

UNIVERSITY BLIDA 1 SAAD DAHLEB
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVLABLES



Mémoire de MASTER ACADEMIQUE

OPTION : CONVERSION THERMIQUE

THEME :

*Simulation numérique d'un système de chauffage solaire
couplé à une maison individuelle située à Alger (Algérie).*

Dirigé par : Mehdi OULADHEDDAR

Devant le jury :

M. Merzouk	Professeur, Université Saad Dahleb Blida 1	Président
K. Kaci	MAA, Université Saad Dahleb Blida 1	Examineur
S. Chaouchi	MAA, Université Saad Dahleb Blida 1	Examinatrice
M. Missoum	MCB, Centre Universitaire Tipaza	Promoteur
D. Lafri	MCB, Université Saad Dahleb Blida 1	Co-Promoteur

2020/2021

Résume :

Afin de couvrir les besoins de chauffage domestique et de réduire l'impact des systèmes de chauffage traditionnels sur l'environnement, ainsi que de réduire leur consommation énergétique, la recherche scientifique a développé des systèmes utilisant l'énergie solaire en adéquation avec les besoins de chauffage des locaux. Ainsi, ce travail vise à étudier un système de chauffage solaire couplé à une habitation individuelle type en Algérie. Dans un premier temps, une étude bibliographique a été menée sur le chauffage solaire des bâtiments. Dans un deuxième temps, nous avons effectué une modélisation thermique des différents composants du système solaire étudié ainsi que la maison choisie à l'étude. Ensuite, nous avons simulé le système global avec le logiciel TRNSYS16 sous les conditions climatique d'Alger. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Mots clés : Chauffage solaire, maison individuelle, TRNSYS 16, simulation numérique, bilan énergétique.

Abstract:

In order to cover domestic heating needs and reduce the impact of traditional heating systems on the environment, as well as reduce their energy consumption, scientific research has developed systems using solar energy in line with the needs of heating. This work aims to study a solar heating system coupled to an individual house. First, a bibliographic study was carried out on solar heating of buildings. Secondly, we have performed a numerical modeling of the different components of the solar heating system and the studied house. Then, we simulated our system with the TRNSYS 16 software under the climatic conditions of Algiers. Finally, the simulation results have been presented and discussed.

Keywords: Solar heating, detached house, TRNSYS 16, numerical modeling, energy balance.

ملخص :

من أجل تغطية احتياجات التدفئة المنزلية وتقليل تأثير أنظمة التدفئة التقليدية على البيئة ، وكذلك تقليل استهلاكها للطاقة ، طور البحث العلمي أنظمة تستخدم الطاقة الشمسية بما يتماشى مع احتياجات التدفئة. وبالتالي ، يهدف هذا العمل إلى دراسة نظام تدفئة شمسي مقترن بمسكن فردي. في البداية ، تم إجراء دراسة ببيولوجرافية حول التسخين الشمسي للمباني. ثانياً ، قمنا بتنفيذ النمذجة الحرارية لمختلف مكونات النظام الشمسي المدروسة وكذلك المنزل المختار للدراسة. بعد ذلك ، قمنا بمحاكاة نظامنا المتصل بالمنزل باستخدام برنامج ترنسيس 16 في ظل الظروف المناخية للجزائر العاصمة. أخيراً ، يتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها.

الكلمات المفتاحية: التسخين الشمسي ، المنزل الفردي ، ترنسيس 16 ، المحاكاة العددية ، توازن الطاقة.

Dédicaces

Louange à Dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu

Je dédie ce modeste travail :

A mon cher père, Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je suis fier d'être ton fils, je t'aime.

A Maman chérie d'amour. C'est ton enfant qui t'écrit pour te dire Maman je t'aime et je pense intensément à toi tous les jours. Je suis loin de toi mais tu es en toute heure dans mon cœur. Gros bisous d'un enfant à la reine de sa vie...Maman chérie...

A ma sœur que j'aime du plus profond de mon cœur. La terre peut s'arrêter de tourner les oiseaux s'arrêter de chanter et les poissons arrêter de nager. Mais je ne vais jamais arrêter de t'aimer. Tu me manques et je t'aime.

A mes chers frères, Vous êtes mon soutien, mes amis et mon épaule dans les moments difficiles, et sans vous, la vie n'a aucun sens, que Dieu vous bénisse et protège.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tous les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

A mes êtres chers que j'aime pour leur amour mutuel pour moi et pour leur soutien moral.

Merci d'être toujours là pour moi.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire, Dr. Mohammed MISSOUM, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Je tiens à lui exprimer ma gratitude et mon profond respect. Mes sincères remerciements à monsieur le docteur LAFRI DJAMEL qui m'avez aussi honoré de guider ce travail, collaborer à son enrichissement par ses directions judicieuses. Je désire aussi remercier les professeurs du département des énergies renouvelables Blida 01, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires. Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à madame F. Sahnoune, qui m'a aidé, soutenu et encouragé, exprimant son souhaits de me voir réussir.

Grande remercie à mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Nomenclature

Symbol	Signification	Unité
A	Surface	m ²
Q	Quantité de chaleur	W
T	Température	K
G	Rayonnement global incident	W/m ²
FR	Facteur de conductance thermique	[-]
FS	Fraction solaire	[%]
m	Débitmassique	kg/h
cp	Chaleur spécifique	kJ/kg K
M	Masse	kg
U	Coefficient de transfert de chaleur	W/m ² . K
C	Capacité nominale	kW

Indices

Indice	Signification
a	Air
c	Capteur thermique
ch	Chauffage
CH	Chauffage auxiliaire (appoint)
e	Entrée

env	Environnement
g	Global
int	Intérieur
max	Maximum
resv	Réservoir d'eau chaude
s	Sortie

Caractères Grecs

Symbole	Signification	Unité
α	Absorptivité	[-]
β	Angle d'inclinaison du capteur	[°]
φ	Taux de volume du réservoir par surface de captage	L/m ²
η	Rendement ou efficacité	[-]
θ	Taux de débit massique par surface de captage	kg/ (h m ²)
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
τ	Transmittivité	[-]

Liste des figures

Figure 1.1 Principe d'un chauffage solaire.....	3
Figure 1.2 Composants d'un système de chauffage solaire des bâtiments	4
Figure 1.3 Schéma d'un capteur thermique.....	5
Figure 1.4 Ballon de stockage	6
Figure 1.5 Appoint intégré électrique	7
Figure 1.6 Appoint intégré hydraulique.....	7
Figure 1.7 Appoint séparé.....	8
Figure 1.8 Plancher chauffant	8
Figure 1.9 Radiateurs.....	9
Figure 1.10 Régulateur pour système solaire thermique.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 1.11 Fonctionnement d'un plancher solaire direct	11
Figure 1.12 La plus grande centrale au monde- Silkeborg (Danemark)	12
Figure 1.13 Besoins de chauffage et de refroidissement des locaux	14
Figure 2.1 Schémas du système de chauffage solaire étudié	20
Figure 2.2 Plan d'aménagement de la maison.....	21
Figure 3.1 L'interface de TRNSYS	27
Figure 3.2 Création du fichier Maison.bui sur l'interface TRNBUILD	28
Figure 3.3 Interface de la simulation de chauffage solaire d'une maison sous TRNSYS	29
Figure 3.4 Variation de La température moyenne annuelle à Alger	30
Figure 3.5 Rayonnement solaire (en KWh/m ²)	31
Figure 4.1 La demande mensuelle de chauffage de la maison étudiée.	36
Figure 4.2 La demande de chauffage horaire, heure par heure,	37
Figure 4.3 Les évolutions des températures des principaux composants du système durant une journée type.	38
Figure 4.4 Les évolutions des puissances des principaux composants du système durant une journée type.	39
Figure 4.5 Energies thermiques mensuelles produite par les capteurs et fournie par l'appoint, et la fraction solaire.	40
Figure 4.6 Influence de la surface de l'inclinaison des capteurs (%).	41
Figure 4.7 Influence de la surface du champ de capteurs.	42

Figure 4.8 Influence du volume du réservoir de stockage	43
Figure 4.9 Influence du débit massique dans le circuit primaire.....	44

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Paramètre du capteur thermique	31
Tableau 3.2 Paramètre du réservoir du stockage	32
Tableau 3.3 Débits massiques des différentes pompes	32
Tableau 3.4 Valeurs de U de différents éléments de l'enveloppe	33
Tableau 3.5 Paramètres de simulation	34

Sommaire

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : Généralités sur les systèmes de chauffage solaire.....	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Principe de fonctionnement.....	3
1.3. Composants d'un système de chauffage solaire.....	5
1.3.1. Système de charge	5
1.3.2. Système de stockage	6
1.3.3. Système d'appoint.....	7
1.3.4. Système de décharge	9
1.3.5. Système de régulation	10
1.4. Plancher Solaire Direct (PSD).....	11
1.5. Etat de l'art.....	12
1.6. Conclusion	18
CHAPITRE 2 : Modélisation des différents composants d'un système de chauffage solaire.....	19
2.1. Introduction.....	19
2.2. Présentation du système solaire	19
2.3. Bilan thermique de la maison.....	20
2.4. Modélisation du système de chauffage solaire	22
2.4.1. Capteur solaire plan	22
2.4.2. Réservoir de stockage	23
2.4.3. Appoint.....	24
2.4.4. Pompes.....	24
2.5. Conclusion	25
CHAPITRE 3 : Simulation dynamique du système solaire sous TRNSYS.....	26
3.1. Introduction.....	26
3.2. Présentation du logiciel TRNSYS	26
3.3. Système de chauffage sous TRNSYS	28
3.3.1. Données climatiques.....	29
3.3.2. Capteur thermique.....	31

3.3.3. Réservoir de stockage	32
3.3.4. Pompes à vitesse simple.....	32
3.3.5. Contrôleur différentiel avec hystérésis	33
3.3.6. Thermostat d'ambiance à 3 étages	33
3.3.7. Bâtiment multizone.....	33
3.4. Conclusion	35
CHAPITRE 4 : Résultats de simulations et interprétations.....	36
4.1. Introduction.....	36
4.2. Demande de chauffage de la maison.....	36
4.3. Performance du système de chauffage solaire	37
4.3.1. Résultats journaliers.....	38
4.3.2. Résultats mensuels	39
4.4. Etude paramétrique:.....	41
4.4.1. Influence de l'angle d'inclinaison	41
4.4.2. Influence de la surface de captage	41
4.4.3. Influence du volume du réservoir	42
4.4.4. Influence du débit massique.....	43
CONCLUSION GENERALE	45
REFERENCES	47

INTRODUCTION GENERALE

La nature nous offre une variété de sources d'énergie, mais toutes les sources d'énergie ne sont pas égales en termes d'impact sur l'environnement. Cet impact a non seulement des coûts économiques souvent négligés, mais aussi conduit principalement à des déséquilibres environnementaux. Choisir de privilégier l'utilisation des énergies renouvelables, c'est assurer le développement durable et harmonieux de l'économie et préserver l'environnement.

Les énergies renouvelables sont des énergies qui sont inépuisables et disponibles en grande quantité. Ainsi il existe cinq grands types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique.

Néanmoins, l'énergie solaire est plus importante et rentable que toutes les autres sources d'énergie. Parce qu'elle est gratuite, inépuisable et en plus, disponible dans le monde entier. Il faut dire que les techniques d'exploitation de l'énergie solaire n'ont cessé de s'améliorer au fil des années. Aujourd'hui, on compte deux types d'énergie solaire catégorisés selon leurs méthodes de production : L'énergie solaire thermique et photovoltaïque. Parmi les applications du solaire thermique : le chauffage solaire des locaux. En Algérie, le secteur du bâtiment est un secteur énergétivore car les derniers statistiques indiquent plus 40% de la consommation énergétique finale est utilisée par le secteur de l'habitat[1] .D'autre part, L'Algérie possède un potentiel d'énergie solaire important [2]. Cela fait l'utilisation de l'énergie solaire dans le secteur des bâtiments une meilleure solution de ce problème.

Notre travail vise à étudier le chauffage solaire d'une maison individuelle de superficie totale de 60.795 m² et proposer des solutions pour pallier ce problème et trouver des solutions efficaces.

D'abord, le premier chapitre porte sur le chauffage solaire, les procédés de production de chauffage, les systèmes de chauffage solaire et les différentes composants importants de chauffage solaire.

Le deuxième chapitre consiste à modéliser les principaux éléments qui composent notre système à étudier, ainsi que la maison pour laquelle le système doit produire de l'énergie thermique.

La simulation dynamique du système de chauffage à l'aide de logiciel TRNSYS 16 fait l'objet du troisième chapitre.

Finalement, les résultats de simulations obtenus seront présentés et interprétés.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les systèmes de chauffage solaire des locaux

1.1. Introduction

L'énergie solaire est une énergie propre et inépuisable pour l'humanité, elle respecte l'environnement, protège la santé et les ressources énergétiques, ne produit pas de déchets ni d'émissions polluantes, notamment de dioxyde de carbone. Outre les enjeux environnementaux et l'impact sur les gaz à effet de serre, le chauffage et l'eau chaude solaires constituent une part importante de la facture énergétique des bâtiments ou de toute entreprise ou institution publique qui consomme beaucoup d'eau chaude et peut faire des économies grâce à l'énergie solaire.[3]

Dans ce chapitre on va parler sur des généralités sur le chauffage solaire, les procédés de production de chauffage et les différentes systèmes de chauffage solaire.

1.2. Principe de fonctionnement

Le chauffage solaire est utilisé pour chauffer l'eau chaude sanitaire ou pour chauffer des maisons ou d'autres lieux. Le chauffage solaire est l'un des appareils de chauffage les plus économiques et les plus écologiques, car toute l'énergie solaire de toiture est gratuite. Bien entendu, l'ensoleillement des panneaux solaires ne correspond pas toujours aux besoins en eau chaude sanitaire ou en chauffage. Pour cette raison, tout chauffage solaire comprend généralement des dispositifs de stockage solaire ou des ballons. De plus, si la capacité solaire est insuffisante, une énergie supplémentaire doit être déployée. Qu'il soit électrique (comme les chauffe-eau solaires électriques) ou fourni par des chaudières ou des pompes à chaleur. Ce système utilise des panneaux solaires **thermiques**, **photovoltaïques** ou **hybrides** (Dans notre travail on s'intéressera seulement au capteur solaire thermique.).

Le principe de fonctionnement d'un système de chauffage est comme suit: Le chauffage solaire se fait par le biais de panneaux solaires thermiques. Le soleil va chauffer le fluide situé à l'intérieur des capteurs. Lorsque le fluide est pompé à travers le collecteur, le fluide s'échauffe. Le fluide maintenant chauffé est ensuite pompé hors du collecteur et à travers un échangeur de chaleur. Les échangeurs de chaleur sont généralement constitués de cuivre et se trouvent

normalement à l'intérieur d'un réservoir de stockage solaire. Cela permet à la chaleur du fluide d'être transmise - ou échangée, d'où le nom - dans l'eau du réservoir de stockage. Le réservoir de stockage est un élément essentiel de tout système solaire thermique, car il permet de stocker toute la chaleur générée par le capteur solaire thermique pour être utilisée chaque fois que cela est nécessaire. Ce dernier est muni d'un échangeur thermique. Il va permettre au fluide de réchauffer l'eau présente dans le ballon. Ensuite, une fois convenablement chauffée, l'eau du ballon est envoyée au réseau d'eau sanitaire de la maison. (Figure 1.1)[4]

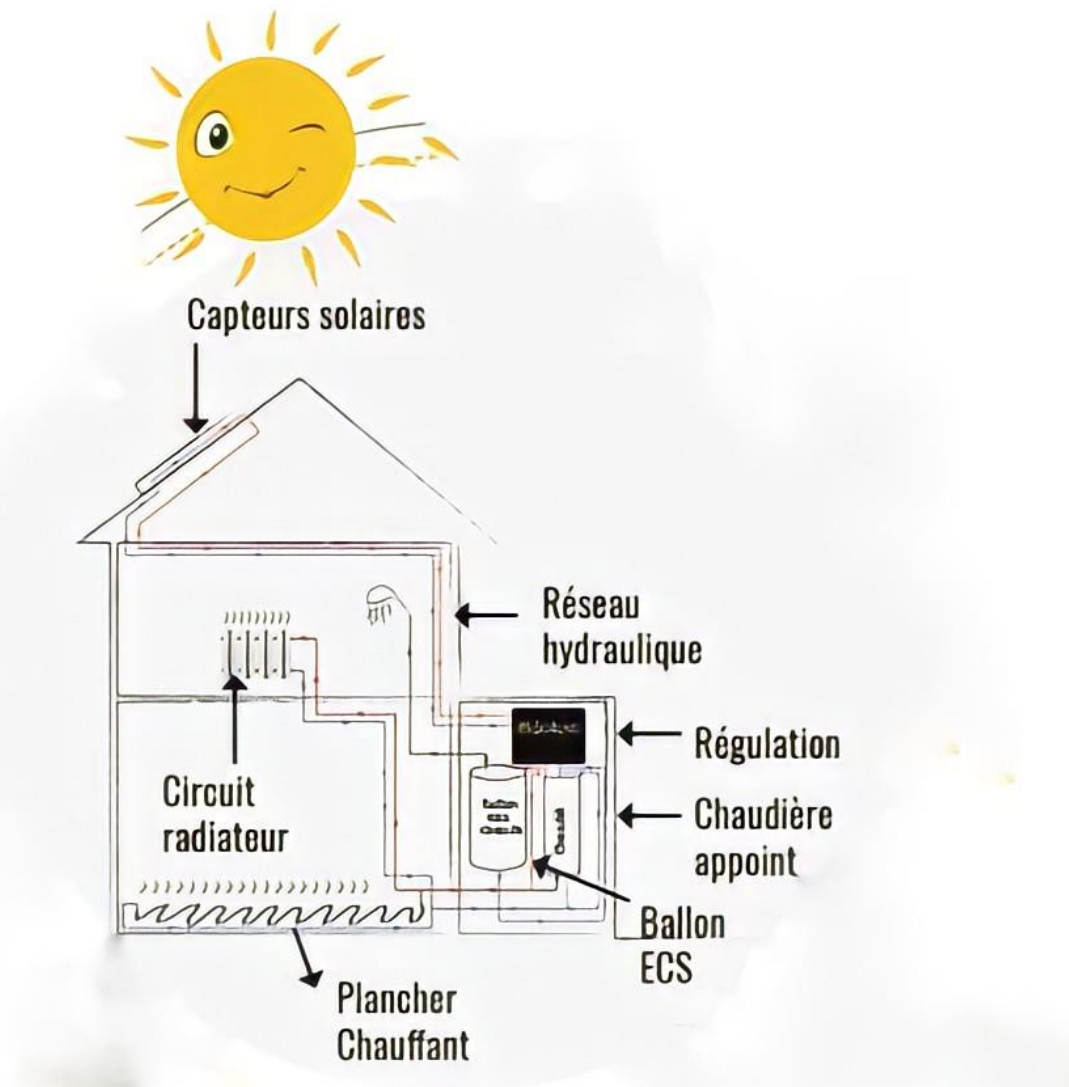


Figure 1.01 Principe d'un chauffage solaire

1.3. Composants d'un système de chauffage solaire

Le chauffage solaire est généralement composé de:

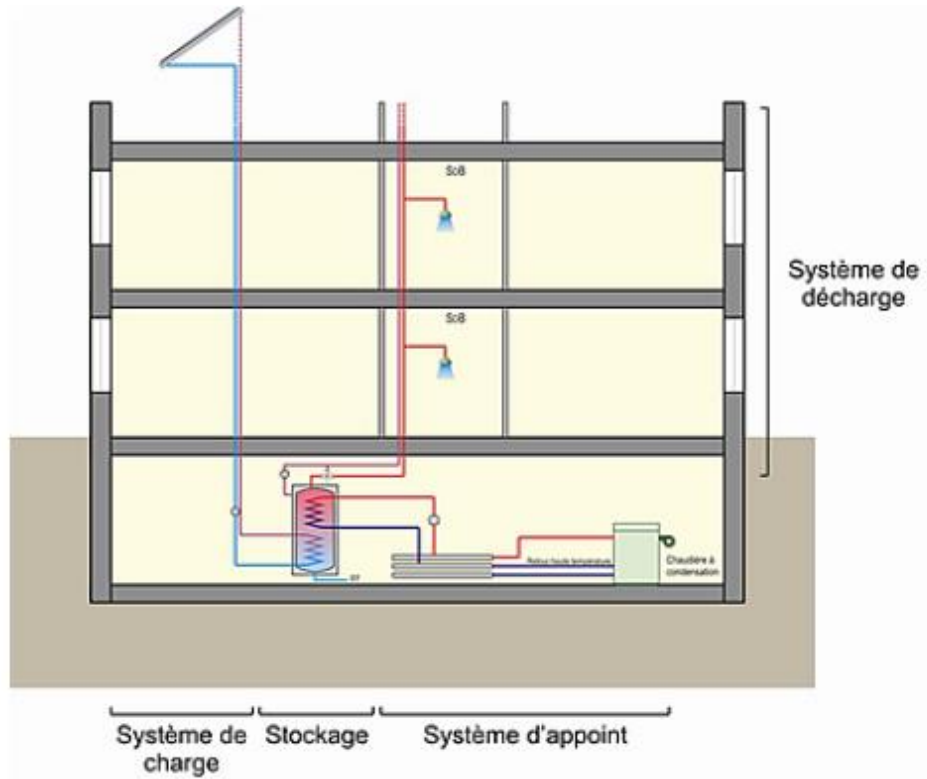


Figure 1.02 Composants d'un système de chauffage solaire des bâtiments

1.3.1. Système de charge

Le système de charge comprend les capteurs solaires, la boucle primaire ou solaire et un échangeur de chaleur. (Figure 1.2)

Un capteur solaire thermique est un dispositif destiné à absorber le rayonnement solaire et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur. Les capteurs plans à air sont utilisés pour le chauffage des bâtiments, de l'air de ventilation et pour le séchage des récoltes. Les capteurs plans de types vitrés sont très répandus et ils existent sous forme de capteurs à circulation de liquide et sous forme de capteurs à air. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température désirée se situe entre 30 et 70 °C, et/ou à des applications qui nécessitent de la chaleur au cours des mois d'hiver. Les capteurs à circulation de liquide sont plus communément utilisés pour le chauffage de l'eau chaude des

résidences pour le chauffage des bâtiments, ainsi que celui des piscines intérieures. (Figure 1.3)[5]

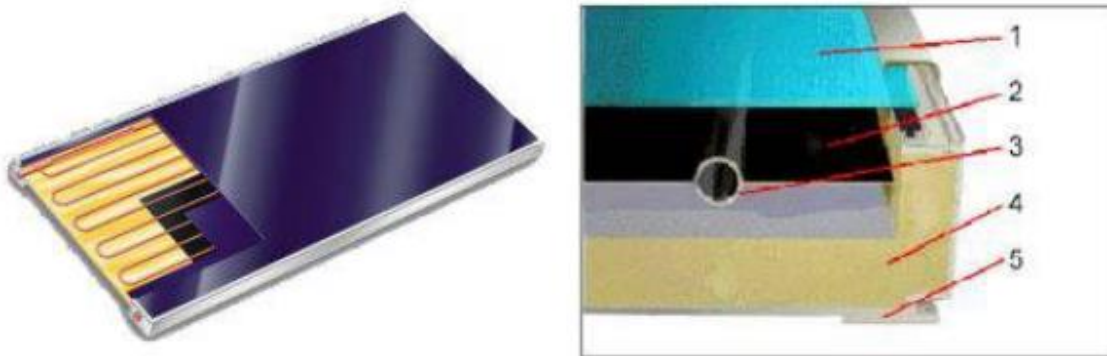


Figure 1.03 Schéma d'un capteur thermique

1. Vitre : verre dont on a retiré des oxydes de fer et qui a subi un traitement antireflet.
2. Absorbant : il transfère la chaleur à un fluide caloporteur qui circule au travers des tubes.
3. Serpentin en cuivre.
4. Isolant.
5. Structure.

1.3.2. Système de stockage

Il s'agit généralement d'un ou plusieurs ballons d'eau bien isolés thermiquement. Le stockage permet de différer la demande de puisage par rapport au moment de la production solaire.

Le stockage est un élément clé de toute installation solaire thermique. Il permet de pallier au caractère discontinu de l'énergie solaire et à la non-simultanéité de la production et des besoins. En pratique, l'énergie solaire thermique est stockée via l'eau contenue dans un ou plusieurs ballons d'eau accumulateurs raccordés en série.

Le ballon de stockage à eau solaire doit non seulement répondre à toutes les exigences d'un réservoir d'eau sanitaire classique, mais doit en plus pouvoir résister aux hautes températures auxquelles il pourrait être soumis. La température dans le ballon peut en effet monter jusqu'à 95°C, d'où la nécessité de prévoir un mitigeur thermostatique sur la boucle de distribution. (Figure 1.4)

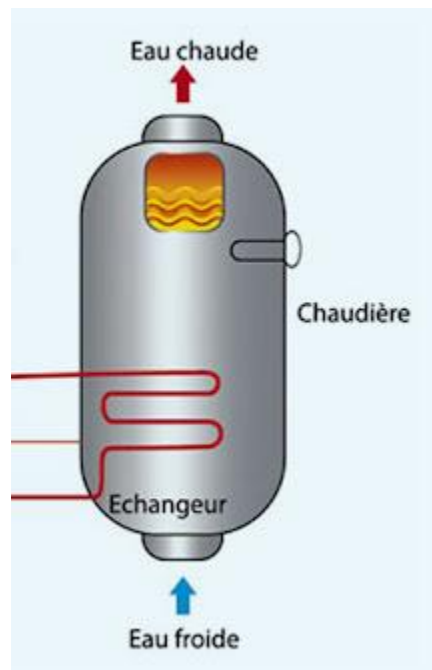


Figure 1.04 Ballon de stockage

1.3.3. Système d'appoint

Le chauffage solaire ne parvient pas à couvrir la totalité des besoins en chauffage d'un foyer, notamment lorsque l'ensoleillement est trop faible ou la demande est ponctuellement trop importante. Il est donc nécessaire de prévoir un dispositif d'appoint. Cet appoint utilisera une énergie autre que le solaire (électricité, gaz, bois...) pour chauffer l'eau en complément de l'énergie solaire.

Il existe plusieurs types d'appoint :

a. Appoint intégré électrique

Une résistance électrique est placée à l'intérieur du ballon et permet de réchauffer l'eau quand cela est nécessaire. (Figure 1.5)

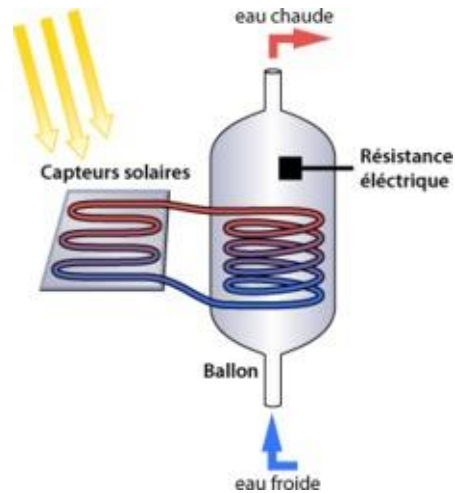


Figure 1.05 Appoint intégré électrique

b. Appoint intégré hydraulique : au gaz, bois ou fioul

Cette solution est l'option en vogue en Allemagne et dans les pays scandinaves (Figure 1.6) :

- Un serpentin en cuivre, échangeur de chaleur relie le ballon solaire à la chaudière.
- Ce serpentin est parcouru par de l'eau déjà chaude, chauffé grâce à votre chaudière de chauffage central.
- Cette chaudière est une chaudière classique fonctionnant au gaz, au fioul ou au bois.
- La circulation de l'eau entre le ballon solaire et la chaudière est stoppée lorsque la température est suffisamment élevée (période d'ensoleillement correct).

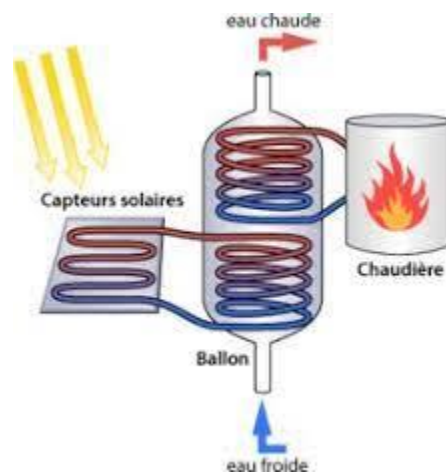


Figure 1.6 Appoint intégré hydraulique

c. Appoint séparé

On parle d'appoint séparé lorsque le dispositif d'appoint existe hors du ballon d'eau chaude solaire. Il consiste alors le plus souvent en un deuxième chauffe-eau fonctionnant à l'électricité, bois, au gaz, ou au fioul. (Figure 1.7)

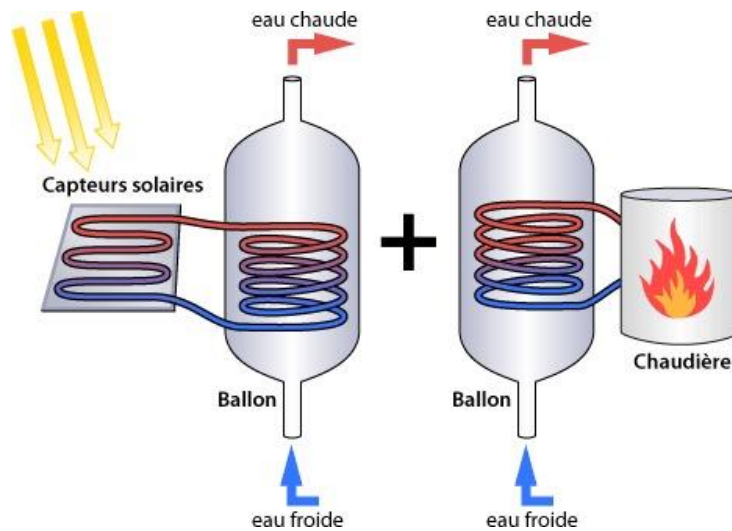


Figure 1.07 Appoint séparé.

1.3.4. Système de décharge

C'est la partie de l'installation qui distribue l'eau chaude sanitaire aux différents points de puisage. Elle peut être un plancher chauffant (Figure 1.8) ou des radiateurs (Figure 1.9).

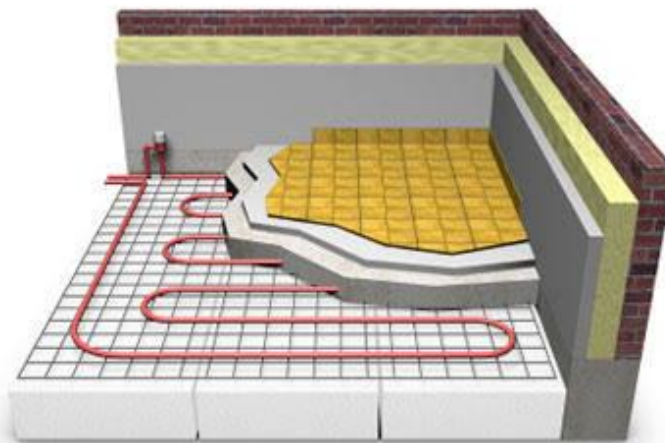


Figure 1.08 Plancher chauffant

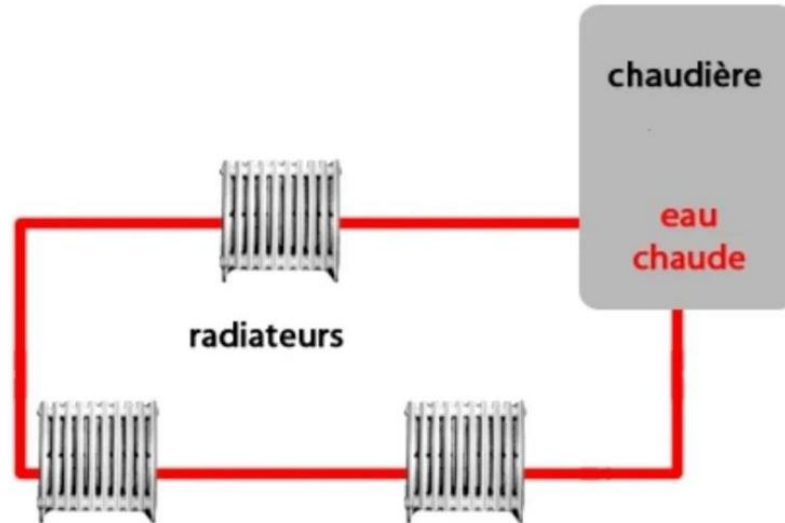


Figure 1.09 Radiateurs

1.3.5. Système de régulation

Pour les systèmes à circulation forcée, le système de régulation différentielle assure la mise en marche et l'arrêt adéquats de l'installation. Cette gestion de la chauffe solaire est primordiale pour tirer un maximum de profit de l'énergie solaire disponible. Le principe est basé sur la mesure continue de deux températures :

- La température de l'eau chaude en partie basse du ballon de stockage (ou du fluide caloporteur à la sortie de l'échangeur solaire) : **T° stockage.**
- La température du fluide caloporteur à la sortie des capteurs : **T° capteur.**

Dès que la différence de température est suffisante, la pompe est mise en marche. Elle s'arrête lorsque l'énergie solaire captée n'est plus suffisante ou n'est plus nécessaire.

Donc :

- Si $T^{\circ} \text{ capteur} > T^{\circ} \text{ stockage} + \Delta T1$: la pompe démarre.
- Si par contre, $T^{\circ} \text{ capteur} < T^{\circ} \text{ stockage} + \Delta T2$: la pompe s'arrête.

La régulation d'une installation solaire vise à régler le flux d'énergie entre tous les composants du chauffe-eau solaire : le capteur, le ballon de stockage et l'utilisateur par :

- La régulation du chargement, pour la conversion optimale du rayonnement solaire en chaleur et son transfert vers le ballon de stockage. (Figure 1.10)
- La régulation du déstockage (lorsque le déstockage ne se produit pas automatiquement par soutirage), pour garantir un transfert optimal de la chaleur du ballon de stockage vers l'utilisateur. (Figure 1.10)

1.4. Plancher Solaire Direct (PSD)

Un plancher solaire direct est un système de chauffage solaire direct. La différence fondamentale avec les autres systèmes de chauffage solaire réside dans le fait qu'avec un système de plancher solaire il n'y a pas de stockage de chaleur dans un ballon tampon. C'est la dalle en béton qui va stocker la chaleur captée par les capteurs solaires. Le principe est simple : le fluide, réchauffé dans les capteurs solaires, circule directement (sans passer par un échangeur ou par un ballon de stockage) dans un plancher chauffant. Le plancher chauffant, qui n'est qu'une dalle en béton, joue le rôle de stockage de la chaleur. Son inertie permet de restituer en soirée l'énergie accumulée pendant la journée. [6]

- En hiver, la majeure partie de l'énergie solaire est dirigée dans la dalle.
- A la mi- saison, une partie va dans la dalle béton et le reste dans l'eau chaude.
- En été, toute l'énergie solaire sert à produire de l'eau chaude sanitaire.

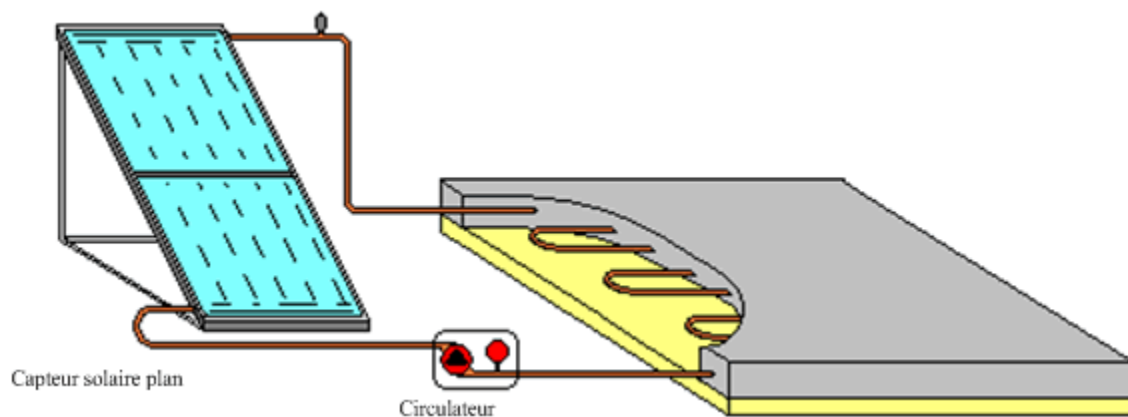


Figure 1.010 Fonctionnement d'un plancher solaire direct

1.5. Etat de l'art

- Les premières installations de production d'eau chaude sanitaire ont été achevées dans les années 1930. Les chauffe-eau solaires industriels ont commencé à apparaître au début des années 1960 et se sont rapidement répandus dans le monde entier. L'installation la plus courante comprend un collecteur plat utilisé comme thermosiphon, un absorbeur de 3 à 4 mètres carrés, une chambre pour stocker 150 à 180 litres d'eau chaude, et une chambre pour stocker l'eau froide, le tout s'intégrant dans une seule plate-forme pour obtenir une conception compacte pour une installation sur le toit ou sur un terrain à proximité du bâtiment. [7]
- Le Danemark est un des pays les plus en pointe sur ce type de techniques et possède de nombreuses centrales, mettant ainsi à profit son réseau de chaleur développé depuis les années 1970. En 2017, la plus grande centrale au monde, d'une superficie de 156 694 m², se situe dans ce pays, à Silkeborg, au centre du Jutland.(Figure 1.12)



Figure 1.011 La plus grande centrale au monde- Silkeborg (Danemark)

❖ **En 2009, T.Kozak et A.Majchrzycka[8]** ont mené une étude visant à analyser l'application des capteurs solaires matriciels comme source d'énergie dans la région de Poméranie occidentale en Pologne pour la préparation d'eau chaude et le chauffage des locaux d'une maison individuelle. L'analyse a été effectuée pour deux cas : où les capteurs solaires sont utilisés comme source d'énergie indépendante, et combiné avec une chaudière à gaz. Les résultats ont montré que :

- En ce qui concerne les conditions de rayonnement solaire dans la région de Poméranie occidentale en Pologne, il est recommandé d'appliquer le réseau de capteurs solaires pour la préparation d'eau chaude entre mars et octobre, alors qu'entre novembre et février, l'énergie obtenue des capteurs solaires ne couvre que 54% de besoin énergétique pour la préparation d'eau chaude,
- L'utilisation du réseau de capteurs solaires comme principale source d'énergie pour la préparation d'eau chaude et le chauffage des locaux n'est pas recommandée dans la région de Poméranie occidentale en Pologne, car l'énergie fournie par le réseau solaire couvre chaque année environ 85 % de l'énergie requise pour la préparation de l'eau chaude et 8 % de l'énergie nécessaire au chauffage des locaux de la maison.
- En raison des conditions de rayonnement solaire de la zone en question, il est recommandé d'appliquer les capteurs solaires combinés avec une chaudière à gaz ou une pompe à chaleur.

❖ **En 2016, S. Bensalem et al.[9]** Ont réalisé une étude numérique à l'aide du logiciel TRNSYS. Les performances thermiques du SCS intégré ont été réalisées dans un immeuble d'habitation au climat algérien. L'étude montre la rentabilité de l'application du SCS en Algérie, notamment dans le cas des logements basse consommation. L'étude prédit que l'utilisation de SCS liée à certains paramètres bioclimatiques (chemins, matériaux de construction, matériaux d'isolation, inertie des matériaux, etc.) peut réduire les besoins énergétiques annuels de chauffage des locaux de plus de 50 % en période hivernale.

❖ L'objet de l'étude que **S. Sami et al.[10]** Ont introduit **en 2018** est l'intégration d'un système de refroidissement et de chauffage solaire d'un résidentiel situé en Algérie

(région de Sétif, zone climatique C). Le bâtiment étudié fait partie d'un projet pilote national visant à construire 600 logements à haute performance énergétique. Il s'agit d'un immeuble de 3 étages et contient 10 appartements d'une superficie de 70 m² chacun. Nous avons utilisé le logiciel TRANSOL sous TRANSYS pour calculer la charge de chauffage (volume et eau chaude) et de refroidissement. Les résultats ont montré que :

- Pour les besoins de rafraîchissement, ils varient selon les habitudes des occupants et la période de l'année ainsi que le choix de dimensionnement.
- Pour l'eau chaude sanitaire, ils constatent qu'en été l'apport du supplément n'est même pas nécessaire. Ceci est dû au dimensionnement choisi et au type de capteur utilisé. La fraction solaire annuelle moyenne est d'environ 72 %, ce qui est une valeur très encourageante. (Figure 1.13)

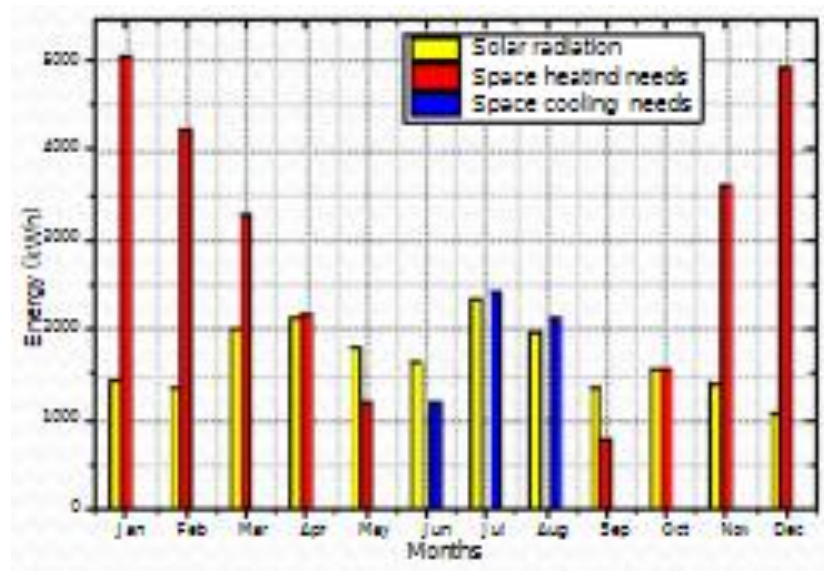


Figure 1.12 Besoins de chauffage et de refroidissement des locaux

- Les besoins en chauffage sont à leur maximum en hiver avec des valeurs d'environ 5000 kWh.
 - Les besoins en refroidissement sont à leur maximum en juillet (2500 kWh).
- ❖ Un système de chauffage solaire avec stockage thermique saisonnier de piscine d'eau a été représenté pour étudier les performances de fonctionnement toute l'année dans les régions froides de la Chine. En fonction des performances du capteur solaire, de la

piscine de stockage de chaleur, de la pompe à chaleur à source d'eau (WSHP) et du fonctionnement de la température de l'eau du système de chauffage par rayonnement au sol, une stratégie de contrôle du fonctionnement tout au long de l'année du système ci-dessus a été proposée. Un modèle de simulation avec module de contrôle autoprogrammé a été établi dans la plate-forme de simulation TRNSYS par **J. Zhao, L. Lyu, X. Lien 2019** [11]. Et la précision du modèle de simulation a été vérifiée. Le modèle de simulation se compose de zone des capteurs solaires conçue de 8 000 m² et d'un volume de réservoir saisonnier de 13 300 m³. Grâce à la simulation et à l'analyse des performances de fonctionnement annuelles, les résultats montrent que la charge thermique du système de chauffage solaire peut correspondre à la charge thermique dynamique du bâtiment. Dans la phase initiale de chauffage, l'énergie solaire peut garantir un chauffage indirect à 100 % et une charge de chauffage directe en faisant fonctionner la piscine de stockage de chaleur. De plus, de la mi-janvier à la fin de la période de réchauffement (début avril), le COP moyen du WSHP est de 4,3. Et le taux de garantie mensuel moyen du système solaire se situe entre 70 % et 75 %. On constate que cette stratégie de contrôle du fonctionnement peut améliorer le taux de garantie solaire et l'efficacité énergétique des systèmes de chauffage solaire saisonnier.

- ❖ Le coût de chauffage d'un poulailler augmente considérablement le coût de production alimentaire : Les agriculteurs ont tendance à utiliser des appareils de chauffage à combustible et à gaz dans le but de maintenir la température requise pour l'élevage des poussins dans les poulaillers. **En 2019, H. M. Dbouket M. Roya**[12] ont proposé un système de chauffage solaire innovant pour les poulaillers au Liban où les chauffe-eau solaires sont utilisés comme source alternative d'énergie verte, en gardant à l'esprit que le système solaire peut fournir la température requise pour les différentes étapes de la croissance des volailles. Ce système utilise des chauffe-eau solaires et les fournit avec l'innovant PRO - Shield installé sur n'importe quel chauffe-eau solaire – quels que soit sa la taille, son type et sa marque - pour résoudre le problème de surchauffe. De plus, l'introduction de PRO-Shield garantira l'efficacité des chauffe-eau solaires, augmentant la durée de vie du système avec des coûts de maintenance et d'exploitation négligeables, et transformant le Liban en un pays industriel avec un état d'esprit innovant et un cycle économique amélioré en réduisant les coûts. de volaille libanaise. Les résultats ont

montré que le système testé a réussi à fournir les différentes températures nécessaires à l'élevage des poussins pendant la période hivernale 2019, puisque les températures variaient de 32°C pendant la première semaine à 18°C pendant la sixième semaine. à 60% des coûts de chauffage utilisés lors de l'application des méthodes de chauffage conventionnelles.

- ❖ **En 2019, R. Kherchi et al.**[13] Ont présenté une étude sur un bâtiment de bureaux nouvellement construit (275,20 m³) au Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger (CDER). Le bâtiment est soumis aux normes de la réglementation thermique algérienne. Les besoins énergétiques annuels pour le chauffage et le refroidissement sont respectivement de 2754 kWh et 3575 kWh. Le bâtiment est chauffé par un système solaire thermique avec un champ de capteurs solaires de 10 mètres carrés. Les résultats ont montré que la température intérieure du bureau atteignait un certain niveau de confort, variant de 10,8°C à 23, 4°C. Ce système peut être dupliqué et utilisé comme exemple pour d'autres institutions. Le logiciel TRNSYS est utilisé pour la simulation dynamique des performances du bâtiment.
- ❖ **En 2019, K. Kaci** [14] ont présenté une étude intitulée "Systèmes intégrés de refroidissement et de chauffage solaire pour bâtiments résidentiels à Blida, Algérie". Le système se compose d'un ensemble de capteurs solaires qui fournissent de l'énergie a un ballon de stockage via un échangeur de chaleur externe. L'énergie solaire et le ballon d'eau auxiliaire sont reliés par un échangeur de chaleur immergé dans le fond du réservoir d'eau auxiliaire. Un système de production de froid est directement connecté au ballon solaire, et un système de régulation pilote l'installation. Ils utilisent le logiciel TRANSOL sous TRNSYS pour calculer les charges de chauffage et de refroidissement. Introduisez ensuite plusieurs paramètres pour déterminer la taille de l'installation et évaluer leurs performances. Les résultats obtenus sont satisfaisants, le choix du système combiné est très judicieux ainsi que le fait d'utiliser des capteurs solaires sous vide toute l'année (chauffage de l'habitat en hiver, chauffage de l'eau sanitaire le reste de l'année et rafraîchissement en été).
- ❖ **En 2019, K. Kaci et al.**[15]Présentent dans ce travail une étude théorique préparatoire d'un projet expérimental nommé « Intégration de solutions de gestion de l'énergie dans le

bâtiment : concept de bâtiment intelligent à faible consommation d'énergie ». Il consiste en la détermination des besoins énergétiques d'un espace de bureaux ayant une conception bioclimatique réalisé au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER). Une simulation dynamique a été réalisée à l'aide du logiciel Pléiades-Comfie. Les résultats de la simulation ont confirmé la conformité du bâtiment à la réglementation thermique algérienne en été comme en hiver. Les résultats ont également révélé que les besoins de chauffage sont supérieurs aux besoins de refroidissement. Par conséquent, ils recommandent l'intégration d'un système de chauffage solaire.

- ❖ Le chauffage domestique et la production d'eau chaude sanitaire sont les principaux postes de dépenses et de consommation d'énergie. Ils sont également une source de pollution et d'émissions de gaz à effet de serre. **En 2014, F. Sahnoune et al.** [16] Ont proposé un travail, qui est une étude comparative entre le chauffage traditionnel et le chauffage solaire d'une maison individuelle (Le logement étudié est situé dans la ville de Tizi-Ouzou (zone climatique B : très froid en hiver et très chaud en été)) en Algérie. Pour cela, ils ont réalisé un bilan thermique global des différentes déperditions thermiques dans les pièces de la maison. Les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire sont également estimés. Sur la base de ces besoins, la taille du système solaire a été développée. Afin de comparer les performances de l'énergie solaire et des systèmes traditionnels, ils ont réalisé une évaluation économique et déterminé l'impact sur l'environnement. Bien que l'Algérie ait beaucoup subventionné l'énergie conventionnelle, le coût de la production d'énergie solaire thermique est comparé à d'autres sources d'énergie, et une grande quantité de dioxyde de carbone est évitée. Les avantages économiques et environnementaux sont propices au développement du chauffage solaire.
- ❖ Un modèle dynamique permettant de prédire les performances d'une piscine olympique hybride chauffée à l'énergie solaire a été étudié par **M. Merzouk et al. en 2016** [17]. Pour ce faire, le logiciel de simulation TRANSOL (TRNSYS) a été utilisé. Ce travail est de simuler les performances des chauffe-eau solaires, qui sont appliqués pour alimenter

une piscine, a été présenté. Deux technologies ont été comparées pour choisir celle qui convient le mieux à l'installation dans une région sélectionnée. La chaleur produite et la part solaire sont les paramètres clés qui ont été obtenus et utilisés dans la comparaison. Les résultats ont montré que :

- Une part solaire annuelle de l'ordre de 27% est obtenue pour le cas du capteur avec couvercle en verre. Cependant, les chauffe-eau solaires sans vitrage ont montré de meilleures performances que ceux avec vitrage. La part solaire est d'environ 47% (environ deux fois celle du capteur avec vitrage).
- Le bilan économique indique qu'un tel système est rentable avec une période de retour de 9 ans.
- De plus, l'installation d'une telle technologie verte permettrait d'éviter plus de 7149Kg d'émissions de dioxyde de carbone.
- D'autre part, l'amélioration du système est possible en réduisant les pertes par évaporation grâce à une couverture thermique selon l'usage des piscines.

1.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une recherche bibliographique avec toutes les concepts liés au chauffage solaire des bâtiments. Le principe est d'utiliser l'énergie solaire pour le chauffage des locaux pour limiter l'utilisation du chauffage conventionnel (électrique ou à gaz). Cette étude nous a permis de voir les différents travaux qui ont été élaborés sur les systèmes de chauffage solaires. Il existe deux grandes catégories de systèmes, plancher direct où le capteur thermique est lié directement au plancher et plancher indirect où l'eau chaude produite par les capteurs thermiques est stockée dans un réservoir. Ce dernier système est approuvé qu'il soit meilleur car il améliore l'autonomie du système grâce au stockage d'énergie.

CHAPITRE 2 : Modélisation des différents composants d'un système de chauffage solaire

2.1. Introduction

Ce chapitre décrit les équations de base du bilan énergétique qui gouvernent la performance thermique des différents composants de notre système de chauffage solaire proposé à l'étude. Aussi, la modélisation thermique de la maison a été effectuée afin d'établir le bilan énergétique de la maison qui nous permet d'estimer la demande de chauffage à laquelle notre système doit répondre.

2.2. Présentation du système solaire

Le système de chauffage solaire thermique considéré dans cette étude est composé de capteurs plans, réservoir à température homogène (sans stratification), appoint de chauffage à gaz couplé à une maison individuelle à travers un plancher chauffant, en plus de deux pompes, l'une dans le circuit primaire et l'autre dans le circuit secondaire, comme montre la **Figure 2.1**. Les capteurs solaires thermiques captent la lumière du soleil et réchauffent un fluide caloporteur circulant à l'intérieur. Ce fluide rejoint le ballon de stockage où il peut élever la température de l'eau chaude et retourne se réchauffer de nouveau dans les capteurs. Un contrôleur différentiel est utilisé pour gérer la pompe du circuit primaire P1. La pompe P1 déclenche lorsque la température de l'eau à la sortie du capteur solaire est supérieure à celle du haut du ballon d'eau chaude et que la différence entre les deux températures est supérieure à 5°C. Cela permet d'éviter que l'eau chaude du ballon de stockage ne vienne pas réchauffer le circuit solaire en cas d'absence du rayonnement solaire.

Le ballon d'eau chaude est relié à la maison via un plancher chauffant pour un excellent confort thermique. Donc, en cas de besoin d'énergie, l'eau chaude stockée dans le ballon est pompée à travers le plancher chauffant de la maison où elle restitue sa chaleur pour chauffer la maison. Dans le cas où le système solaire n'est pas suffisant pour fournir le chauffage de confort nécessaire à la maison, un système d'appoint (chauffage à gaz conventionnel) est installé entre le ballon et le plancher pour compléter le déficit d'énergie thermique nécessaire pour garder la maison en confort thermique. La pompe du circuit secondaire est contrôlée par un thermostat placé à l'intérieure de la maison. Dès que la température de l'air intérieur de la maison descend

au-dessous de la température de consigne (20°C), la pompe 2 démarre et l'eau chaude est fournie au plancher.

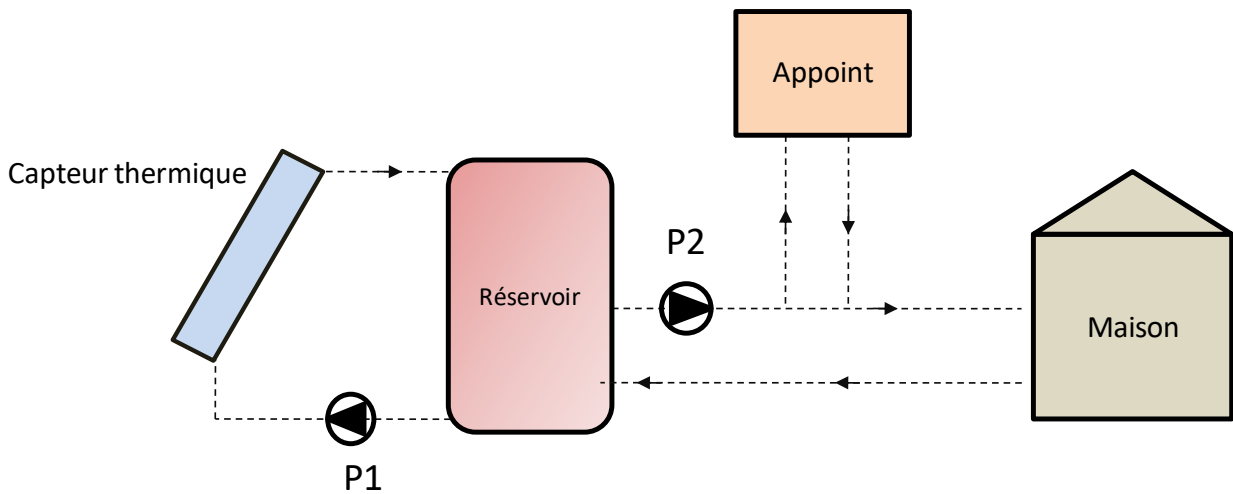


Figure 2.01 Schémas du système de chauffage solaire étudié

2.3. Bilan thermique de la maison

Le confort physiologique de l'homme, nécessite le maintien d'une température de confort dans les locaux qui l'abritent. L'objectif visé consiste à établir un bilan thermique d'une maison individuelle de superficie totale de 60.795 m^2 . (**Figure 2.2**)

La maison est située à Alger, composée de :

- Deux chambres à coucher.
- Une cuisine.
- Une pièce de séjour.
- Un hall.
- Une salle de bain.

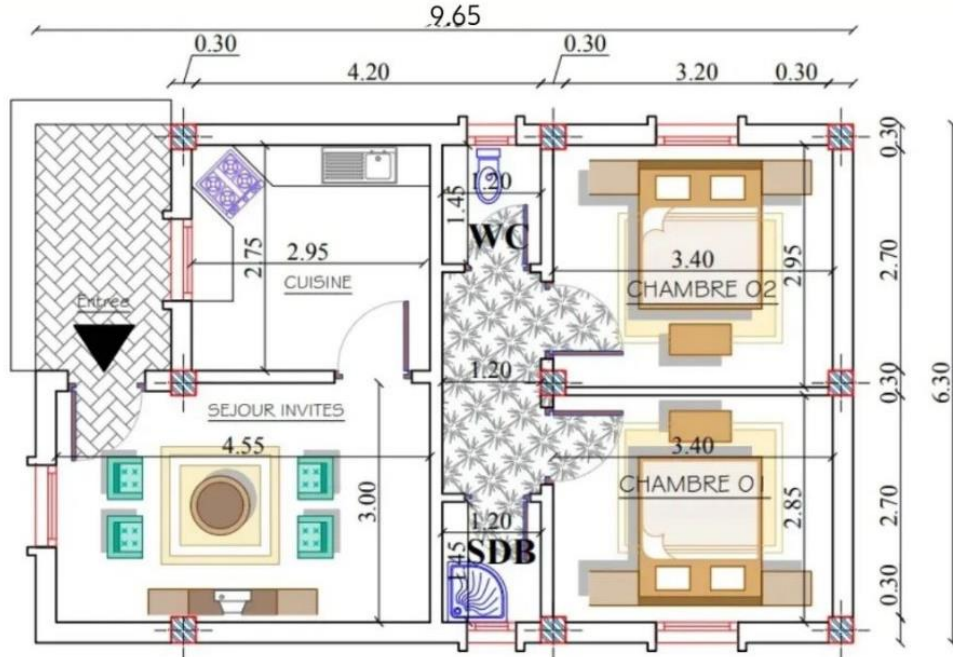


Figure 2.02 Plan d'aménagement de la maison

Le bilan thermique de la maison peut être prédit avec précision en se basant sur la modélisation dynamique des différents flux échangés au niveau d'un volume d'air, comme suit :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{inter} + \dot{Q}_{clp} \quad (2.1)$$

Où :

Q_{surf} – Flux de chaleur convectif de toute la surface intérieure.

$$Q_{surf} = h_c \rho_a c p_a (T_{surface,i} - T_{int}) \quad (2.2)$$

Q_{inf} – Gain d'infiltration du flux d'air extérieur.

$$Q_{inf} = \dot{m}_{inf} \rho_a c p_a (T_{ext} - T_{int}) \quad (2.3)$$

Q_{vent} – Les gains de ventilation provenant du système de conditionnement d'air.

$$Q_{vent} = \dot{m}_{vent} \rho_a c p_a (T_{vent,i} - T_{int}) \quad (2.4)$$

Q_{inter} – Gains internes de convection. (Occupation, éclairage et appareils électroménagers)

$$Q_{inter} = h_c \rho_a c p_a (T_s - T_{int}) \quad (2.5)$$

Q_{clp} – Les gains résultant d'un flux d'air convectif de la zone adjacente ou de la condition aux limites

$$Q_{clp} = \dot{m}_{j \rightarrow i} \rho_a c p_a (T_{zone,i} - T_{int}) \quad (2.6)$$

2.4. Modélisation du système de chauffage solaire

2.4.1. Capteur solaire plan

A l'état stationnaire, l'énergie utile, Q_u collectée par le capteur thermique peut être liée au rayonnement solaire incident, G et d'autres pertes thermiques et optiques par la formule suivante:[18]

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [G(\tau\alpha) - U_g(T_{c,e} - T_a)] \quad (2.7)$$

Q_u : Puissance utile du capteur (W).

A_c : Surface de capteur (m²).

U_g : Coefficient de transfert de chaleur global (W/m² K).

$T_{c,e}$: Température d'entrée de fluide caloporteur (K).

T_a : Température ambiante (K).

τ : Transmittivité du couvercle du vitrage.

α : Absorptivité de la surface plate du récepteur.

G : Le rayonnement global incident sur le plan incliné de capteur (W/m²).

F_R : Facteur de conductance thermique.

Le rendement thermique du capteur, qui est le rapport entre l'énergie utile produite et le rayonnement solaire incident sur le plan du capteur, peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \cdot G} = \frac{\dot{m}_c \cdot c p (T_{c,s} - T_{c,e})}{A_c \cdot G} \quad (2.8)$$

\dot{m}_c : Débit massique du capteur (kg/h)

$T_{c,e}$: Température de sortie du fluide caloporteur (K).

La température de sortie est donnée par l'équation :

$$T_{c,s} = T_{c,e} + \frac{\eta \cdot A_c \cdot G}{\dot{m}_c \cdot c_p} \quad (2.9)$$

En combinant les équations (7) et (9), on obtient :

$$T_{c,s} = T_{c,e} + \frac{A_c \cdot F_R \cdot [G(\tau\alpha) - U_g(T_{c,e} - T_a)]}{\dot{m}_c \cdot c_p} \quad (2.10)$$

Cette dernière équation permet de déterminer la surface du champ des capteurs A_c requise pour atteindre la température de sortie désirée.

2.4.2. Réservoir de stockage

Le modèle du réservoir de stockage est supposé entièrement mélangé (sans stratification) et sans serpentin. La température moyenne du réservoir est estimée en utilisant le bilan énergétique :

$$M_{resv} c_p \frac{dT_{resv}}{dt} = \dot{m}_e c_p (T_{1e} - T_{1s}) + \dot{m}_s c_p (T_{2e} - T_{2s}) + U_{resv} \times A_{resv} \times (T_{env} - T_{resv}) \quad (2.11)$$

\dot{m}_e Débit massique à l'entrée du réservoir (kg/h).

\dot{m}_s Débit massique à la sortie du réservoir.

T_{1e} Température à l'entrée 1 du réservoir.

T_{1s} Température à la sortie 1 du réservoir.

T_{2e} Température à l'entrée 2 du réservoir.

T_{2s} Température à la sortie 2 du réservoir (K).

c_p Chaleur spécifique de l'eau (kJ/kg K)

$M_{rés}$ Masse du réservoir (kg).

T_{env} Température d'environnement (K)

$A_{rés}$ Surface extérieure du réservoir (m²)

U_{resv} Coefficient de transfert global (W/m². K)

Le volume du stockage est calculé en fonction de la surface de captage comme suit :
(d'après la littérature et la valeur de θ est environ de $60 \text{ (l/m}^2\text{)}$ [19])

$$V_{resrv} = \theta \cdot A_c \quad (2.12)$$

θ : Volume par surface de captage (l/m^2)

2.4.3. Appoint

La capacité nominale de l'appoint (chauffage auxiliaire, CH) est calculée sur la base de la demande maximale en chauffage.

$$C_{CH} = \eta_{CH} \cdot \dot{Q}_{ch.max} \quad (2.13)$$

La quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'entrée du fluide à la température de consigne est donnée par :

$$Q_{CH} = \dot{m} \cdot cp (T_{consigne} - T_e) \quad (2.14)$$

La température de sortie du fluide est calculée comme suit:[20]

$$T_s = T_e + \frac{C_{CH}}{\dot{m} \cdot cp} \quad (2.15)$$

2.4.4. Pompes

Le débit massique \dot{m}_1 de la pompe du circuit primaire P1 est aussi calculé en fonction de la surface de captage. (d'après la littérature et $\varphi = 40 \text{ kg/h. m}^2$) [21]

$$\dot{m}_1 = \varphi \cdot A_c \quad (2.16)$$

φ : Volume par surface de captage (kg/h.m^2)

Le débit massique \dot{m}_2 de la pompe du circuit secondaire P2 est calculé sur la base de la demande de chauffage maximale.

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{Q}_{ch.max}}{cp \cdot \Delta T} \quad (2.17)$$

Avec : Différence de température nominale $\Delta T = 5^\circ\text{C}$.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation mathématique détaillée des principaux éléments qui composent notre système solaire a été effectuée. Ces éléments incluent le capteur thermique solaire, le réservoir de stockage, l'appoint et le plancher chauffant. Aussi, le bilan thermique de la maison à laquelle notre système est connecté, a été modélisé. Les débits massiques circulant dans deux circuits et la taille du champ de capteurs et le volume du réservoir son également modélisés. Enfin, un indicateur de performance de notre système solaire a été la fraction solaire est un indicateur qui nous permet d'évaluer la performance énergétique de notre système solaire.

CHAPITRE 3 : Simulation dynamique du système solaire sous TRNSYS

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler dynamiquement notre système solaire à l'aide du logiciel TRNSYS. Le système doit assurer le chauffage d'une maison individuelle de surface totale de 60.795 m². D'abord, la maison est simulée à l'aide du module TRNBUILD dans le but d'établir le bilan thermique qui consiste essentiellement de calculer les besoins en chauffage horaire, mensuels et totaux. Ensuite, le système global, le système solaire couplé à la maison étudiée, est simulé sous le module STUDIO. En plus, tous les paramètres des différents composants et du système global sont établis.

3.2. Présentation du logiciel TRNSYS

TRNSYS (Transient System Simulation program) est un logiciel complet, modulaire et flexible pour la simulation dynamique des systèmes, y compris les bâtiments multizones. La simulation dynamique des bâtiments et des systèmes permet de prédire leur comportement énergétique en fonction des changements apportés sur la stratégie de contrôle des équipements.[22]

Les composants de TRNSYS, aussi appelés TYPES, représentent chacun un élément du système étudié : capteur solaire, tuyau, pompe, réservoir, vanne etc. Ils comportent chacun des entrées, des sorties et des paramètres de simulation que l'utilisateur saisit sur l'interface visuelle Simulation Studio. (Figure 3.1)

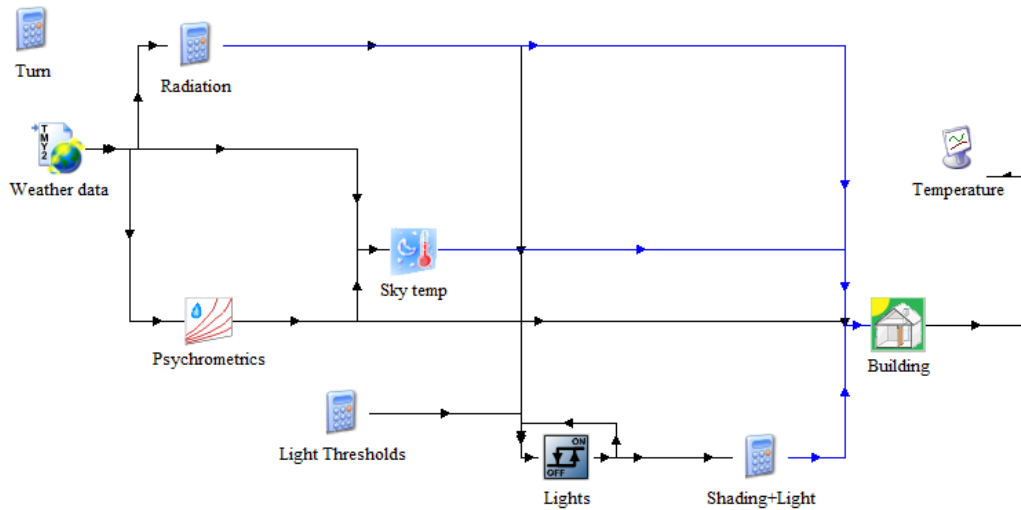


Figure 3.01 L'interface de TRNSYS

TRNBUILD est un module du logiciel TRNSYS pour la simulation de bâtiments multizones. Pour cela dans un premier temps il faut définir des zones thermiques avec plusieurs paramètres : l'orientation de la maison par rapport au soleil, la composition des matériaux pour chaque paroi de la zone, le type de fenêtres et leurs superficies, les températures de consigne et les gains internes. Nous pouvons ainsi créer et modéliser le comportement thermique d'un bâtiment en juxtaposant plusieurs zones.

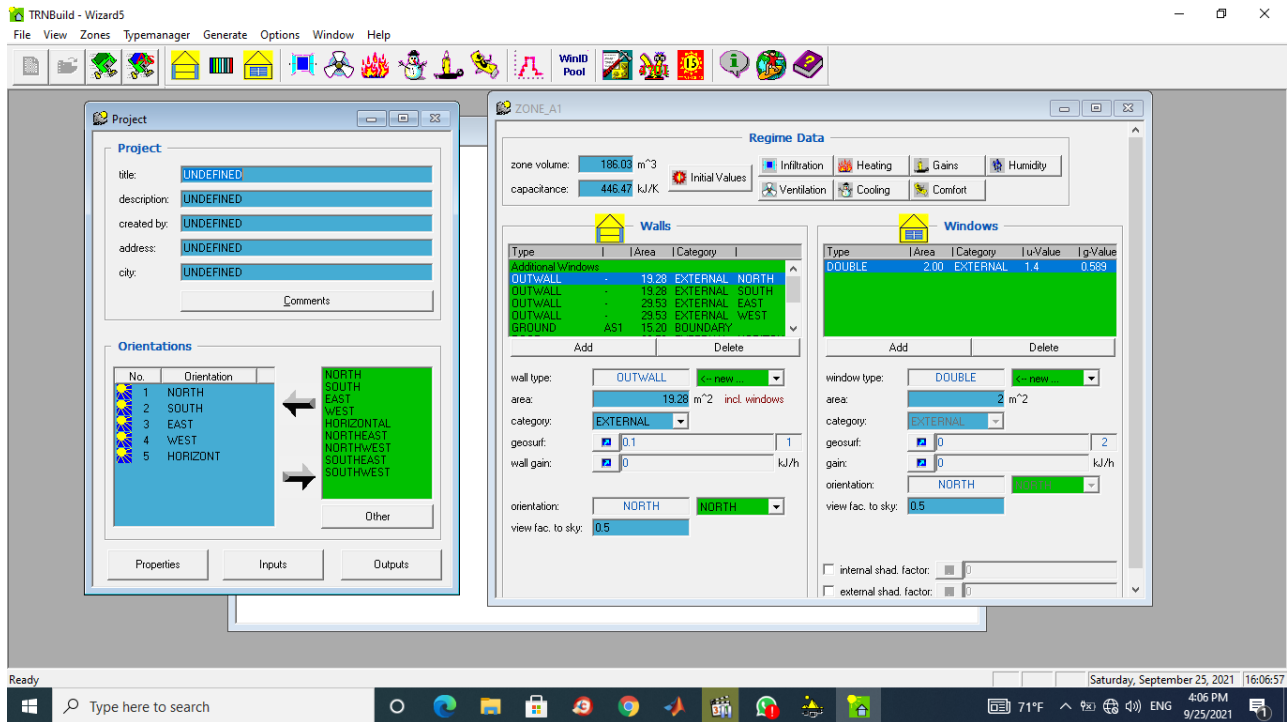


Figure 3.02 Création du fichier Maison.bui sur l'interface TRNBUILD

Une fois le bâtiment modélisé sur TRNBUILD, le fichier Maison.bui est créé et sera lu par le TYPE (Building) lors de la première simulation sur TRNSYS.

3.3. Système de chauffage sous TRNSYS

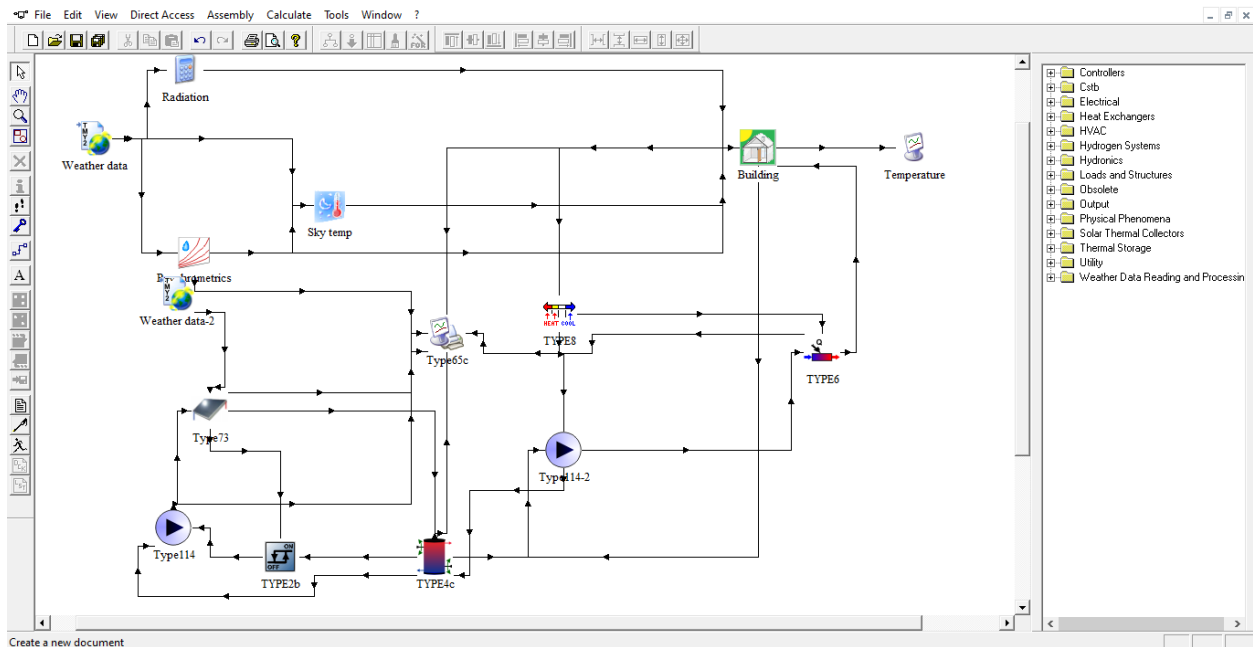


Figure 3.03 Interface de la simulation de chauffage solaire d'une maison sous TRNSYS

3.3.1. Données climatiques

La longitude : 3.00E

La latitude : 36.45N

L'altitude : 116m

Les données météorologiques de la ville d'Alger sont générées par Météo-norme et modélisées par TYPE 109. Le TYPE 56 est relié à 4 composants pour tenir compte des conditions climatiques dans lesquelles la maison a été modélisée :

- TYPE 109: un fichier météo issu de la base de données METEONORM incluse dans les bibliothèques de TRNSYS[23]. Il fournit des informations sur les températures ambiantes, la radiation solaire, le taux d'humidité, la pression sur une année type pour plusieurs villes à travers le monde. Dans notre cas, nous avons utilisé le fichier météo d'Alger.
- TYPE 33e : une table psychométrique qui permet de déterminer la température de rosée extérieure;

- TYPE 69b : permet de déterminer la température effective du ciel nécessaire pour évaluer les pertes de l'enveloppe du bâtiment vers le ciel, sous forme de radiation;

Ces quatre composants associés au TYPE 56 permettent au final de modéliser avec précision les conditions extérieures auxquelles le système de chauffage et de climatisation doit remédier pour répondre aux besoins de confort des habitants. Ainsi, une fois la simulation effectuée pour une période annuelle, le TYPE 56 fournit un fichier Charges_Totales.txt qui correspond au profil de charges du bâtiment, selon les informations contenues dans le fichier Maison.bui.

La **Figure 3.4** montre la température moyenne annuelle et la **Figure 3.5** le rayonnement solaire à Alger. La région d'Alger est caractérisée par un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs mais des hivers doux et pluvieux. Les températures sont plutôt uniformes : la température moyenne journalière (maximale et minimale) tourne autour de 11 °C - 12 °C en janvier, le mois le plus froid de l'année, alors que la température moyenne journalière (maximale et minimale) tourne autour de 25 °C - 26 °C en juillet - août, les mois les plus chauds de l'année. Le rayonnement solaire varie entre 70 kWh/m² en hiver et de plus 200 kWh/m² en été.

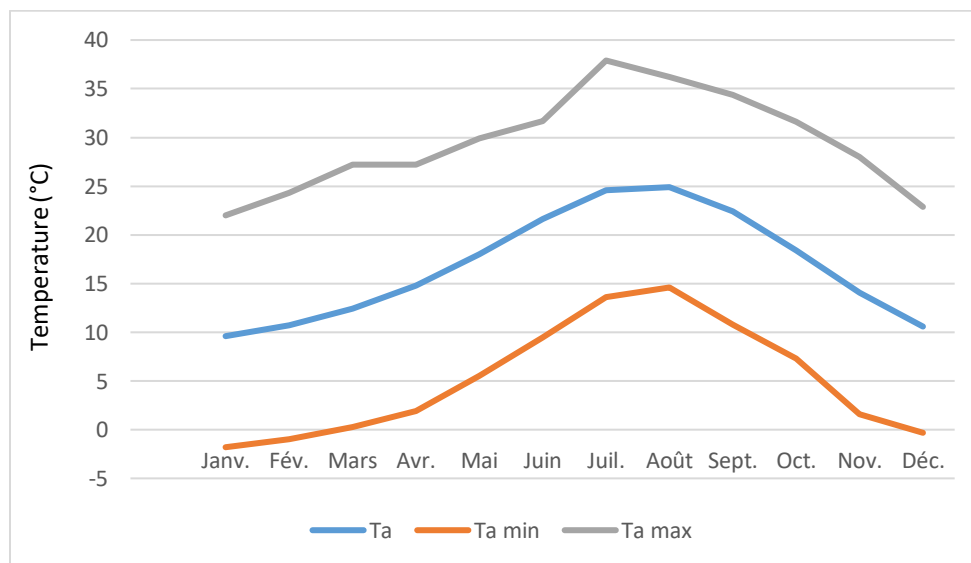


Figure 3.4 Variation de La température moyenne annuelle à Alger[24]

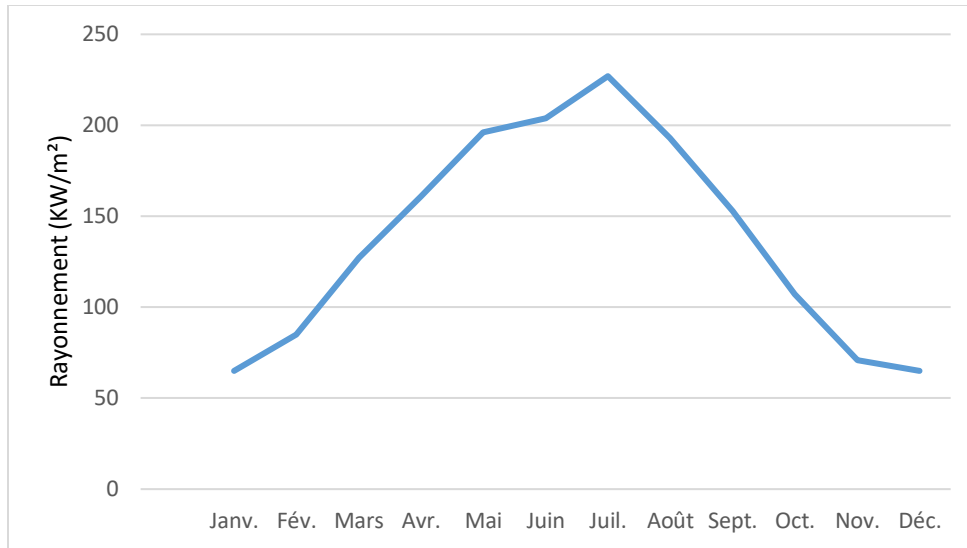


Figure 3.05 Rayonnement solaire (en KWh/m²)[24]

3.3.2. Capteur thermique

Modèle TRNSYS : **Type 73** Ce composant modélise les performances thermiques d'un capteur plan théorique. Le réseau de collecteurs total peut être constitué de collecteurs connectés en série et en parallèle. Les performances thermiques de l'ensemble du réseau de capteurs sont déterminées par le nombre de modules en série et les caractéristiques de chaque module. Ce modèle permet les analyses théoriques d'une plaque plane. Le modèle est en régime permanent. Le **Tableau 3.1** présente les paramètres du capteur thermique utilisé dans la simulation.

Tableau 3.1 Paramètre du capteur thermique

Paramètre	Valeur	unité
Surface brute	2	[m ²]
Inclinaison	45	[°]
Chaleur spécifique	4.19	kJ/kg. K
Coefficient de pertes thermiques de capteur	3	kJ/h*m ² *K
Rendement du capteur	0.7	-

3.3.3. Réservoir de stockage

Modèle TRNSYS : **Type 4** Les performances thermiques d'un réservoir de stockage d'énergie sensible rempli de fluide, sans stratification thermique. Cette instance de **type 4** modélise un réservoir **non stratifié**. Le **Tableau 3.2** présente les paramètres du réservoir de stockage utilisé dans la simulation.

Tableau 3.02 Paramètre du réservoir du stockage

Paramètre	Valeur	Unité
Type	Non stratifié	-
Volume	500	litre
Hauteur	2	M
Coefficient de perte thermique	0.694	W.m ² /K
Densité du fluide	1000	kg/m ³
Chaleur spécifique	4.19	kJ/kg. K

3.3.4. Pompes à vitesse simple

Modèle TRNSYS : Le **Type 114** modélise une pompe à vitesse unique (constante) capable de maintenir un débit massique de sortie de fluide constant. Le **Tableau** présente les débits massiques des différentes pompes de l'installation solaire.

Tableau 3.03 Débits massiques des différentes pompes

	Débit	Unité
P_circuit primaire	320	Kg/h
P_circuit secondaire	500	Kg/h

3.3.5. Contrôleur différentiel avec hystérésis (Type 2)

Le régulateur différentiel (on/off) génère une fonction de régulation qui peut avoir la valeur 1 ou 0. La valeur du signal de régulation est choisie en fonction de la différence entre les températures hautes du capteur thermique et basse du ballon de stockage.

3.3.6. Thermostat d'ambiance à 3 étages (Type 8)

Un thermostat d'ambiance à trois étages est modélisé pour produire trois fonctions de contrôle marche/arrêt qui peuvent être utilisées pour contrôler un système doté d'une source de chaleur solaire, d'un chauffage auxiliaire et d'un système de refroidissement. Le contrôleur commande le refroidissement à des températures ambiantes élevées, le chauffage du premier étage (source solaire) à des températures ambiantes plus basses et le chauffage du deuxième étage (source auxiliaire) à des températures ambiantes encore plus basses. Dans notre cas, ce thermostat est utilisé pour contrôler la pompe du circuit secondaire. La valeur du signal est choisie en fonction de la température de la maison.

3.3.7. Bâtiment multizone

La maison étudiée dans ce projet est une maison individuelle située à Alger le nord de l'Algérie. Sa superficie totale est de 60.795m^2 elle est composée de deux chambres et un séjour. Dans notre cas, l'enveloppe de la maison (murs extérieurs, plancher et plafond) est isolée. En plus, les fenêtres sont en double vitrage dont la surface est de 8m^2 . On suppose que l'orientation de la maison est Nord-Sud pour capter mieux le rayonnement solaire en hiver, d'une part et améliorer la ventilation naturelle en hiver. Les propriétés thermo-physiques de l'enveloppe et des fenêtres sont présentées dans le **Tableau 3.4**.

Tableau 3.4 Valeurs de U de différents éléments de l'enveloppe

Couches	Composition	Epaisseur (m)	Valeur de U (W/m ² .K)
Mur	Brique creuse	0.12	0.33
	Polystyrène	0.09	
	Brique creuse	0.10	

Plancher	Polystyrène	0.06	0.36
	Béton	0.06	
	Ciment	0.05	
Plafond	Béton	0.03	0.23
	Polystyrène	0.16	
	Hourdis	0.20	
	Ciment	0.05	
Fenêtre	Double vitrage	-	1.10

Les différents paramètres utilisés dans l'estimation de la demande de chauffage de la maison étudiée sont présentés dans le **Tableau 3-4**. Ces paramètres sont détaillés ci-dessous[25]:

- Les gains internes sont les charges thermiques (sensible et latente) dégagées par les occupants, l'éclairage et les appareils électroménagers (télévision, réfrigérateur, ordinateur, ... etc.). Ces gains contribuent à l'amélioration du confort thermique en hiver mais ils augmentent la charge de rafraîchissement en été. Ils contiennent généralement une part radiative et une part convective.
- Le débit de renouvellement d'air est défini par le nombre de volume d'air de la zone échangé avec le milieu extérieur chaque heure (Vol/h). Ce dernier constant ou variable (scénario).
- Pour calculer la demande énergétique de chauffage d'une maison, une température de consigne doit être définie par l'utilisateur. C'est la température à laquelle la température interne doit être inférieure et les occupants se sentent le confort.
- Les données du régime requises, telles que le volume (m^3) et la capacitance (kJ/K) de l'air dans la zone thermique, la température initiale ($^{\circ}C$) et l'humidité relative initiale (%) de l'air de la zone.

Tableau 3.5 Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur	Unité
Température initiale (Maison)	20	$^{\circ}C$
L'humidité relative	50	%
Volume	186.03	m^3
Capacitance	230.4	kJ/K

Gain thermique par personne	115 (75 sensible and 40 latent)	W
Gain thermique par l'éclairage	15	W/m ²
Gain thermique par appareils	30	W/m ²
Température de consigne	25	°C
Infiltration d'air	0.6	Vol/h

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, la simulation dynamique d'un système de chauffage solaire en utilisant le logiciel TRNSYS a été présentée. D'abord, nous avons construit le modèle global de simulation de notre système solaire en choisissant pour chaque composant, un TYPE approprié sélectionné à partir de la bibliothèque TRNSYS. Ensuite, une étude détaillée de chaque composant a été effectuée. Dans ce cas, nous avons déterminé pour chaque composant les paramètres de simulation, les entrées, les sorties et les paramètres. Les résultats de simulation dynamique seront présentés et interprétés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4: Résultats de simulations et interprétations

4.1. Introduction

Dans le précédent chapitre, nous avons établi les différents modèles utilisés dans la simulation d'un système de chauffage solaire. Le logiciel TRNSYS 16.0 nous permet de connecter ces différents modèles, et de résoudre les différentes équations pour chaque pas de temps. Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation dynamique. Le système doit produire l'eau froide pour rafraîchir une maison individuelle typique sous les conditions climatiques de la région d'Alger (Algérie).

4.2. Demande de chauffage de la maison

Pour pouvoir étudier la performance énergétique de notre système solaire, il est nécessaire d'établir la puissance de chauffage maximale à laquelle ce dernier doit répondre. La **Figure 4.1** représente la demande mensuelle de chauffage de la maison étudiée. On peut observer clairement que plus le mois est froid plus la demande est importante. En effet, la demande est maximale en mois de Janvier (564 kWh) et minimale en mois d'Avril (124 kWh). La demande de chauffage totale est **2092 kWh**.

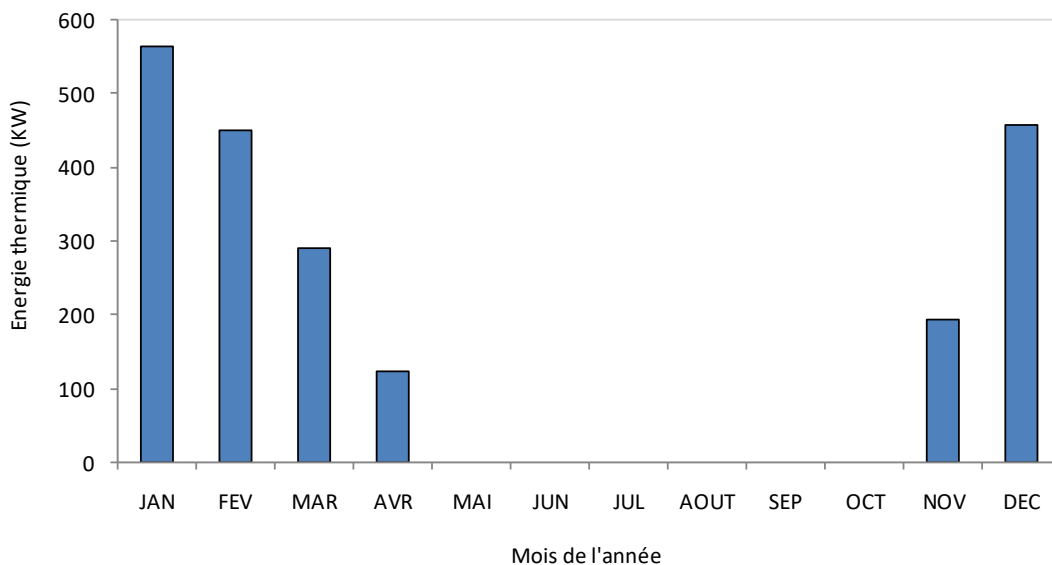


Figure 4.1 La demande mensuelle de chauffage de la maison étudiée.

La demande de chauffage horaire, heure par heure, est présentée dans la **Figure 4.2**. On peut remarquer que la demande horaire est maximale en mois de Janvier avec un maximum d'environ 1.5 kWh. Donc, un appoint de 2 kW de capacité doit être considéré dans notre système.

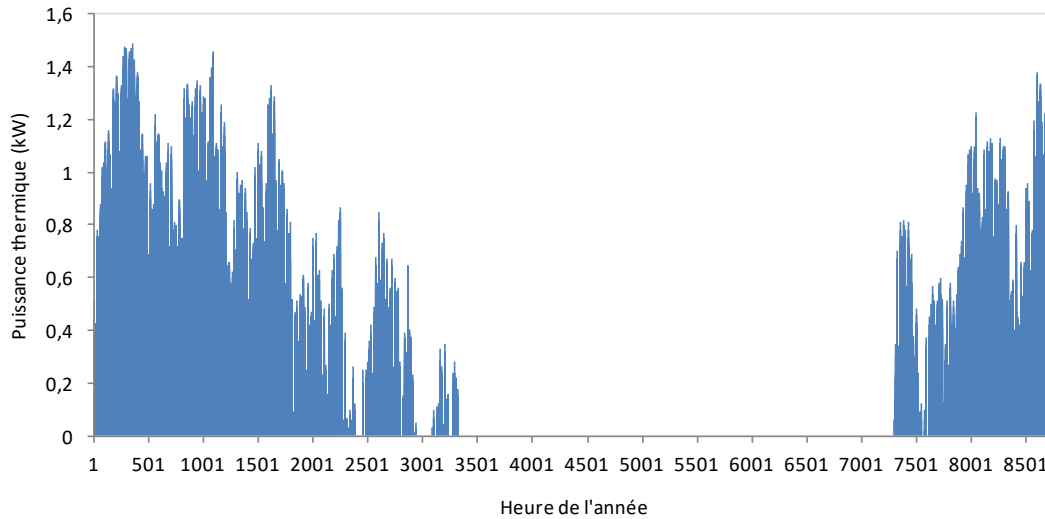


Figure 4.02 La demande de chauffage horaire, heure par heure,

4.3. Performance du système de chauffage solaire

La performance énergétique du système solaire considéré dans ce travail est étudiée en prenant une surface de captage de 8 m², un volume du réservoir d'eau chaude de 500 litres, un débit massique de 320 kg/h et un appoint de capacité de 2 kW. La période de chauffage, allant du mois d'Octobre à Mars, est considérée dans la simulation, avec un pas de temps d'une heure.

4.3.1. Résultats journaliers

Les résultats de simulation journaliers du système solaire sont présentés en analysant les évolutions des températures et des puissances des principaux composants du système durant une journée type, comme indiquent les **Figures (4.3)** et **(4.4)**.

On observe sur ces figures que durant la nuit et les premières heures du matin (de 1:00 pm à environ 10:00 am), la température dans le ballon d'eau chaude est au-dessous de la température de consigne de chauffage (30°C) à cause des pertes thermiques vers l'extérieur durant la journée précédente et l'absence du rayonnement solaire. Durant cette période de la journée, le chauffage de la maison est assuré par l'appoint. Par conséquent, la température intérieure de la maison reste au-dessus de la température de confort (20°C). La puissance thermique fournie par la pompe du circuit secondaire est de 2kW.

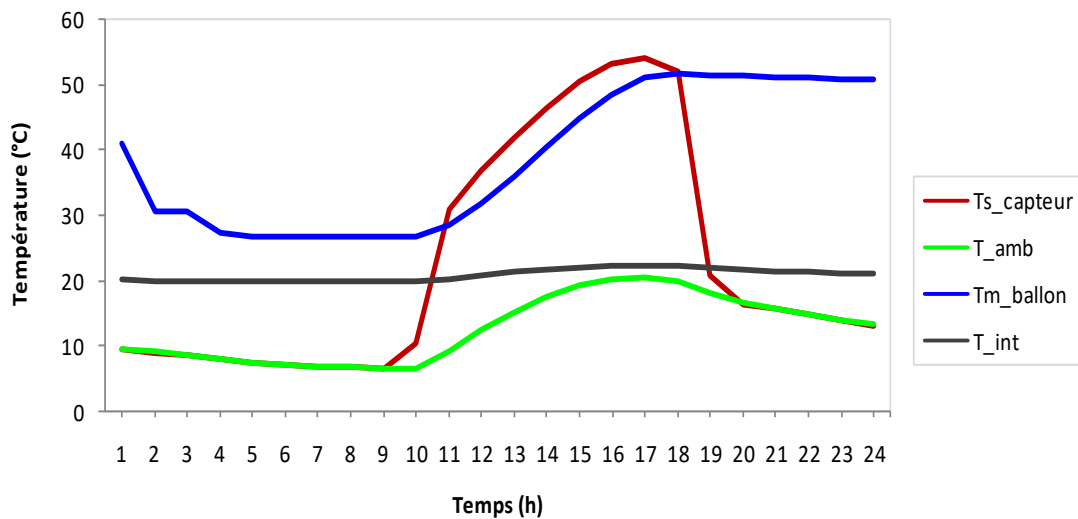


Figure 4.03 Les évolutions des températures des principaux composants du système durant une journée type.

A 9:00 am, avec le lever du soleil et la présence du rayonnement solaire, la pompe solaire du circuit primaire est activée et l'eau chaude commence à circuler dans le circuit solaire. Donc, la température à la sortie du capteur thermique augmente grâce aux gains thermiques. A 10:00 am, lorsque l'énergie thermique produite par les capteurs est suffisante, la température dans le ballon d'eau chaude commence à augmenter et atteint la température de consigne (30°C). En même

temps, l'énergie thermique stockée dans le réservoir est transférée vers le plancher chauffant de la maison, via la pompe du circuit secondaire, pour maintenir la température intérieure au-dessus de 20°C. Cette dernière atteint une valeur maximale (plus 2.5kW) au milieu de la journée. On remarque aussi que la quantité d'énergie produite par les capteurs thermiques (Q_{capt}) et celle transférée du réservoir vers le plancher (Q_{ballon}) sont proportionnelles à la quantité d'énergie incidente sur les plans des capteurs (Q_{sol}). Les pertes thermiques augmentent en fonction de la quantité d'énergie stockée dans le ballon.

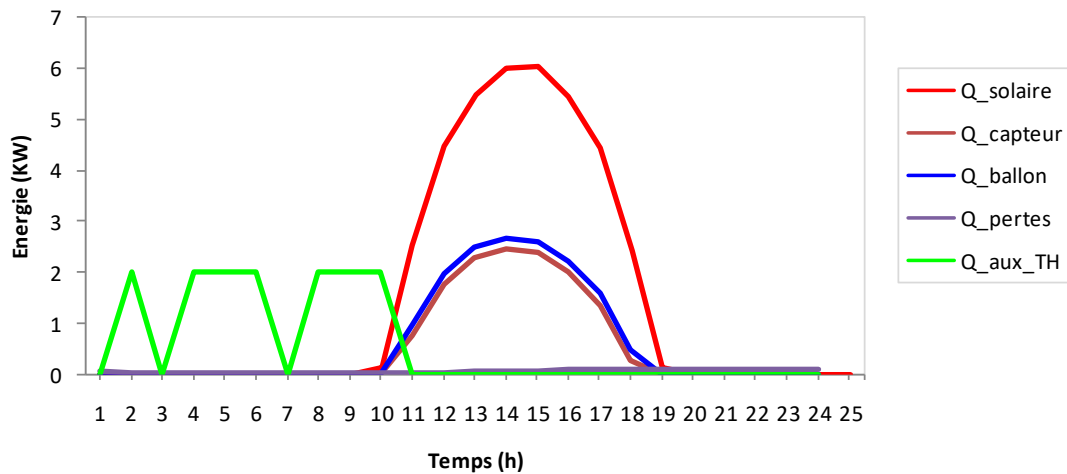


Figure 4.04 Les évolutions des puissances des principaux composants du système durant une journée type.

4.3.2. Résultats mensuels

La **Figure 4.5**. Présente la répartition mensuelle de l'énergie thermique produite par les capteurs thermiques et celle fournie par l'appoint et la fraction solaire correspondante (FS). La fraction solaire du système étudié est déterminée comme le rapport entre l'énergie thermique produite par le capteur solaire thermique et la quantité de chaleur fournie par l'appoint. Le total des deux énergies représente la quantité d'énergie thermique requise pour assurer le confort thermique intérieure de l'habitation durant toute la période de chauffage.

$$FS = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_c + \dot{Q}_{CH}}$$

On peut remarquer que plus le mois est froid, plus Q_{aux} est importante. Par conséquent, plus le mois est froid, plus FS est faible. Par exemple, en mois de Janvier la FS est minimale (0.38) et Q_{aux} est maximale (456) à cause de la haute demande en chauffage (738 kW). Le contraire est observé en mois d'Avril où la FS est maximale (0.90) car la demande en chauffage est faible (251 kW).

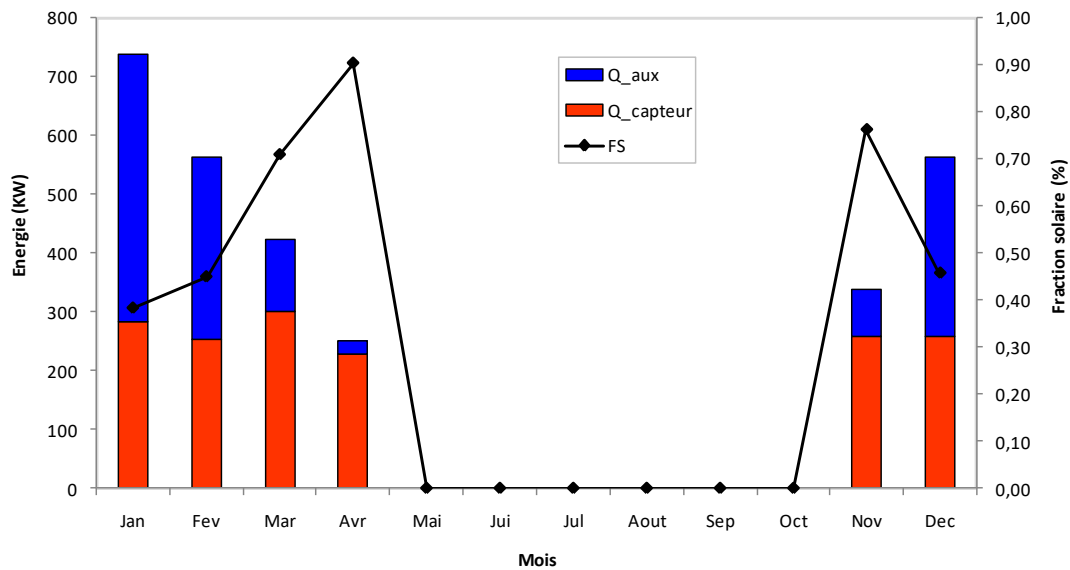


Figure 4.05 Energies thermiques mensuelles produite par les capteurs et fournie par l'appoint, et la fraction solaire.

Le **Tableau 4.1.**Représente le bilan total du système de chauffage. La quantité d'énergie totale produite par les capteurs thermiques (1574 kWh) est incapable de répondre aux besoins totaux de chauffage de la maison mais elle représente plus de la moitié (55%). Donc, l'utilisation de l'appoint (1298 kWh) permet de compléter cette demande et de maintenir la maison en confort.

Tableau 4.1. Bilan total du système de chauffage solaire

Energie	Q_solaire	Q_capteur	Q_ballon	Q_pertes	Q_aux	FS
Valeur (kWh)	5466	1574	1885	322	1298	0,55

4.4. Etude paramétrique :

4.4.1. Influence de l'angle d'inclinaison

L'influence de l'angle d'inclinaison des capteurs sur la fraction solaire est étudiée en variant l'inclinaison de ces derniers de 10 à 60°. Comme indique la **Figure 4.6**, la fraction solaire augmente de 0.72 à 0.95% avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison de 10 à 45°. Après un angle d'inclinaison de 45°, la fraction solaire devient presque constante.

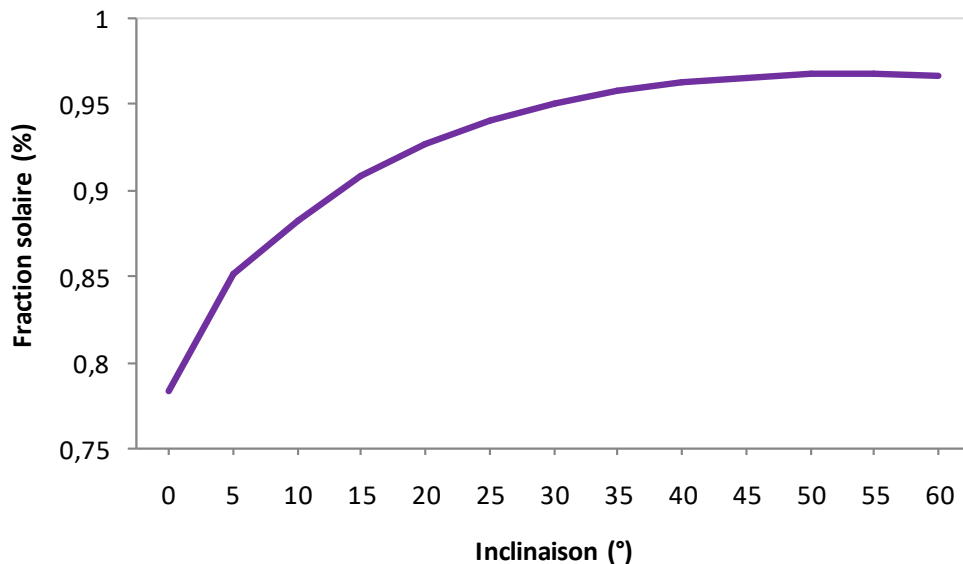


Figure 4.06 Influence de la surface de l'inclinaison des capteurs (%).

4.4.2. Influence de la surface de captage

Pour déterminer l'impact de la surface du champ de capteurs sur la performance du système, différentes surfaces sont considérées de 2 à 40 m². La valeur initiale du volume du réservoir est prise 70 L/m², alors que le débit massique est considéré 50 kg/h.m². La variation de la fraction

solaire en fonction de la surface de captage est présentée dans la **Figure 4.7**. Les résultats montrent que l'augmentation de la surface de 2 à 10 m², augmente fortement la solaire fraction du système. A une surface de 10 m², la fraction solaire est égale à 0.69%. Entre 10 et 20 m², l'augmentation de fraction solaire devient moins importante. La solaire fraction à 20 m² atteint 0.92%. Après 20 m², la fraction solaire devient presque constante. Une fraction solaire de 0.99% est enregistrée à m² Par conséquent, la taille adéquate de la surface du champ de capteurs peut être considérée 20m².

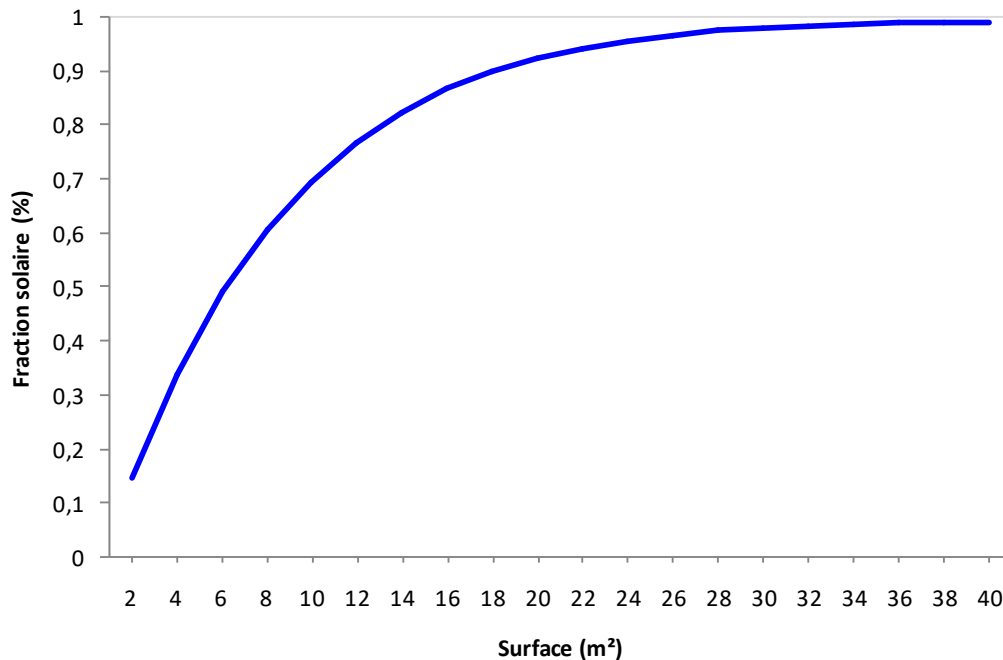


Figure 4.07 Influence de la surface du champ de capteurs.

4.4.3. Influence du volume du réservoir

L'influence du volume de réservoir sur la fraction solaire du système de chauffage est étudiée pour différents volume de 10 à 100 L/m², comme indiqué sur la **Figure 4.8**. Une surface de captage de 20 m² est considérée. On peut remarquer que l'impact du volume n'est pas important en comparaison avec l'impact de la surface de captage. La solaire fraction augmente rapidement (de 72 à 86%) pour des volumes entre 10 et 20 L/m². Pour des volumes entre 20 et 40 L/m², la solaire fraction augmente graduellement. Après 40 L/m², l'augmentation devient très faible à

cause des pertes thermiques. Considérant une surface de captage de 20m², un volume de 800 L (40/m²) représente une capacité optimale du réservoir.

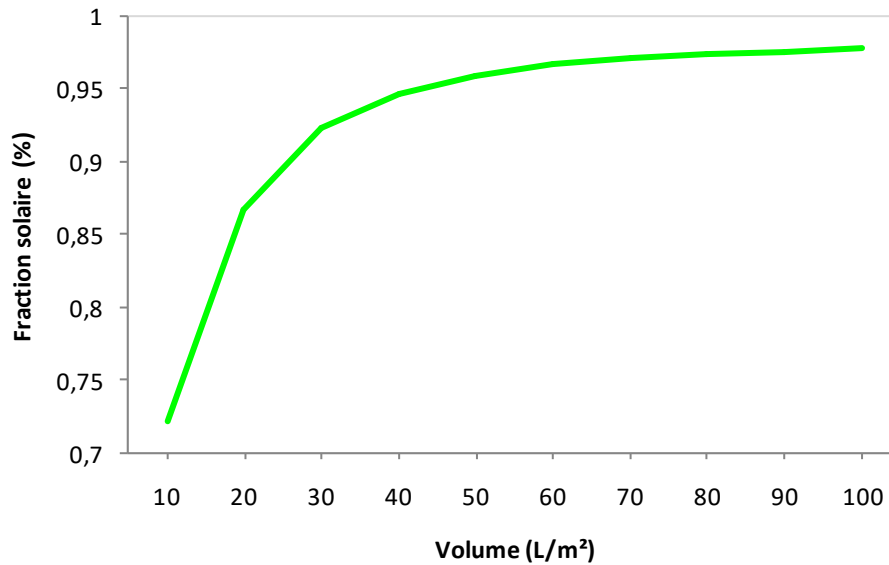


Figure 4.08 Influence du volume du réservoir de stockage

4.4.4. Influence du débit massique

L'effet du débit massique dans le circuit solaire sur la fraction solaire est simulé en considérant les valeurs optimales de la surface du champ des capteurs et du volume du réservoir (20 m² et 800 L). Différents débits massiques sont considérés de 5 à 30 kg/h.m², comme présenté sur la **Figure 4.9**. On peut remarquer clairement que l'influence de la variation du débit massique sur la fraction solaire est insignifiante. Une faible augmentation (de 92 à 97 %) est enregistrée entre 5 et 20 kg/(h.m²).

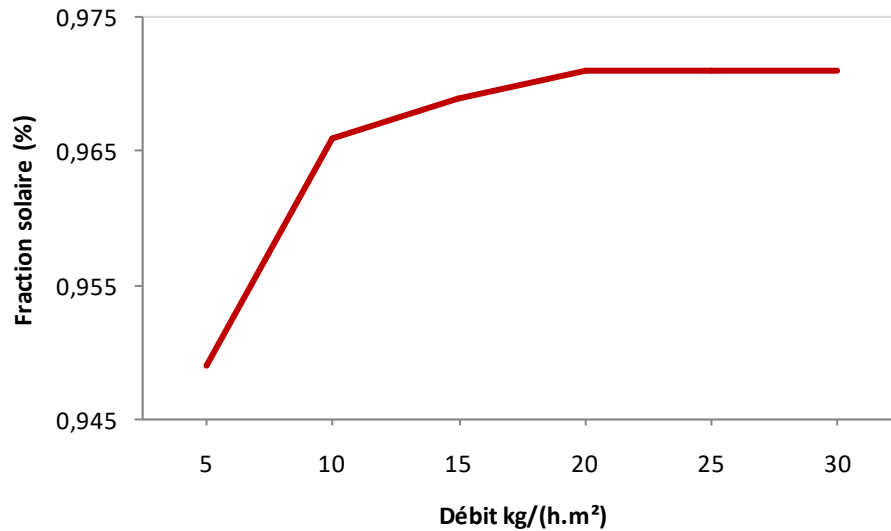


Figure 4.9 Influence du débit massique dans le circuit primaire

4.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté et discuté les résultats de la simulation dynamique de notre système solaire étudié. Les résultats montrent que le système solaire est capable d'assurer 55% des besoins de chauffage de la maison étudiée. Le reste est complété par le système d'appoint notamment durant les mois les plus froids (Décembre et Janvier). L'étude paramétrique montre que la surface a une grande influence sur la performance énergétique du système complet en comparaison du volume et du débit massique. Ces résultats nous a permis de déduire les tailles optimales des différents composants du système solaire. La surface de captage maximale est de 20m² et le volume et de 800 Let le débit massique et 40L/m².

CONCLUSION GENERALE

Dans le présent travail nous avons étudié un système de chauffage solaire pour le chauffage d'une habitation unifamiliale typique Algérienne sous les conditions climatiques de la région d'Alger. Dans le premier chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des différents systèmes de chauffage solaire des bâtiments. Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous avons fait une modélisation mathématique des différents équipements du système solaire étudié ainsi que l'habitation considérée. Puis, un modèle global du système étudié couplé à l'habitation sous l'environnement TRNSYS a été construit dans le troisième chapitre. Un système de régulation efficace a été aussi intégré dans le système pour améliorer la performance du système. Enfin le dernier chapitre consiste à exécuter le programme TRNSYS conçu dans le chapitre précédent et à interpréter les résultats obtenus.

Les résultats de simulation fournis dans ce travail montrent que le système de chauffage solaire étudié est capable de répondre à une part importante de la demande de chauffage de la maison. Mais, l'utilisation de l'appoint est nécessaire pour chauffer la maison durant la nuit et lorsque le rayonnement solaire est insuffisant surtout durant les mois les plus froids de l'année (Décembre et Janvier). La quantité d'énergie thermique annuelle produite par le champ de capteur et l'appoint sont 1574 kWh et 1298 kWh, respectivement. Cela signifie que 55% des besoins en chauffage a été satisfait par les capteurs thermiques. Alors que le reste de la demande énergétique est assuré par l'appoint (45%). En plus, la fraction solaire du système peut être améliorée en jouant sur plusieurs paramètres. En effet, l'étude paramétrique montre que:

- D'abord, pour une meilleure production thermique, les capteurs doivent être inclinés de 45° vers le sud.
- La surface du capteur thermique a une grande influence sur la performance énergétique du système notamment pour des surfaces allant de 2 à 20 m². A 40 m², presque la totalité de la demande de chauffage est fournie par les capteurs solaires où la fraction solaire atteint 99%.
- L'impact du volume du réservoir est moins important en comparaison à celui de la surface de captage. La fraction solaire augmente de 72% à 94% entre 10 et 40 L/m².

- L'influence du débit massique est trop faible. Une augmentation de 5% seulement est enregistrée entre 10 et 30 Kg/(h.m²).

Enfin, un système solaire composant d'un champ de capteurs de 20 m² et un réservoir d'eau chaude de 800L avec un débit massique dans le circuit primaire de 400 kg/(h.m²), est capable à répondre à plus 92% de demande en chauffage.

REFERENCES

- [1] APRUE, «Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie,» Consommation énergétique final de l'Algérie, chiffre clés , 2015.
- [2] Z. Abada and M. Bouharkat, «Study of management strategy of energy resources in Algeria,» Energy Reports 4 (2018) 1–7, 2018.
- [3] N. E. Bassam, «Solar energy,» Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities (pp.123-147).
- [4] M. D. Sun, «www.news.dualsun.com,» MyDualSun, 5 juin 2020. [En ligne]. Available: <https://news.dualsun.com/technologie-solaire/guide-chauffage-solaire-maison/>.
- [5] J. BERNARD, « Energie solaire-Calculs et optimisation,» édition ellipses., 2004.
- [6] R Kharchi et al., «Etude Experimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct», Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 115-119.
- [7] C. MARVILLET., «Solar Heating,» ISTE Ltd, Renewable Energies , 2009.
- [8] A. M. Tadeusz Kozak, «APPLICATION OF SOLAR RADIATION FOR HEATING AND PREPARATION OF WARM WATER IN AN INDIVIDUAL HOUSE,» University of Technology, Szczecin. The Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics , Szczecin, Piastów 19, Poland, 2009.
- [9] S. Bensalem et al. *, «Active solar heating system for residential building in Algeria An energetic economic and environmental investigation,» Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER , Algiers, Algeria, 2016.
- [10] S. Sami et al., «INTEGRATION OF A SOLAR COOLING AND HEATING SYSTEM IN RESIDENTIAL BUILDING LOCATED IN ALGERIA,» MATEC Web of Conferences 307, 01048 (2020), ICOME'17 and ICOME'18
- [11] Jinling Zhao et al., «Numerical analysis of the operation regulation in a solar heating system with seasonal water pool thermal storage,» Renewable Energy , 2019.
- [12] R. M. Haytham M. Dbouk, «Solar Heated Poultry House,» 2019 IEEE AFRICON.
- [13] R. Kherchi et al., «Solar Energy for Heating a Building Used for Offices,» AIP Conference Proceedings 2190, 020005 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138491>.
- [14] K. Kaci et al., «Integration of a solar cooling and heating system. Case of a residential building located in Blida region,» MATEC Web of Conferences 307:01048. DOI:[10.1051/matecconf/202030701048](https://doi.org/10.1051/matecconf/202030701048)

- [15] k. kaci et al., «Conclusion DETERMINATION OF ENERGY NEEDS AND INTEGRATION OF A SOLAR HEATING SYSTEM: CASE STUDY OF AN OFFICE SPACE LOCATED AT THE CDER,» 5 th CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2018.
- [16] F. Sahnoune et al. , «Comparative study between solar and conventional heating - Economic study and environmental impact, Energy Procedia volume 50, 2014, Page 841-852»
- [17] K. Kaci et al., «Dynamic simulation of hybrid-solar water heated olympic,» Energy Procedia 139 (2017) 750–757.
- [18] R. A. Fadi and A. Ghaith, «Energy analyses of an integrated solar powered heating and cooling systems in UAE.,» Energy and Buildings 70 (2014) 117–126..
- [19] A. Klein et al., «A design procedure for solar heating systems,» Sol. Energy 18 (1976) 113, John Wiley, New York, 1977.
- [20] F. Calise et al., «Transient analysis and energy optimization of solar heating and cooling systems in various configurations.,» Solar Energy 84 (2010) 432–449..
- [21] A. Beckman et al., «Solar heating design by the F-Chart method».
- [22] U. M. TRNSYS, «A Transient System Simulation Program. Version 16, Solar Energy Laboratory,» University of Wisconsin-Madison, , Madison, WI,, 2006.
- [23] S. M. METEOTEST, «METEOTEST,» Software METEONORM, juin 2012. [En ligne]. Available: <https://meteotest.ch/>.
- [24] «METEONORM Program».
- [25] M. M. Missoum et al., «Impact of rural housing energy performance improvement on the energy balance in the North-West of Algeria,» Energy and Buildings 85 (2014) 374–388.
- [26] U. M. TRNSYS, «A Transient System Simulation Program. Version 16, Solar Energy Laboratory,,» University of Wisconsin-Madison, , Madison, WI,, 2006.