et Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4 éd., University of Wisconsin-Madison: John Wiley & Sons, 2013.

[38] S. Pahlavan, M. Jahangiri, A. Shamsabadi et A. Khechekhouche, «Feasibility study of solar water heaters in Algeria, a review,» *Journal of Solar Energy Research (JSER),* p. 146, 2018.

[39] F. Eze, Munonyedi Egbo, Udochukwu John Anuta et Ossei-Bremang Rejoice Ntiriwaa, «A review on solar water heating technology :Impacts of parameters and techno-economic studies,» *Bulletin of the National Research Centre*, 2024.

[40] Zhang et J. Inequal, «An Experimental Study on the Effectiveness of the Production-Oriented Approach,» *Journal of Inequalities and Applications*, 2017.

[41] ouedkniss, «Chauffe eau solaire,» 2026. [En ligne]

[42] O. Hachchadi, Daniel R. Rousse, Misagh Irandoostshahrestani et Abdellah Mechaqrane, «Techno-economic assessment and environmental impact of photovoltaic and conventional solar water heating systems in cold climates,» *Energy Conversion and Management*, vol. 297, 2023.