

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'



Projet de Fin de Cycle
Pour l'obtention du diplôme de Master en
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Génie mécanique
Spécialité : énergétique

Thème

**Évaluation technico-économique d'un chauffe-eau
solaire résidentiel**

Présenté Par :

- 1) M. Benamara Ibrahim
- 2) M. Bab-Elayat Mohammed nadir

Devant les jurys :

Pr. Bounif Abdellhamid	PR	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Pr.Nehari Driss	PR	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Remlaoui Ahmed	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciment



En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à remercier Monsieur REMLAOUI AHMED pour avoir accepté de nous diriger dans ce projet et pour toute l'aide qu'il nous a apporté ;

Nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur d'examiner ce travail et de l'enrichir de leurs propositions.

Nous n'oublions pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à toutes et à tous.



Dédicace

À mes très chers parents.

À mon cher frère.

À ma chère sœur.

À la mémoire de mes grands-parents.

À mes chers cousins et cousines.

À mes très cher(es) ami(es).

Je tiens à dédier ce travail à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin en particulier mon binôme et sa famille.

Dédicace



Résumé

Ce mémoire de fin d'études se concentre sur l'évaluation technico-économique d'un chauffe-eau solaire résidentiel, en mettant en évidence son potentiel en tant que solution durable pour la production d'eau chaude dans les foyers. L'objectif principal de cette étude est de déterminer si l'investissement dans un tel système solaire thermique est rentable du point de vue tant technique qu'économique.

Dans ce mémoire on a commencé par examiner les avantages environnementaux des chauffe-eau solaires résidentiels par rapport aux systèmes de chauffage traditionnels. En utilisant l'énergie solaire, ces systèmes permettent de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer la dépendance aux combustibles fossiles, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

Après on a concentré sur les aspects techniques de l'installation d'un chauffe-eau solaire résidentiel. Elle aborde les différents composants du système, tels que les capteurs solaires, les réservoirs de stockage, les pompes et les régulateurs. L'efficacité énergétique, la durabilité et les considérations liées à la maintenance sont également examinées.

Ensuite la partie de la simulation et les résultats de l'étude est consacrée à l'analyse technique et économique à l'aide du logiciel SAM. Elle évalue les coûts initiaux d'installation d'un chauffe-eau solaire résidentiel, y compris l'achat des équipements et les frais de main-d'œuvre. Une comparaison est faite avec les coûts d'un système de chauffage conventionnel, en prenant en compte les économies réalisées sur les factures d'énergie à long terme. Des outils d'évaluation financière tels que le retour sur investissement et le temps de récupération sont utilisés pour déterminer la viabilité de l'investissement.

En conclusion, cette étude montre que l'utilisation d'un chauffe-eau solaire résidentiel présente de nombreux avantages tant sur le plan environnemental que sur le plan économique. Les résultats démontrent que malgré des coûts initiaux plus élevés, le système peut générer des économies significatives à long terme, permettant ainsi un retour sur investissement intéressant pour les propriétaires. L'adoption de cette technologie peut contribuer à une transition vers une société plus durable sur le plan énergétique, en réduisant l'empreinte carbone des foyers et en favorisant l'utilisation des énergies renouvelables.

Mots-clés : Énergie solaire thermique, Chauffe-eau solaire, Énergie renouvelable,

Installation solaire, Coûts d'exploitation, Fiabilité du système, Performance du système.

المستخلص:

تركز هذه الأطروحة النهائية على التقييم التقني والاقتصادي لسخان المياه بالطاقة الشمسية السكنية، مما يسلط الضوء على إمكانياته كحل مستدام لإنتاج المياه الساخنة في المنازل. الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تحديد ما إذا كان الاستثمار في مثل هذا النظام الحراري الشمسي قابلاً للتطبيق تقنياً واقتصادياً.

بدأ هذا الموجز بفحص الفوائد البيئية لسخانات المياه الشمسية السكنية على أنظمة التدفئة التقليدية. باستخدام الطاقة الشمسية، تقلل هذه الأنظمة بشكل كبير من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري، مما يساهم في مكافحة تغير المناخ.

ثم ركزنا على الجوانب الفنية لتركيب سخان سكي للمياه بالطاقة الشمسية. يغطي المكونات المختلفة للنظام، مثل جامعي الطاقة الشمسية وخزانات التخزين والمضخات والمنظمين. وينظر أيضا في اعتبارات كفاءة الطاقة واستدامتها وصيانتها.

ثم يتم تخصيص جزء المحاكاة ونتائج الدراسة للتحليل التقني والاقتصادي باستخدام برنامج *SAM*. وتقدر التكاليف الأولية لتركيب سخان سكي للمياه بالطاقة الشمسية، بما في ذلك شراء المعدات وتكاليف اليد العاملة. يتم إجراء مقارنة مع تكاليف نظام التدفئة التقليدي، مع مراعاة التوفير في فواتير الطاقة طويلة الأجل. وتستخدم أدوات التقييم المالي مثل العائد على الاستثمار ووقت الانتعاش لتحديد جدوى الاستثمار.

في الختام، تظهر هذه الدراسة أن استخدام سخان المياه الشمسي السكي له العديد من الفوائد البيئية والاقتصادية. تظهر النتائج أنه على الرغم من ارتفاع التكاليف الأولية، يمكن للنظام تحقيق وفورات كبيرة على المدى الطويل، مما يسمح بعائد جذاب على الاستثمار للمالكين. يمكن أن يساهم اعتماد هذه التكنولوجيا في الانتقال إلى مجتمع أكثر استدامة للطاقة من خلال تقليل البصمة الكربونية للأسر وتعزيز استخدام الطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الحرارية، سخان المياه الشمسية، الطاقة المتجددة، التركيب الشمسي، تكاليف التشغيل، موثوقية النظام، أداء النظام.

Abstract

This final dissertation focuses on the technical-economic evaluation of a residential solar water heater, highlighting its potential as a sustainable solution for the production of hot water in homes. The main objective of this study is to determine whether the investment in such a solar thermal system is technically and economically viable.

This brief began by examining the environmental benefits of residential solar water heaters over traditional heating systems. By using solar energy, these systems significantly reduce greenhouse gas emissions and reduce reliance on fossil fuels, contributing to the fight against climate change.

Then we focused on the technical aspects of installing a residential solar water heater. It covers the different components of the system, such as solar collectors, storage tanks, pumps and regulators. Energy efficiency, sustainability and maintenance considerations are also considered.

Then the part of the simulation and the results of the study is devoted to the technical and economic analysis using the SAM software. It estimates the initial costs of installing a residential solar water heater, including the purchase of equipment and labour costs. A comparison is made with the costs of a conventional heating system, taking into account savings on long-term energy bills. Financial assessment tools such as return on investment and recovery time are used to determine the viability of the investment.

In conclusion, this study shows that the use of a residential solar water heater has many environmental and economic benefits. The results show that, despite higher initial costs, the system can generate significant savings in the long term, allowing an attractive return on investment for owners. Adoption of this technology can contribute to a transition to a more energy-sustainable society by reducing the carbon footprint of households and promoting the use of renewable energy.

Keywords: Solar Thermal Energy, Solar Water Heater, Renewable Energy, Solar Installation, Operating Costs, System Reliability, System Performance.

Table Des Matières

Remerciment

Dédicace

Resume

Tables des matières

Liste des figures

Liste du tableau

Chapitres 1 : état de l'art du système solaire

I. Introduction	2
I.1. L'énergie solaire	2
I.2. Problématique du changement climatique:.....	3
I.3. Objectif du chapitre:	3
I.4. Les fondamentaux de l'énergie solaire:.....	3
I.4.1. Le soleil:.....	4
I.4.2. Le rayonnement soleil:.....	4
I.4.3. Les unités de mesure de l'énergie solaire:	5
I.5. Les technologies de l'énergie solaire:	5
I.5.1. Les panneaux solaire photovoltaïque :.....	5
I.5.2. Les centrales solaires thermiques:	6
I.5.3. Les concentrateurs solaires:	6
I.6. Les avantages de l'énergie solaire:	7
I.6.1. Energie renouvelable et inépuisable:	7
I.6.2. Faible impact environnemental:.....	7
I.6.3. Indépendance énergétique:.....	8
I.7. Les défis de l'énergie solaire:	8
I.7.1. Cout:.....	8
I.7.2. Intermittence de la production:	10
I.7.3. Stockage de l'énergie:.....	10
I.7.4. Production d'électricité:.....	11
I.7.5. Chauffage solaire:	12

I.7.6. Climatisation solaire:	13
I.7.7. Eau chaude sanitaire solaire:	14
I.8. Les tendances de l'énergie solaire:	15
I.8.1. Evolution technologique:	15
I.8.2. Augmentation de la part de l'énergie solaire:.....	15
I.8.2. Perspectives d'avenir:.....	17
I.9. Conclusion:	17

chapitre 02 : chauffe eau solair

II.1. Introduction :	20
II.2. Présentation du chauffe-eau solaire.....	20
II.3. Importance de l'eau chaude sanitaire.....	20
II.4. Objectif du chapitre.....	21
II.5. Les fondamentaux du chauffe-eau solaire.....	21
II.5.1. Le principe de fonctionnement	21
II.5.2. Les composants d'un système de chauffe-eau solaire.....	21
II.5.3. Différents types de chauffe-eau solaire	22
II.5.4. Les types de capteurs solaires thermiques	24
II.5.5. Les avantages du chauffe-eau solaire	27
II.5.6. Les défis du chauffe-eau solaire	28
II.5.7. Les applications du chauffe-eau solaire.....	29
II.5.8. Les normes et réglementations du chauffe-eau solaire.....	33
II.5.9. Les tendances du chauffe-eau solaire	34
II.6. Conclusion.....	37
II.6.1. Bilan sur le chauffe-eau solaire	37
II.6.2. Importance du chauffe-eau solaire dans la transition énergétique	37

Chapitre 03: simulation

III.1. Introduction.....	39
III.2. Présentation du logiciel.....	39
III.3. Les étapes de la simulation	40
III.3.1. Localisation et ressource	40
III.3.2. Chauffe-eau solaire	41

III.3.3. System:	41
III.3.4. Capteur:	42
III.3.5. Réservoir solaire et échangeur de chaleur :	43
III.3.6. Tuyauterie et pompage :	43
III.3.7. Coût du système	43
III.3.8. Paramètre financier	46
III.4. Conclusion	48
<u>Capitre 04 :resultat</u>	
IV.1. Introduction.....	50
IV.2-resultats.....	50
IV.3-Résultats Techniques :	51
2.1- production d'énergie et tableau des mesures	51
2.2- Q auxiliaire et Q délivre.....	52
2.3- température chaude	53
2-4- température délivrée et température secteur	54
2-5- puissance de pompe et la chaleur utile :	55
2-6- volume de l'eau chaude et l'eau froide.....	57
2-7-prelevement de l'eau chaude	59
IV.4-Résultats économiques:	61
3.1-tableau de mesures	61
3.2- frais d'énergie	62
IV.5-Conclusion.....	64
Conclusion Générale :	68

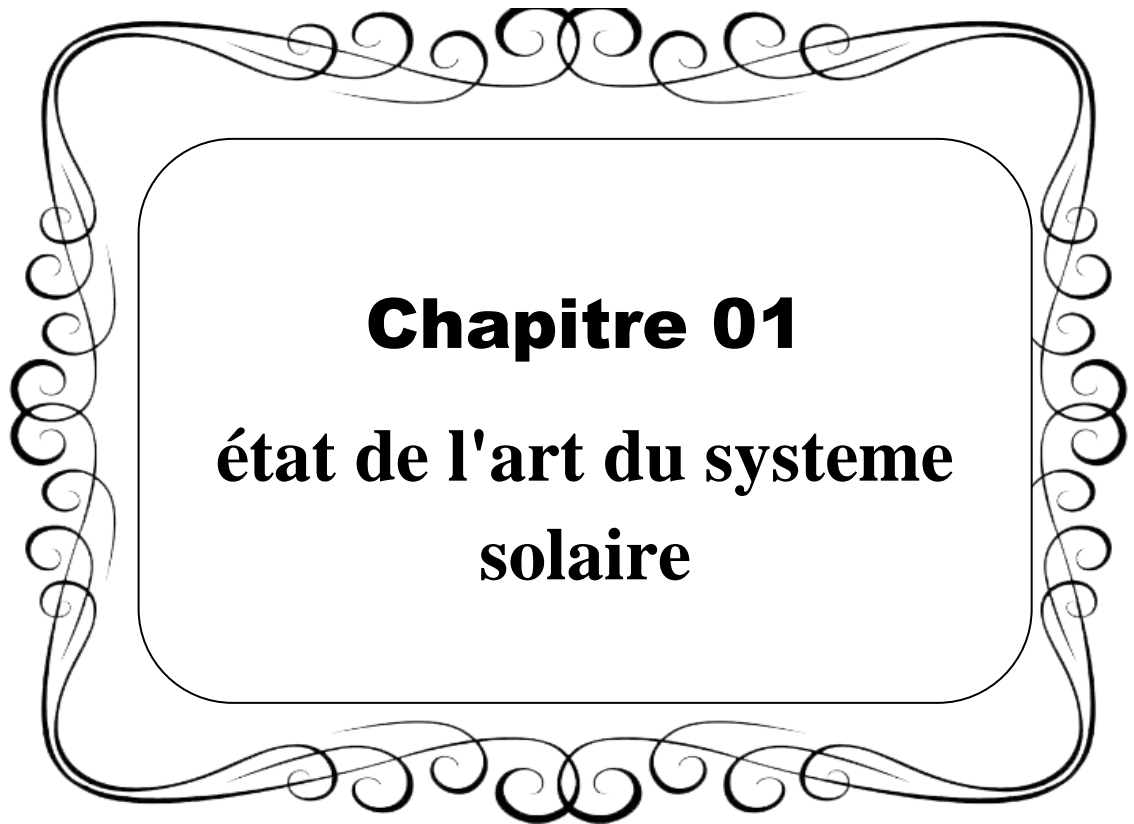
Liste des figures

Figure I. 1: Les mouvements de la terre autour du soleil.....	4
Figure I. 2: Installation photovoltaïque.....	6
Figure I. 3: Les centrales solaires thermiques.....	6
Figure I. 4: les concentrateurs solaires.....	7
Figure I. 5: Stockage de l'énergie photovoltaïque par batterie.....	11
Figure I. 6: Bilan électrique 2016	12
Figure I. 7: Se chauffer à l'énergie solaire thermique	13
Figure I. 8: Climatiseurs solaire.....	14
Figure I. 9: le chauffe-eau solaire	15
Figure I. 10: Solar PV installed capacity,in GW,Global 2011-2020	16
Figure I. 11: solar energy market-Growth rate by region 2022-2027.....	17
Figure II. 1: Le schéma des éléments d'un chauffe-eau solaire	22
Figure II. 2: Chauffe-eau solaire à circulation forcée	23
Figure II. 3: Chauffe-eau solaire à thermosiphon	23
Figure II. 4: Chauffe-eau solaire monobloc	24
Figure II. 5: Composants d'un capteur plan avec vitrage	24
Figure II. 6: Capteur non vitré	25
Figure II. 7: Capteur solaire a tube sous vide	26
Figure II. 8: capteurs hybrides (thermiques).....	27
Figure II. 9: schéma de chauffe-eau solaire individuel.....	30
Figure II. 10: schéma de chauffe-eau solaire collective.....	31
Figure II. 11: chauffe-eau solaire dans un hotail	32
Figure III. 1: page d'accueillie de SAM	40
Figure III. 2: page de localisation et ressource	41
Figure III. 3: page de Chauffe-eau solaire	42
Figure III. 4: page de stockage et Tuyauterie et pompage.....	43
Figure III. 5: page de Coût du système	45
Figure III. 6: page de durée de vie	46
Figure III. 7: page de type de crédit.....	46
Figure III. 8: page de paramètre de crédit.....	46
Figure III. 9: page de paramètres d'analyse	47
Figure III. 10: page de taxe et taux d'assurance	47
Figure III. 11: page de valeur de récupération.....	47
Figure IV: 1: courbes de rayonnement global et la vitesse de vent	51
Figure IV: 2: production d'énergie mensuelle	52
Figure IV: 3: courbe de température chaude.....	53

Figure IV: 4: courbes de température délivrée et température secteur	54
Figure IV: 5: courbes de puissance de pompe et la chaleur utile.....	56
Figure IV: 6: courbes de volume de l'eau chaude et l'eau froide	58
Figure IV: 7: courbes de prélèvement de l'eau chaude.....	60
Figure IV: 8: courbes de frais d'énergie avec le système et sans le système.....	64

Listes du Tableaux

Tableau I. 1: cout de panneaux solaire	9
Tableau IV. 1: tableau des mesures et leur valeur	52
Tableau IV. 2: tableau de quantités de chaleur	53
Tableau IV. 3: tableau des mesures et leur valeur	62
Tableau IV. 4: tableau de frais d'énergie avec et sans le système	63



Chapitre 01
état de l'art du systeme
solaire

I. Introduction

Les besoins énergétiques de l'humanité n'ont pas cessé de croître avec son évolution: on a utilisé d'abord des ressources naturelles telle que le charbon, le bois et par la suite avec le progrès scientifique, le pétrole, le gaz, l'énergie hydraulique et l'énergie nucléaire.

Actuellement les énergies fossiles sont consommées bien plus rapidement qu'elles ne se forment dans la nature et selon les estimations, les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au plus tard vers 2100 si des efforts sont fournis concernant la production et la consommation nécessaire. Cette forme d'énergie étant limitée dans le temps, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser d'autres sources d'énergies, tout en tenant compte des factures économiques et environnementales.

L'énergie solaire qui est l'objectif de notre étude se caractérise par une absence de pollution et une disponibilité exceptionnelle. D'autre part, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême aux conditions naturelles (température, humidité, vent, corrosion,etc.), et donc une grande longévité, il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions.

Cette source d'énergie est utilisée de manières différentes, par exemple ; dans les systèmes thermiques (chauffe-eau solaires), pour la production d'eau chaude, domaine où elle connaît un développement considérable particulièrement dans le secteur de l'habitat.

Le dimensionnement des systèmes à chauffe-eau solaires occupe une fonction déterminante, en effet la gestion de cet élément est fonction de plusieurs paramètres :

- ✓ Les besoins de l'utilisateur en quantité d'eau chaude ;
- ✓ La température de l'eau chauffée ;
- ✓ Les conditions climatiques locales ;
- ✓ Les performances du système à capteurs plans.

I.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet que peu de CO₂.

Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité ou en chaleur. et cela au moyen de trois

Différentes méthodes et technologies : l'énergie photovoltaïque, l'énergie solaire passive et l'énergie solaire active. [1]

I.2. Problématique du changement climatique :

Le changement climatique touche toutes les régions du monde. Les calottes glaciaires polaires fondent et le niveau des océans est en hausse. Dans certaines régions, les phénomènes météorologiques extrêmes et les précipitations sont de plus en plus fréquents, tandis que d'autres doivent faire face à des vagues de chaleur et à des sécheresses de plus en plus extrêmes. Nous devons agir pour le climat maintenant, ou ces effets ne feront que s'intensifier.

Le changement climatique est une menace très grave et ses conséquences ont une incidence sur de nombreux aspects différents de notre vie. Vous trouverez ci-dessous une liste des principales conséquences du changement climatique. Cliquez sur les signes «+» pour plus d'informations.

I.3. Objectif du chapitre :

L'objectif principal est de fournir une vue d'ensemble actualisée de l'état des connaissances sur le système solaire, en mettant en évidence les développements les plus récents et les questions de recherche en cours. Cela permet aux lecteurs de comprendre les avancées scientifiques récentes et les défis qui persistent dans notre exploration et notre compréhension du système solaire.

I.4. Les fondamentaux de l'énergie solaire :

Les technologies de production d'électricité à base d'énergie solaire connaissent un développement soutenu depuis une vingtaine d'années. Ce développement est lié à un fort engouement pour les énergies renouvelables dans un contexte mondial de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est la conséquence de politiques volontaristes mises en place par les pouvoirs publics dans de nombreux pays dès la fin des années 90. Le déploiement à grande échelle de ces technologies a conduit, ces dernières années, à des baisses substantielles de coût de production et à des progrès remarquables sur le plan des performances en raison d'efforts de recherche très importants en forte synergie avec l'industrie. Cette situation augure de belles perspectives pour l'avenir de ces filières à moyen et long terme. En France, le Gouvernement a dévoilé, en 2018, le plan "Place au Soleil" constitué d'une série de mesures qui contribueront à atteindre une cible de 32 % d'énergies renouvelables dans la consommation brute finale d'énergie en 2030. Cet ouvrage a pour principal objectif d'offrir au lecteur un panorama complet de la production d'électricité photovoltaïque et solaire thermodynamique : fondamentaux, état de l'art, principales innovations envisagées à court et moyen terme. Des développements scientifiques détaillés ont été apportés chaque fois que nécessaires à la pleine compréhension du sujet. Ce livre s'adresse aux étudiants de niveau Master, aux élèves ingénieurs ainsi qu'aux ingénieurs et chercheurs travaillant ou souhaitant travailler dans le domaine de l'énergie solaire. Il est également recommandé à toute personne désireuse de découvrir et de s'approprier ce sujet. [2]

I.4.1. Le soleil:

Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre, dont elle est distante d'environ 150 millions de kilomètres. Le Soleil est situé à 8,5 kparsecs du centre de la Voie lactée. Dans la classification des étoiles, le soleil est une étoile de type G2

Le soleil est une énorme sphère incandescente de plasma à la température voisine de 5750K dont le diamètre atteint 1391000km, la puissance émise par ce dernier est estimée à $1,7 \cdot 10^{23} \text{ kW}$ dont une partie atteint le globe terrestre, elle est de l'ordre de $8,5 \cdot 10^{13} \text{ kW}$; uniquement 70% (environ $6 \cdot 10^{13} \text{ kW}$) de cette puissance pénètre l'atmosphère

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25jours, le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. (Figure1) C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147millions de km et au solstice d'été (22 juin) qu'elle en est la plus éloignée : 152millions de km, la distance moyenne étant de 149,5millions de km, la terre coupe le plan perpendiculaire au grand axe de son orbite et contenant le soleil aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre). [03] Elle tourne sur elle-même avec une période de 24h, son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle de $23^{\circ}27'$ avec la normale au plan de l'écliptique. [1]

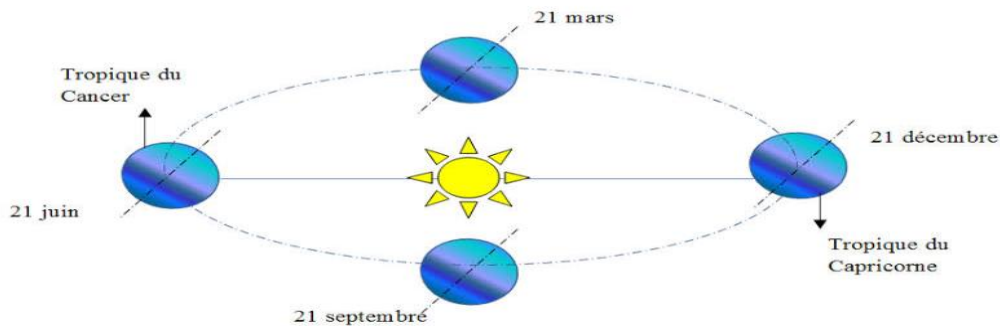


Figure I. 1: Les mouvements de la terre autour du soleil. [3]

I.4.2. Le rayonnement soleil :

Le Soleil existe depuis plusieurs milliards d'années. Les rayons solaires arrivent en permanence sur Terre et chauffent la surface de notre planète. Sans cet apport d'énergie, la Terre serait glaciale. Quel est donc ce rayonnement solaire indispensable à notre planète ?.

L'énergie solaire arrive sur Terre sous forme d'un rayonnement électromagnétique dont la lumière visible fait partie. Un rayonnement

électromagnétique se décompose en ondes radio et millimétriques, en émissions dans l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet et, au-delà, en rayons X et gamma. Un corps froid comme la Terre émet principalement des ondes radio, millimétriques et infrarouges.

Un corps chaud comme le Soleil émet sur tout le spectre. Il nous envoie un flux d'énergie dominé par la partie visible du spectre. Une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère. Les rayonnements ultraviolets et X sont principalement absorbés au-dessus de 100 km en altitude, tandis que les rayonnements visible et infrarouge sont en partie réfléchis par l'atmosphère et les nuages.

La surface de la Terre, qui n'est pas très chaude, 15°C en moyenne, réémet une partie de l'énergie solaire qui peut être absorbée par l'atmosphère (gaz à effet de serre) et les nuages. L'énergie solaire reçue par la Terre n'est pas constante dans le temps. Le cycle solaire, d'une périodicité de 11 ans, est observé depuis des siècles à travers la variation du nombre de taches à la surface du Soleil. Le flux d'énergie émis par le Soleil ne varie cependant que d'un millième environ au cours d'un tel cycle. [4]

I.4.3. Les unités de mesure de l'énergie solaire :

En général on utilise ces trois unités :

Les kWh (kilowatt heure) : désignent la quantité d'énergie électrique produite ; Les kWc (kilowatt crête): indiquent la puissance de l'installation photovoltaïque ; Les m² : donnent la surface de l'installation.

I.5. Les technologies de l'énergie solaire :

I.5.1. Les panneaux solaires photovoltaïque :

L'électricité est générée à partir des rayons du soleil collectés grâce à l'installation de panneaux solaires. Ils sont généralement mis en place sur les toits des habitations et reliés à des onduleurs chargés de changer le courant continu produit par les panneaux en courant alternatif. Ce dernier est ensuite envoyé jusqu'à un compteur électrique de production permettant de mesurer l'énergie produite. Certains modèles de panneaux sont équipés de moteurs afin de les réorienter à loisir pour suivre la course du soleil. [7]



Figure I. 2: Installation photovoltaïque.[9]

I.5.2. Les centrales solaires thermiques :

Le fonctionnement des centrales solaires thermiques repose sur la technique suivante : Des miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C). La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière. [8]



Figure I. 3: Les centrales solaires thermiques. [9]

I.5.3. Les concentrateurs solaires :

Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 1800°C, avec un rendement supérieur à 70%. [9]



Figure I. 4: les concentrateurs solaires.[9]

I.6. Les avantages de l'énergie solaire:

I.6.1. Energie renouvelable et inépuisable:

Les énergies renouvelables (EnR) sont alimentées par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées... Elles permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz, du carburant, du combustible. Ces sources d'énergie, considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain, n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles se distinguent des énergies fossiles, polluantes et dont les stocks diminuent. Enfin, les EnR sont plus résilientes, notamment en cas de crise.

Il existe 5 grandes familles d'énergies renouvelables :

- ❖ Énergie éolienne (terrestre et en mer) / Production : électricité
- ❖ Énergie solaire (photovoltaïque, thermique et thermodynamique) / Production : électricité et chaleur
- ❖ Biomasse / Production : chauffage (bois-énergie), chaleur et électricité (déchets)
- ❖ Énergie hydraulique / Production : électricité
- ❖ Géothermie / Production : chaleur

I.6.2. Faible impact environnemental:

Le concept d'impact environnemental désigne l'ensemble des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de l'environnement (négatives ou positives) engendrées par un projet, un processus, un procédé, un ou des organismes et un ou des produits, de sa conception à sa « fin de vie ».

L'évaluation d'un impact environnemental est quantifiée grâce à la mesure d'indicateurs de flux et d'indicateurs d'impact potentiels. [10]

Pour l'air, on récite cinq indicateurs :

- Contribution à l'effet de serre ;
- acidification de l'air ;
- formation d'ozone troposphère ;
- Appauvrissement de la couche d'ozone ;
- Particules et effets respiratoires des substances inorganiques.

Pour l'eau, on en retient quatre :

- eutrophication des eaux douces ;
- écotoxicité aquatique ;
- eutrophisation des eaux marines ;
- consommation d'eau (indicateur de flux).

Pour les ressources des sols et la santé humaine, on utilise les quatre indicateurs suivants :

- consommation d'énergie primaire (indicateur de flux) ;
- épuisement des ressources non renouvelables ;
- toxicité humaine ;
- occupation des sols. [10]

I.6.3. Indépendance énergétique:

Le taux d'indépendance énergétique est le rapport entre la production nationale d'énergies primaires (charbon, pétrole, gaz naturel, nucléaire, hydraulique, énergies renouvelables) et la consommation en énergie primaire, une année donnée. Ce taux peut se calculer pour chacun des grands types d'énergies ou globalement toutes énergies confondues. Un taux supérieur à 100% (cas de l'électricité) traduit un excédent de la production nationale par rapport à la demande intérieure et donc un solde exportateur. [11]

I.7. Les défis de l'énergie solaire :

I.7.1. Coût :

Le coût d'une installation photovoltaïque n'est pas le même selon que vous choisissiez une puissance de 3 kWc, 6 kWc ou encore 9 kWc. En effet, l'est influencé par différents facteurs dont la puissance que vous choisissiez.

Le deuxième facteur déterminant pour établir une estimation du coût de votre installation photovoltaïque est le mode de pose de vos panneaux solaires. Il existe plusieurs possibilités:

- la surimposition : la solution aujourd’hui la plus répandue, car la moins onéreuse, et la plus facile à mettre en œuvre. Ici, les panneaux sont simplement posés sur votre toiture. En surimposition, le coût moyen de l’installation de panneaux solaires photovoltaïques est compris entre 2 200 et 2 800 € par kWc (matériel + pose + démarches administratives) ;
- l’intégration au bâti : jusqu’en 2017, une prime était octroyée aux particuliers qui choisissaient ce mode de pose. Cette prime ayant aujourd’hui disparu, l’intégration au bâti n’est quasiment plus pratiquée, car plus chère, et moins sûre quant à l’intégrité de la toiture. En moyenne, il faut compter entre 2 700 et 3 500 € par kWc (matériel + pose + démarches administratives) ;
- Les autres facteurs qui influent sur le coût de votre installation de panneaux solaires sont les suivants :
- le type de panneau solaire utilisé : selon que vous choisissiez des panneaux polycristallins ou monocristallins, le prix n’est pas le même ;
- le mode de consommation : vous serez différemment conseillé sur les modalités de votre installation (mode de pose, puissance...) selon que vous choisissiez un kit solaire en autoconsommation photovoltaïque avec vente du surplus ou la vente totale de votre production ;
- les coûts liés au raccordement au réseau public d’électricité, qui varient principalement en fonction des travaux à entreprendre.
- En dépit de ces variables, nous pouvons établir un ordre de grandeur de prix des panneaux solaires selon la puissance et du mode d’intégration (matériel, pose et coût des démarches administratives inclus).
- l’installation au sol : vous pouvez en effet installer des panneaux solaires au sol si votre toiture n’est pas appropriée. Le coût est logiquement moins important qu’une installation sur toiture, car elle nécessite moins de main d’œuvre. [12]

Tableau I. 1: cout de panneaux solaire

Puissance de l’installation	Panneaux intégrés au bâtiment	Panneaux en surimposition
3 kWc	Environ 9 000 €	8 000 à 11 000 €
6 kWc	Environ 15 500 €	11 000 à 16 000 €
9 kWc	Environ 20 000 €	17 000 à 23 000 €

I.7.2. Intermittence de la production:

Par définition, une énergie intermittente est une énergie dont la disponibilité fluctue énormément sans qu'il soit vraiment possible de la réguler. Ce concept est relativement récent, puisqu'il s'applique principalement aux sources d'énergie renouvelable.

L'intermittence de ces énergies trouve son origine dans les flux sur lesquels elles reposent. Soleil (dépendance à la luminosité) pour le photovoltaïque, vent pour l'éolien, les retenues d'eau pour l'hydroélectrique... De ce fait, leur production dépend grandement des conditions météorologiques et de l'alternance des cycles jour/nuit. Elle est donc discontinue, variable et non programmable.

Lorsque l'on aborde la problématique de l'intermittence des énergies, deux sources sont souvent pointées du doigt. La première est l'énergie solaire/photovoltaïque qui est disponible seulement dans la journée, en particulier lorsqu'il fait beau. Quant à la seconde, vous l'aurez sans doute deviné, c'est l'énergie éolienne. Celle-ci ne peut être produite que lorsque le vent souffle.

À l'échelle mondiale, les énergies renouvelables intermittentes représentent encore un faible pourcentage de la production globale. La tendance devrait cependant s'inverser compte tenu de la politique de transition amorcée par plusieurs pays et des coûts de production qui tendent à baisser. [13]

I.7.3. Stockage de l'énergie:

Énergie solaire ou photovoltaïque, éolienne, tirée de la biomasse, hydraulique, géothermie... Les énergies vertes sont dites renouvelables, car elles proviennent de sources naturelles, supposées inépuisables. S'il est vrai que l'énergie issue du soleil semble sans limites, il n'est pas possible de la puiser à toute heure de la journée ni durant toute l'année, ce qui limite le rachat du photovoltaïque. Au problème d'intermittence s'ajoute celui de la météo, souvent capricieuse, qui rend cette source d'énergie incertaine. D'où l'importance du stockage de l'énergie solaire pour couvrir les besoins énergétiques.

Les batteries, la référence pour le stockage de l'énergie solaire

Pour rappel, les cellules photovoltaïques des panneaux solaires captent la chaleur du soleil, ce qui met en mouvement des électrons, qui produisent de l'électricité, appelée énergie solaire. Aujourd'hui, la meilleure solution pour stocker l'énergie produite est la batterie à décharge lente, communément appelée batterie solaire. Ce type de batterie peut être utilisé pour une installation isolée (logement) dans une démarche de maison solaire passive, mais aussi pour un camping-car ou un bateau. Un régulateur, placé entre la batterie et le panneau solaire, est nécessaire pour que le niveau de charge ne soit ni trop bas ni trop élevé. Les batteries solaires se chargent pendant la journée, pour fournir de l'énergie solaire durant la nuit et les jours de mauvais temps.

Il existe actuellement plusieurs types de batteries concernant l'énergie solaire ou photovoltaïque :

- Batteries au plomb ouvert (entre 80 et 250 €) : idéales pour les utilisations momentanées, elles doivent être placées en plein air, tout en étant protégées du froid. Leur durée de vie peut dépasser 10 ans.
- Batteries AGM (entre 200 et 400 €) : leur durée de vie est plus courte, mais elles sont étanches, plus résistantes et nécessitent moins d'entretien que les batteries au plomb ouvert.
- Batteries GEL (entre 200 et 550 €) : appréciées pour leur excellente qualité et leur longévité, elles sont adaptées aux utilisations quotidiennes.
- Batteries au lithium (plus de 600 €) : le haut de gamme. Elles peuvent réaliser plus de cycles que les autres batteries, à condition d'éviter les charges trop élevées et les décharges trop importantes.

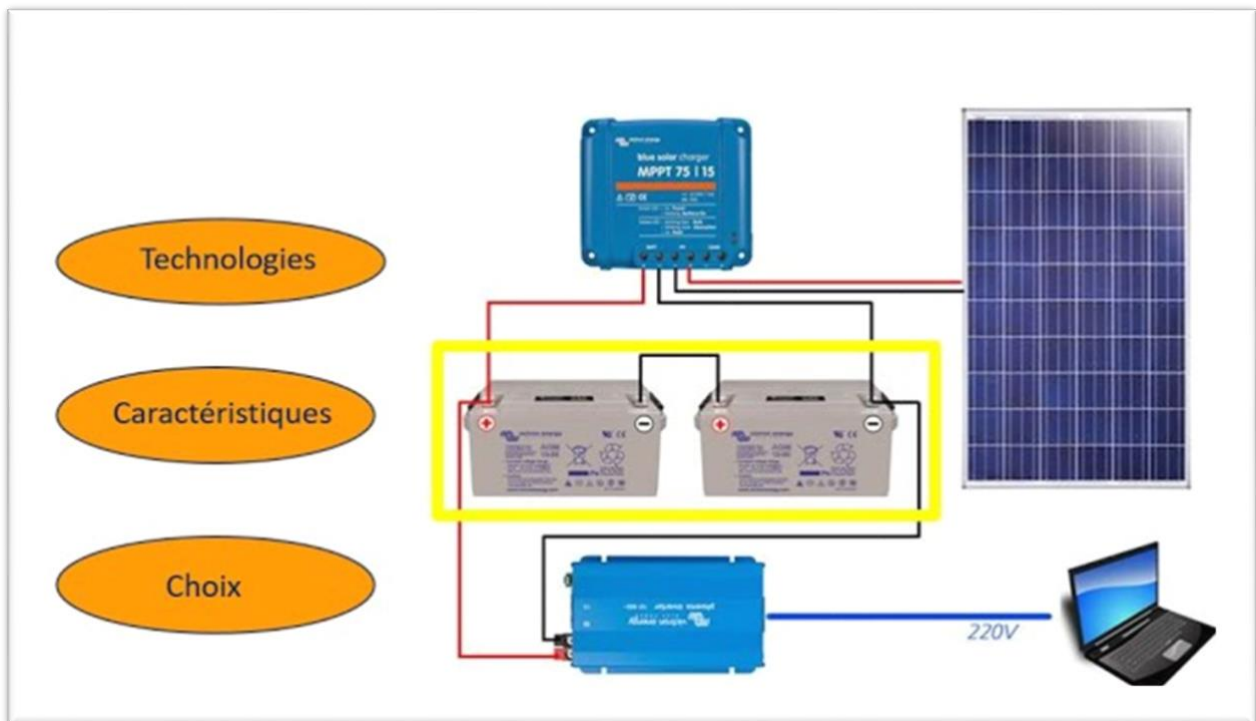


Figure I. 5: Stockage de l'énergie photovoltaïque par batterie.[9]

I.7.4. Production d'électricité:

En France métropolitaine, la production d'électricité a quasiment quadruplé entre 1970 et 2010, où elle a atteint un niveau de 550 TWh (nette de l'autoconsommation des centrales). [14]

Cette production s'est depuis stabilisée, sous l'effet combiné d'un retrait d'installations thermiques et du développement des énergies renouvelables. Ce phénomène répond également

à la stabilisation de la consommation électrique française (corrigée du climat) autour de 480 TWh depuis 2011 :

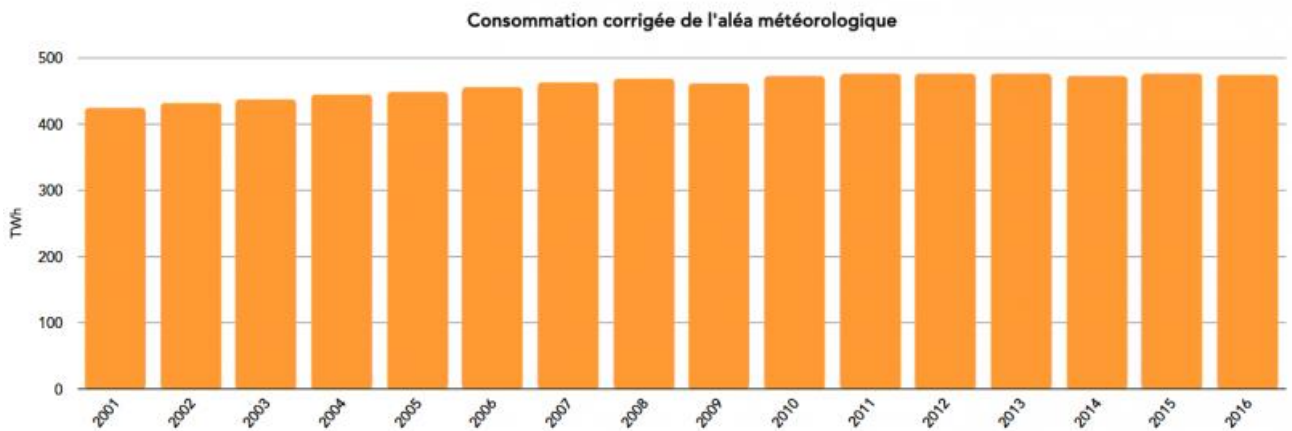


Figure I. 6: Bilan électrique 2016. [14]

La production électrique française varie chaque année en fonction :

- de la disponibilité des installations de production : celles-ci peuvent en effet connaître des périodes d'indisponibilité (soit programmées, pour maintenance par exemple, soit fortuites) ou dépendre d'une source aléatoire ou intermittente. A titre d'exemple, les conditions climatiques annuelles peuvent influencer très largement la production annuelle des centrales hydroélectriques, qui constituent la deuxième source d'électricité de notre pays ;
- du niveau de la consommation d'électricité, qui dépend notamment des conditions climatiques, des efforts d'efficacité énergétique, et du contexte économique ;
- de la situation des autres pays d'Europe de l'Ouest, vers lesquels la production électrique française peut être exportée. Du fait de la situation géographique centrale de la France sur le réseau européen, du nombre important d'interconnexions entre la France et ses pays voisins et de la présence en France de moyens de production de base à coûts marginaux faibles, la France exporte des quantités importantes d'électricité : son solde exportateur se situe depuis une dizaine d'années aux alentours de 50 TWh. La France est exportatrice nette à chacune de ses frontières, sauf avec l'Allemagne.

I.7.5. Chauffage solaire:

Le chauffage solaire permet de chauffer de l'eau chaude sanitaire ou d'assurer le chauffage de la maison ou d'autres locaux. Le chauffage solaire est un des chauffages des plus économiques et des plus écologiques car l'énergie solaire est gratuite sur tous les toits. Certes, l'ensoleillement des panneaux solaires ne correspond pas toujours à l'appel des besoins d'eau chaude sanitaire ou de chauffage. Pour cela, tout chauffage solaire comportera généralement un stockage ou ballon solaire. De plus et si la capacité solaire ne suffit pas, il faut

obligatoirement faire appel à une énergie d'appoint. Que celle-ci soit électrique (exemple chauffe-eau électro-solaire) ou que celle-ci soit apportée par une chaudière ou une pompe à chaleur

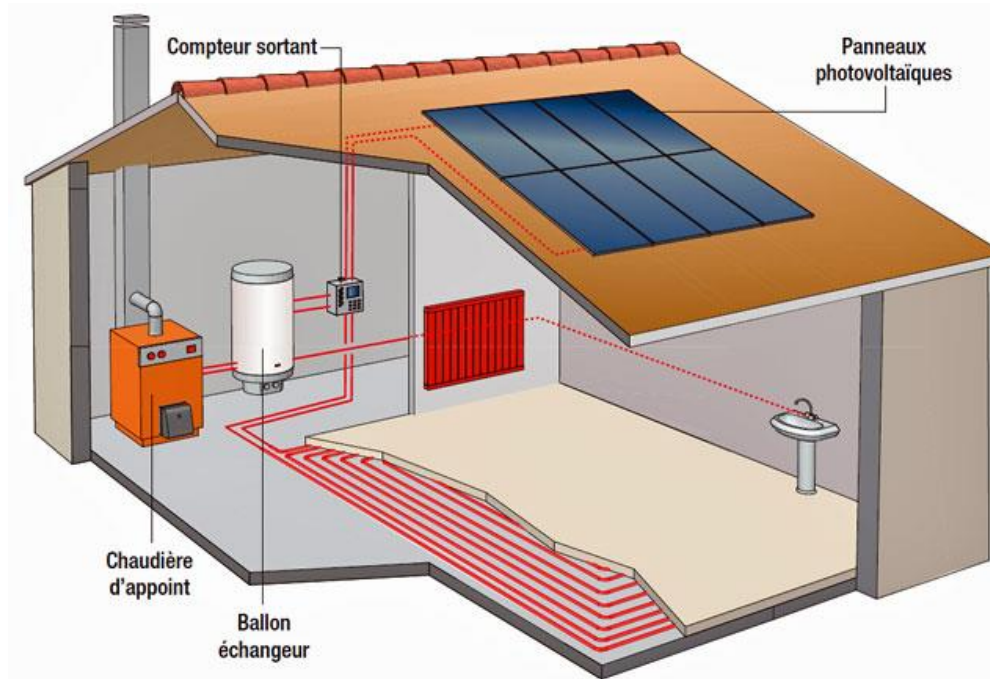


Figure I. 7: Se chauffer à l'énergie solaire thermique

I.7.6. Climatisation solaire:

Si le coût de la *climatisation solaire* reste élevé, il s'agit d'une solution efficace pour faire des économies d'énergie. Il existe des systèmes adaptés aux besoins des entreprises, notamment pour des bureaux et des bâtiments administratifs, mais également des modèles adaptés aux besoins des particuliers.

Fonctionnement de la climatisation solaire

La climatisation solaire n'est pas une solution unique. Le terme regroupe l'ensemble des systèmes de climatisations fonctionnant grâce à l'énergie solaire. Le solaire est ainsi la ressource énergétique primaire de ces équipements.

Pour installer un système de production de froid fonctionnant grâce au soleil, il est possible de choisir entre deux grands principes :

1. l'installation d'un système de compression mécanique avec la mise en place :
 1. d'un climatiseur classique ;
 2. et de panneaux solaires photovoltaïques venant alimenter le climatiseur grâce à l'électricité produite ;

2. l'installation d'un système de compression thermique (le fluide monte en température) avec la mise en place :
 1. d'un climatiseur à absorption ;
 2. ou d'un climatiseur à adsorption ;
 3. et de panneaux solaires thermiques (l'énergie produite donne lieu à du froid qui alimente le climatiseur).

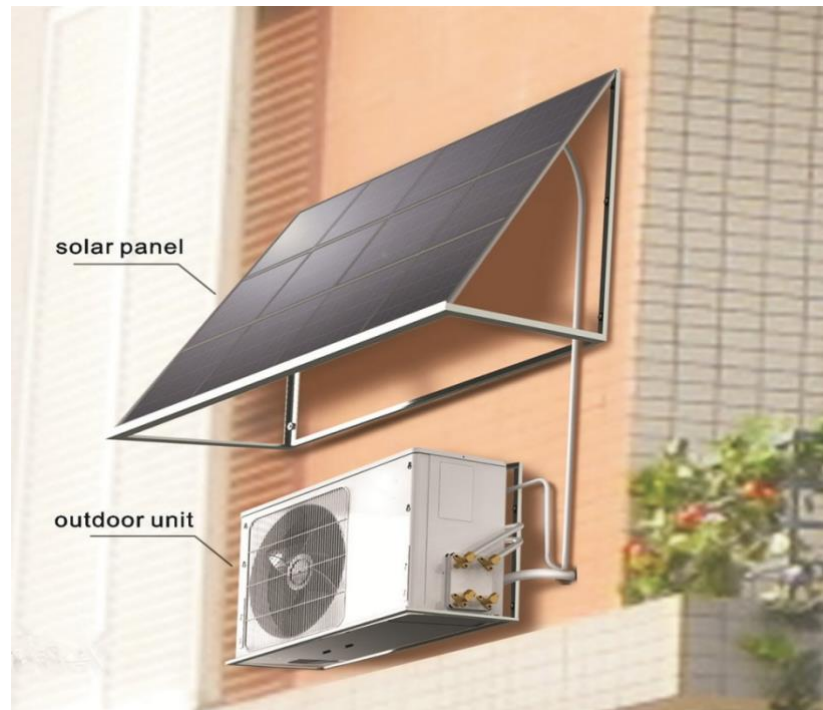


Figure I. 8: Climatiseurs solaire

I.7.7. Eau chaude sanitaire solaire:

La dépense liée à la production de votre eau chaude sanitaire représente 11 % de votre facture. Le soleil est une source d'énergie inépuisable et gratuite. Grâce aux panneaux solaires thermiques, il est possible de capter les rayons du soleil pour chauffer son eau chaude sanitaire. Les panneaux solaires peuvent chauffer de 50 à 80 % des besoins annuels en eau chaude sanitaire. Mais comment ça marche ? A quelles conditions et à quel prix ? Conseils Thermiques vous propose ce guide complet pour vous lancer dans la production d'eau chaude solaire. [15]



Figure I. 9: le chauffe-eau solaire

I.8. Les tendances de l'énergie solaire:

I.8.1. Evolution technologique:

L'évolution technologique est plus rapide que je ne l'aurais imaginé. » Ce constat, c'est Jacques Lussier, président et chef des placements chez Ipsol Capital, qui le dresse. M. Lussier a fondé sa firme de gestion de portefeuilles en 2013. Au moment même où les robots conseillers font leur entrée sur le marché financier, Ipsol a mis au point une méthode similaire qui mise sur des programmes informatiques complexes pour analyser les titres, gérer les risques et construire ses modèles d'investissement. Se tailler une place dans un nouveau marché est une chose ; y rester représente un tout autre défi. Si les avancées technologiques sont rapides, elles sont difficiles à prévoir et à contrôler. « Il faut s'adapter en continu, affirme M. Lussier. Nous restons à l'affût de tout ce qui se fait en matière de recherche. On fait aussi du développement à l'interne. C'est une véritable course contre la montre. »

I.8.2. Augmentation de la part de l'énergie solaire:

La capacité installée mondiale d'énergie solaire était de 728 GW en 2020 et devrait atteindre 1 645 gigawatts (GW) en 2027, enregistrant un TCAC d'environ 13,78 % au cours de la période de prévision 2022-2027. Avec la pandémie de COVID-19 en 2020, le marché mondial de l'énergie solaire n'a connu aucun impact significatif direct. En fait, de nombreux pays ont accéléré la production et l'expédition de panneaux solaires, avec plusieurs projets mis en service au cours des troisième et quatrième trimestres de 2020. Des facteurs, tels que la baisse des prix et des coûts d'installation du solaire photovoltaïque et des politiques

gouvernementales favorables, devraient stimuler l'énergie solaire. marché au cours de la période de prévision. Cependant, l'adoption croissante de sources renouvelables alternatives, telles que le vent, devrait freiner la croissance du marché.

En raison de sa part élevée d'installations, le segment solaire photovoltaïque (PV) devrait dominer le marché de l'énergie solaire au cours de la période de prévision.

Une augmentation de l'utilisation de l'énergie solaire hors réseau en raison de la baisse du coût des équipements solaires photovoltaïques et des initiatives mondiales de soutien visant à éliminer les émissions de carbone devraient créer plusieurs opportunités pour le marché à l'avenir. [16]

En raison de l'augmentation de ses installations solaires, la région Asie-Pacifique a dominé le marché de l'énergie solaire au cours des dernières années et devrait être la région la plus grande et la plus dynamique du marché de l'énergie solaire au cours de la période de prévision.

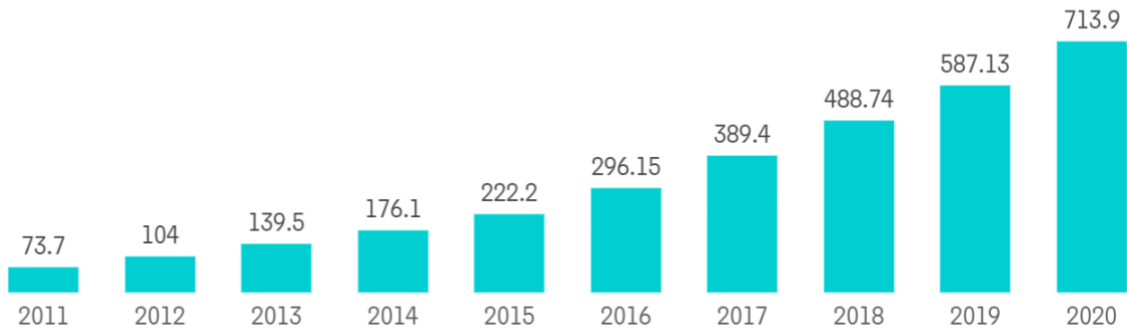


Figure I. 10: Solar PV installed capacity, in GW, Global 2011-2020. [16]



Figure I. 11: solar energy market-Growth rate by region 2022-2027.[16]

I.8.2. Perspectives d'avenir:

Aujourd’hui, de manière générale, le principal obstacle au développement de l’énergie photovoltaïque, c’est encore son coût. Produire de nouveaux équipements pour innover en matière d’énergie solaire a un prix élevé. Cela est particulièrement vrai pour les routes solaires, les panneaux photovoltaïques pluviaux et les fenêtres photovoltaïques, au coût de production important à cause de leurs matériaux très particuliers. De plus, ils n’ont pas encore vraiment prouvé leur efficacité. C’est pour cela que le déploiement de ces innovations est si lent, avec de nombreuses phases de test.

Quoi qu’il en soit, à l’heure actuelle, le gouvernement français et l’Union européenne ont tendance à soutenir autant que possible financièrement et humainement ces projets, au potentiel très fort. Il faut en être conscient, ces derniers vont à l’avenir permettre de produire des quantités d’énergie solaire impressionnantes. Ainsi, on estime qu’un kilomètre de route panneau solaire peut suffire pour alimenter l’éclairage public d’une ville de 5 000 habitants. De leur côté, les fenêtres photovoltaïques devraient être capables de produire 50 fois plus d’énergie solaire que les panneaux posés sur les toits. Tous ces projets, à l’exception des routes solaires gérées par le gouvernement, peuvent être installés et utilisés directement par les particuliers. Mais ils ont en revanche un prix conséquent. Ainsi, le four solaire de Solar Brother par exemple a un prix public compris entre 249 et 895 euros, en fonction du modèle choisi.

I.9. Conclusion:

L’énergie solaire est utilisée essentiellement pour deux usages : la production d’électricité (énergie solaire photovoltaïque ou énergie solaire thermodynamique) ou la production de chaleur (énergie solaire thermique). L’énergie solaire photovoltaïque transforme le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques intégrées à des panneaux qui peuvent être installés sur des bâtiments ou posés sur le sol alors que l’énergie solaire thermodynamique produit de l’électricité via une production de chaleur. L’électricité

produite peut être utilisée sur place ou réinjectée dans le réseau de distribution électrique. L'énergie solaire thermique produit de la chaleur qui peut être utilisée pour le chauffage domestique ou la production d'eau chaude sanitaire.



Chapitre 02
Chauffe Eau
Solaire

II.1. Introduction :

L'application actuelle la plus répandue de l'énergie solaire est la technologie des CES, qui peuvent être avantageusement utilisés pour les usages domestiques dans les régions comprises entre la 45^e parallèle nord et la 45^e parallèle sud, où la durée d'ensoleillement est supérieure en moyenne à 2000 heures par an ou dans des zones montagneuses de régions tempérées où le ciel est particulièrement dégagé.

Le chauffe-eau solaire est l'un des systèmes solaires thermiques qui peuvent être mis en application avec peu de moyen permettant d'obtenir des performances importantes pour la production de l'eau chaude sanitaire grâce au faible niveau de température demandé (entre 45 C et 60 C).

II.2. Présentation du chauffe-eau solaire

Un chauffe-eau solaire est un dispositif qui permet de capter la lumière du soleil naturelle. Il utilise ensuite les rayons solaires pour réchauffer l'eau des sanitaires. Généralement, il se compose d'un réservoir de stockage de l'eau chaude, d'un panneau solaire (thermique ou photovoltaïque) installé sur le toit, d'une régulation (thermique ou électrique) et relié entre eux soit avec une installation électrique -dans le cas d'un système photovoltaïque- ou -pour un système thermique- avec une pompe qui permet de transporter l'énergie solaire entre le réservoir et le capteur. [17]

II.3. Importance de l'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire est essentielle pour la vie quotidienne car elle est utilisée pour plusieurs tâches domestiques, telles que la douche, le bain, le lavage des mains, la vaisselle, le lavage des vêtements, etc. Elle est également importante pour des usages professionnels tels que dans les hôpitaux, les restaurants, les industries, etc.

L'eau chaude sanitaire joue également un rôle important dans la santé publique en permettant de maintenir une hygiène personnelle adéquate, en particulier pour les nourrissons, les personnes âgées et les personnes ayant des besoins spéciaux. L'eau chaude peut aider à tuer les bactéries et les germes qui se trouvent sur la peau et les surfaces. [23]

L'utilisation d'eau chaude dans les systèmes de chauffage peut également être bénéfique pour l'efficacité énergétique de la maison. Les systèmes de chauffage qui utilisent de l'eau chaude peuvent être plus efficaces que les systèmes de chauffage électriques ou à gaz.

Enfin, l'eau chaude sanitaire peut également être importante pour la satisfaction générale des utilisateurs d'une propriété. Les gens ont tendance à se sentir plus à l'aise et plus heureux dans un environnement où ils peuvent accéder à de l'eau chaude facilement et régulièrement.

En somme, l'eau chaude sanitaire est un élément clé de la vie quotidienne, de la santé publique, de l'efficacité énergétique et du bien-être des personnes. [20]

II.4. Objectif du chapitre

L'objectif d'un chapitre sur le chauffe-eau solaire est de fournir aux lecteurs des informations détaillées sur cette technologie de chauffage de l'eau à partir de l'énergie solaire

En somme, ce chapitre vise à fournir une compréhension complète de cette technologie de chauffage de l'eau respectueuse de l'environnement et à aider les lecteurs à décider si cette solution est adaptée à leurs besoins énergétiques et à leur budget.

II.5. Les fondamentaux du chauffe-eau solaire

II.5.1. Le principe de fonctionnement

Le fonctionnement du chauffe-eau solaire repose sur l'énergie du soleil. Il est donc composé de panneaux solaires, généralement placés sur le toit de l'habitation ou dans le jardin, et d'un ballon de stockage d'eau. Les panneaux solaires dotés de capteurs absorbent l'énergie du soleil qui réchauffe le fluide caloporteur situé dans des tubes en cuivre. Le liquide ainsi chauffé est alors conduit vers le ballon d'eau chaude où un échangeur thermique permet de transférer la chaleur du liquide caloporteur à l'eau du ballon de stockage. L'eau chaude peut ensuite être utilisée dans les sanitaires ou la cuisine. En cas de mauvais temps, pour continuer d'assurer la production d'eau chaude, le chauffe-eau solaire est généralement couplé à un système d'appoint capable de prendre le relais des panneaux solaires. [18]

II.5.2. Les composants d'un système de chauffe-eau solaire

Un chauffe-eau solaire, ce n'est pas un bloc unique qui produit de l'eau chaude, mais un ensemble d'éléments qui, raccordés, vont permettre au soleil de libérer l'énergie contenue dans sa lumière, et de produire d'ECS.

Ces éléments sont :

1. Les capteurs solaires: transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur (corps noir);
2. L'absorbeur: transfère la chaleur à un fluide caloporteur (généralement de l'eau glycolée) circulant au travers de chacun des capteurs;
3. Lorsque la différence de température entre la sonde capteur (T1) et la sonde en fond de ballon (T2) dépasse quelques degrés, les circulateurs s'enclenchent;
4. Le fluide caloporteur: circulant dans le circuit primaire, achemine alors l'énergie solaire depuis les capteurs vers le(s) ballon(s) de stockage à travers un échangeur.
5. Le(s) ballon(s) de stockage: accumulent(nt) la chaleur produite.
6. Si nécessaire, une source d'énergie d'appoint porte l'eau préchauffée à la température souhaitée. Celle-ci est alors acheminée vers les points de puisage par la boucle de distribution;
7. Un dispositif de régulation électronique: commande le fonctionnement du système (circulateurs et appoints) selon les conditions d'ensoleillement et la demande en eau chaude. [22]

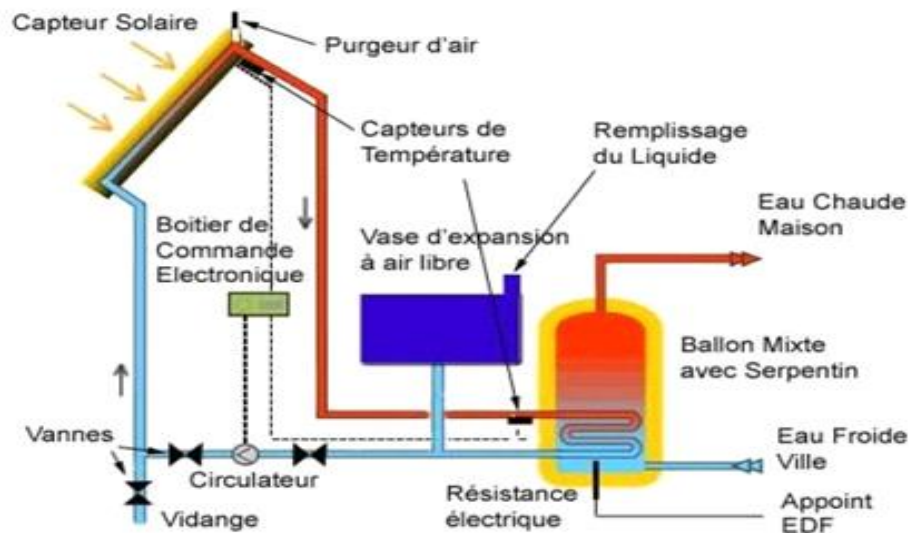


Figure II. 1: Le schéma des éléments d'un chauffe-eau solaire. [6]

II.5.3. Différents types de chauffe-eau solaire

Il y a trois types des chauffe eau solaires sont :

1-Chauffe-eau solaire à circulation forcée

C'est un système particulièrement prisé, pour une bonne raison, c'est qu'il peut s'installer dans la plupart des habitations, et quelle que soit leur configuration (figure II. 2). Les éléments sont séparés, et le ballon peut être placé où on le désire, que ce soit à la cave, dans une buanderie, dans les combles, au garage, ou à la salle de bains. C'est le système le plus coûteux, car il nécessite la présence d'une pompe électrique, et généralement d'un régulateur thermique. C'est également le dispositif le plus fragile, même si généralement le matériel est très solide, on n'est pas à l'abri d'une panne. [6]

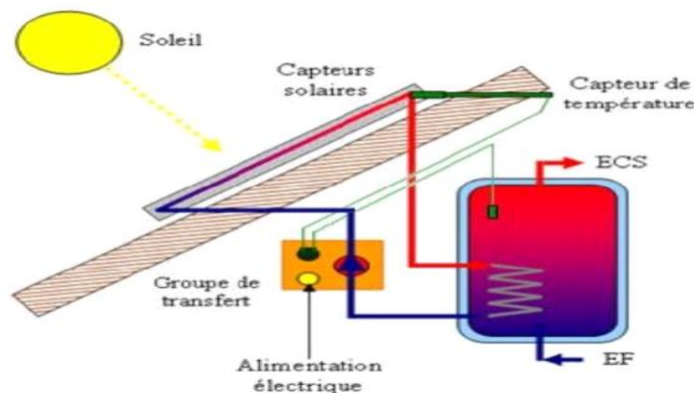
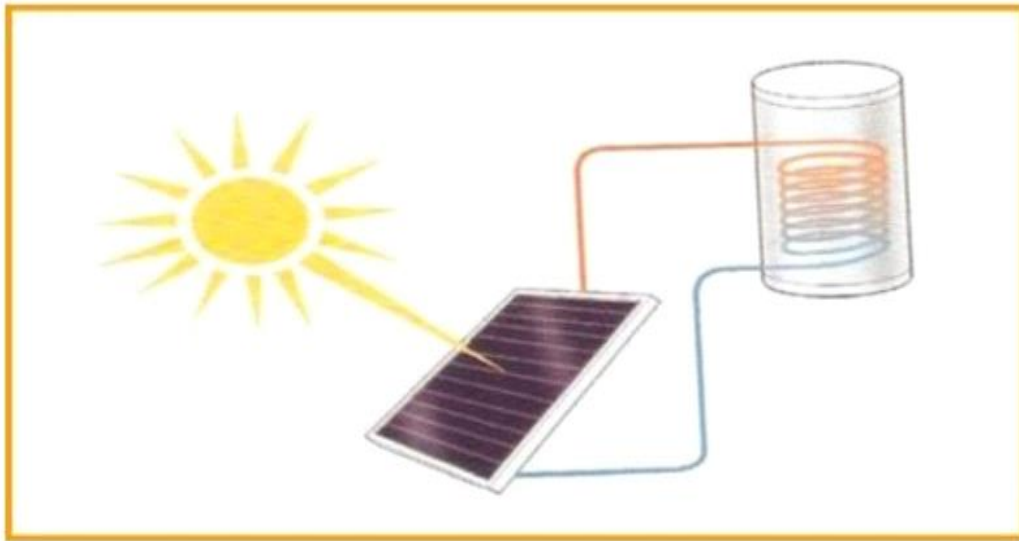


Figure II. 3: Chauffe-eau solaire à circulation forcée. [17]**2-Chauffe-eau solaire à thermosiphon**

C'est généralement la meilleure solution d'un point de vue qualité prix. L'installation est plus complexe, parce que le ballon doit toujours être à une hauteur plus élevée que les panneaux solaires (figure). On placera donc généralement le ballon dans les combles lorsque les panneaux seront sur la partie la plus basse du toit, ou bien en façade. C'est un système qui fonctionne sans pompe, l'eau remonte naturellement des panneaux jusqu'au ballon lorsqu'elle est chaude, et elle redescend en refroidissant. C'est donc moins coûteux en termes de matériel, il n'y a pas d'entretien ou presque, et la panne est quasiment impossible. [6]

**Figure II. 4: Chauffe-eau solaire à thermosiphon. [17]****3-Chauffe-eau solaire monobloc**

C'est un dispositif qui reprend le même système de fonctionnement qu'un chauffe-eau à thermosiphon. La différence est que tout le système est placé dans le même châssis (figure). C'est le dispositif le moins coûteux généralement, notamment en termes de pose. Il peut d'ailleurs être placé directement au sol, dans un jardin bien ensoleillé. En revanche, le ballon reste toujours à l'extérieur, et il est alors plus difficile de conserver l'eau à bonne température, notamment en hiver. C'est donc un dispositif que l'on utilisera plutôt en solution complémentaire d'un autre système. [6]

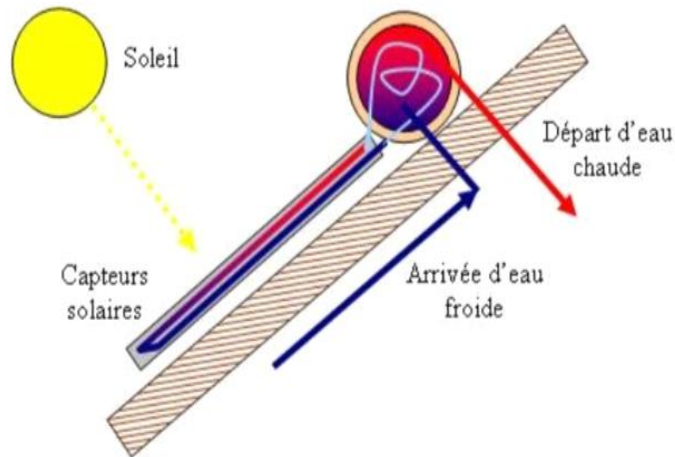


Figure II. 5: Chauffe-eau solaire monobloc. [6]

II.5.4. Les types de capteurs solaires thermiques

a. Capteur plan vitré

Ils comprennent un caisson isolant au-dessus duquel est fixée une vitre en verre ou en plastique. A l'intérieur, une feuille métallique noire absorbe l'énergie rayonnée et qui est emprisonnée dans le caisson. Cette chaleur est transmise à un autre fluide caloporteur qui ne gèle pas en hiver. Ce fluide caloporteur circule librement dans des tuyaux vers le point d'utilisation. L'élévation de température par rapport à la température de l'air ambiant peut atteindre +70°C. C'est l'idéal pour produire de l'eau chaude pour la maison ou pour le chauffage de tous les types de bâtiments. [6]

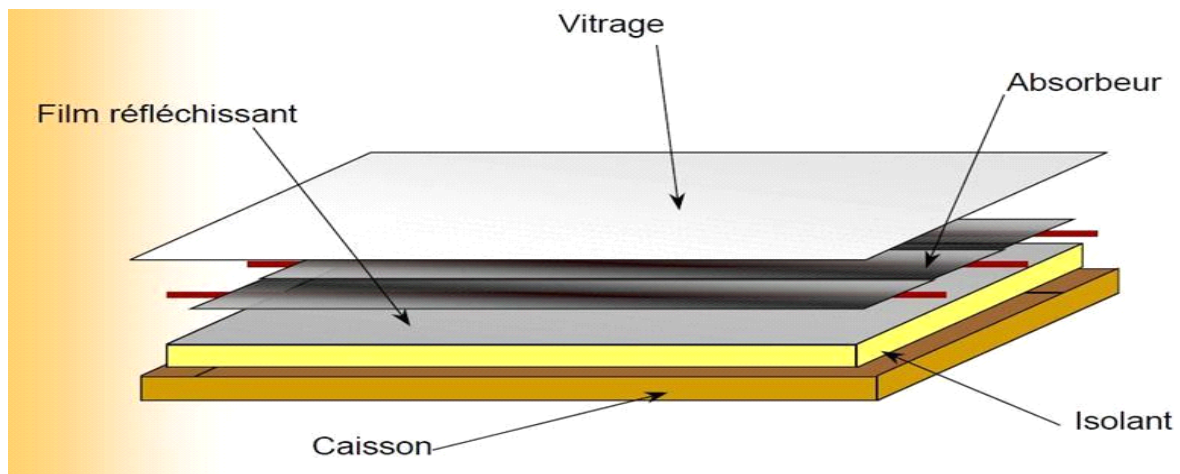


Figure II. 6: Composants d'un capteur plan avec vitrage. [17]

b. Capteur non vitré « dit capteur moquette »

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins performant. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C). Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est le chauffage des piscines extérieures parce qu'ils n'ont pas de vitrage, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a notamment du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée. Brassé par l'air chaud, ces capteurs absorbent la chaleur échangée en particulier au cours de la nuit lorsque la température est élevée en présence du vent à l'extérieur. [6]

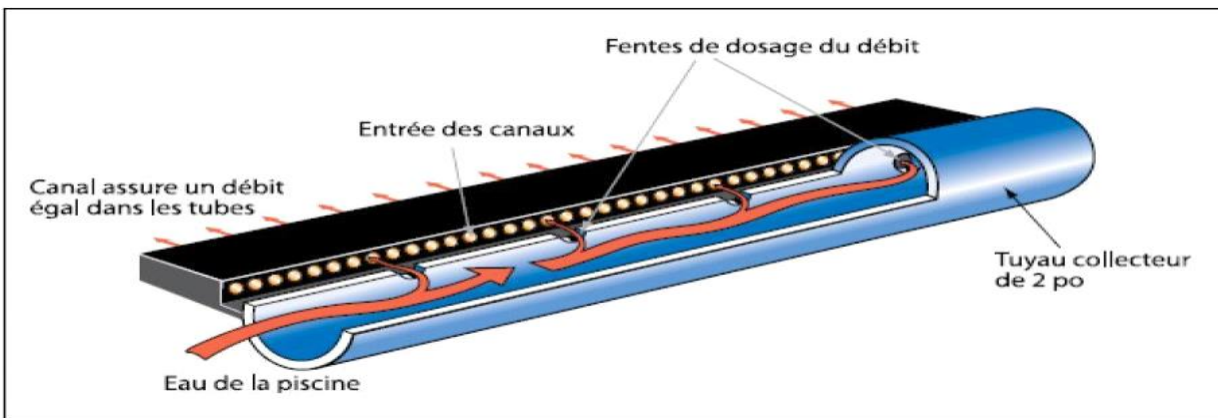


Figure II. 7: Capteur non vitré. [6]

c. Capteurs à tube sous vide

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont des capteurs solaires qui ont une meilleure performance que les capteurs plans pour un fonctionnement à haute température dans l'intervalle de 77 à 170 °C. Ils sont bien adaptés pour les applications de chauffage commercial et industriel.

Le capteur solaire à tubes sous vide est constitué des rangées de tubes de verre parallèles, reliées à un tuyau d'en-tête comme illustre à la figure (II-4). L'air à l'intérieur de chaque tube est retiré et atteint des pressions de vide autour de 10–3 mbar. Cela crée des conditions d'isolation élevées pour éliminer les pertes de chaleur par convection et par rayonnement, pour atteindre des températures plus élevées. Ces capteurs sont classés en fonction de leurs nœuds de liaison matériaux ; par exemple verre-métal ou verre-verre et par l'agencement des tubes (concentriques ou tube en U). A l'intérieur de chaque tube nous avons une ailette métallique plane ou incurvée, elle est attachée à un tube de cuivre. L'ailette est revêtue d'un film mince

dont les propriétés optiques sélectives permettent d'atteindre une forte absorbance du rayonnement solaire et réduites les pertes de chaleur par rayonnement



Figure II. 8: Capteur solaire a tube sous vide. [17]

En trouve plusieurs types de ce capteur :

- ✓ Capteur à tube vide a circulation directe
- ✓ Les capteurs à tube sous vide à effet "thermos"
- ✓ Les capteurs à tube sous vide "Schott"
- ✓ Capteurs a tube sous vide a "Caloduc"

d.Les capteurs hybrides

Les capteurs thermiques dits hybrides combinent la production d'eau chaude et d'électricité simultanément.

Ces capteurs sont principalement utilisés pour les besoins d'une pompe à chaleur. Puisqu'ils permettent de produire la chaleur et l'électricité nécessaire à faire fonctionner une pompe à chaleur, ou pour régénérer en énergie les sondes géothermiques d'une pompe à chaleur. [6]



Figure II. 9: capteurs hybrides (thermiques). [26]

II.5.5. Les avantages du chauffe-eau solaire

a.Énergie renouvelable et inépuisable

Le chauffe-eau solaire utilise l'énergie solaire qui est considérée comme étant une source d'énergie renouvelable et inépuisable, et la seule source renouvelable disponible dans le monde entier. [24]

b.Faible impact environnemental

Le chauffage solaire diminue également vos émissions de CO₂ et donc contribue à un meilleur environnement. L'utilisation de l'énergie solaire n'entraîne ni émission polluante, ni production de déchets dangereux. L'eau chaude solaire est écologique car elle lutte contre le réchauffement de notre planète et contre les gaz à effet de serre, aucune combustion n'étant nécessaire. [21]

c.Économies d'énergie

Utiliser l'énergie solaire permet également de préserver les combustibles fossiles et de réserver leur emploi à des usages plus spécifiques que la simple production de chaleur.

Permet de fournir de 30 à 50 % des besoins en chauffage et de 40 à 70 % d'eau chaude sanitaire de la maison suivant les régions.

Ce dispositif permet généralement l'arrêt complet de la chaudière principale pendant l'été et en demi-saison.

Des économies d'énergie considérables sur votre facture (on estime qu'un chauffe-eau solaire typique réduit vos coûts en énergie de 40 à 50%).[24]

d.Indépendance énergétique

En installant un chauffe-eau solaire, vous gagnez en indépendance énergétique et économique : vous n'êtes plus assujéti aux dépenses additionnelles dues aux augmentations des prix de l'énergie.

Un chauffe-eau solaire est un investissement sûr dont le coût peut être calculé avec précision sur vingt ans. [19]

II.5.6. Les défis du chauffe-eau solaire

a.Coût d'installation

Un chauffe-eau solaire est un dispositif plus coûteux au départ, qui demande donc un effort d'investissement. Le coût d'un ballon pour un chauffe-eau solaire est plus élevé qu'un système conventionnel, car il doit résister à la pression, répondre aux directives concernant l'hygiène de l'eau potable et satisfaire les exigences sévères concernant la protection anti-corrosion.

- ❖ Le coût final est soumis à de nombreux critères :
- ❖ Le type de système
- ❖ La puissance
- ❖ La taille du réservoir
- ❖ La quantité de capteurs solaires

b.Efficacité dans des conditions météorologiques défavorables

Un chauffe-eau solaire ne fonctionne pas la nuit, il faut donc investir sur un ballon de stockage très bien isolé pour avoir de l'eau chaude disponible le matin.

Un chauffe-eau fonctionne moins bien l'hiver, lors de journées couvertes, neigeuses ou pluvieuses alors que la demande énergétique est la plus élevée (surtout si le système est combiné, eau chaude/chauffage). [25]

c.Maintenance et durabilité

Un système de chauffe-eau solaire est en règle générale, un système fiable qui n'occasionne que très peu de panne.

La « courbe de vie » de ce genre de dispositifs se caractérise par une période initiale, pendant laquelle les défauts se manifestent, suivie d'une longue période de fonctionnement où le taux de défaillance devient très faible.

Autrement dit, si vous devez être embêté avec votre chauffe-eau solaire, ce sera souvent durant la première année de l'installation.

Les pannes fréquentes sont:

- ✚ Fuite dans le circuit : souvent due à une mauvaise soudure ou à un mauvais raccord.
- ✚ Isolation des tuyaux endommagée : souvent par négligence lors du montage.
- ✚ Condensation dans le capteur : soit due à un défaut à la fabrication, soit due à une négligence durant le montage, qui a endommagée la vitre, le joint de la vitre ou le caisson du panneau solaire. Cela n'est pas très grave si cela n'entraîne pas de corrosion.
- ✚ Vitrage endommagé : là encore, dû à une négligence au montage. Toujours vérifier avant de signer la réception des travaux.
- ✚ Pompe endommagée : soit par un débris qui est resté dans le circuit au montage, ou par une défaillance des sondes qui a entraîné une surchauffe du circuit.
- ✚ Circuit insuffisamment purgé : cela peut arriver lors d'une maintenance ou un hiver particulièrement rigoureux.
- ✚ Régulation douteuse : mauvais réglages à la mise en service ou défectuosité de l'appareil en cours d'utilisation.
- ✚ Fuite du ballon : défaut de fabrication ou corrosion excessive et accélérée.

On estime aujourd'hui que la durée de vie d'un système solaire thermique est de 20 ans minimum (sûrement 25 ans avec de bons composants).

Mais pour qu'une installation ait cette durée, il faut quelques conditions :

- Une bonne conception du système solaire par rapport à la consommation mesurée. Éviter le surdimensionnement et les périodes d'arrêt trop longues.
- Une planification du système et un choix des matériels soignés.
- L'utilisation de composants de haute qualité.
- Une installation soignée, principalement au niveau de tous les raccords de plomberie.
- Une surveillance étroite de l'installation.
- Une vérification soignée lors de l'inspection, de la certification et de l'essai de qualification.
- Une vérification minutieuse du comportement du système lors du fonctionnement, et un entretien rigoureux.

II.5.7. Les applications du chauffe-eau solaire

a. Résidentiel (individuel)

Le Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI) permet de produire généralement entre 50 et 70% de vos besoins annuels en eau chaude sanitaire, et jusqu'à 100% l'été.

L'installation solaire thermique ci-dessous peut se décomposer en 3 circuits :

- ✓ Le circuit solaire rempli d'eau glycolée
- ✓ Le circuit d'eau sanitaire
- ✓ Le circuit d'appoint, rempli d'eau de chauffage. [27]

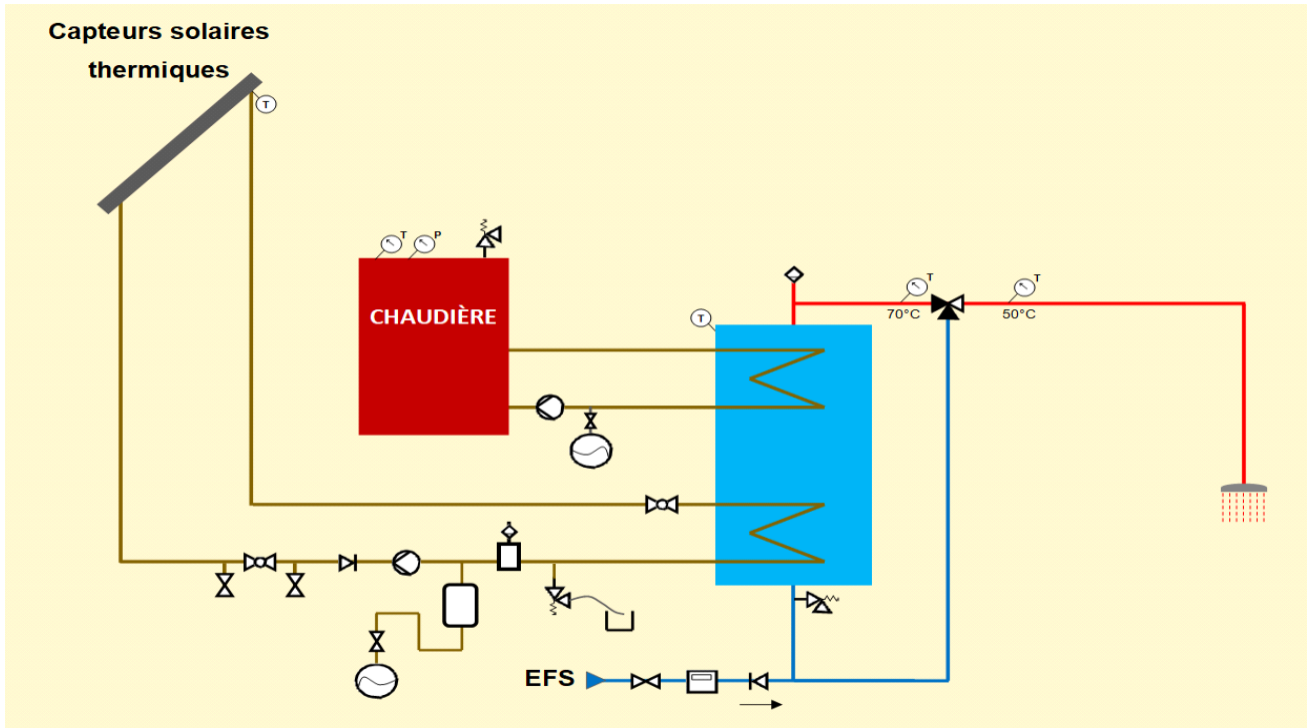


Figure II. 10: schéma de chauffe-eau solaire individuel. [27]

b. Collectivités et bâtiments publics

Le principe fonctionnement d'un chauffe-eau solaire collectif est semblable au CESI, avec cependant quelques particularités.

Le plus souvent, sur un CESC, l'échange de chaleur entre les capteurs et l'ECS ne se fait plus dans le ballon de stockage, mais dans un " échangeur à plaques " extérieur. Celui-ci permet d'obtenir une plus grande surface d'échange, donc une plus grande puissance, avec un encombrement réduit. En plus du gain en efficacité, il est plus facile d'intervenir sur un échangeur à plaques que sur celui d'un ballon. [27]

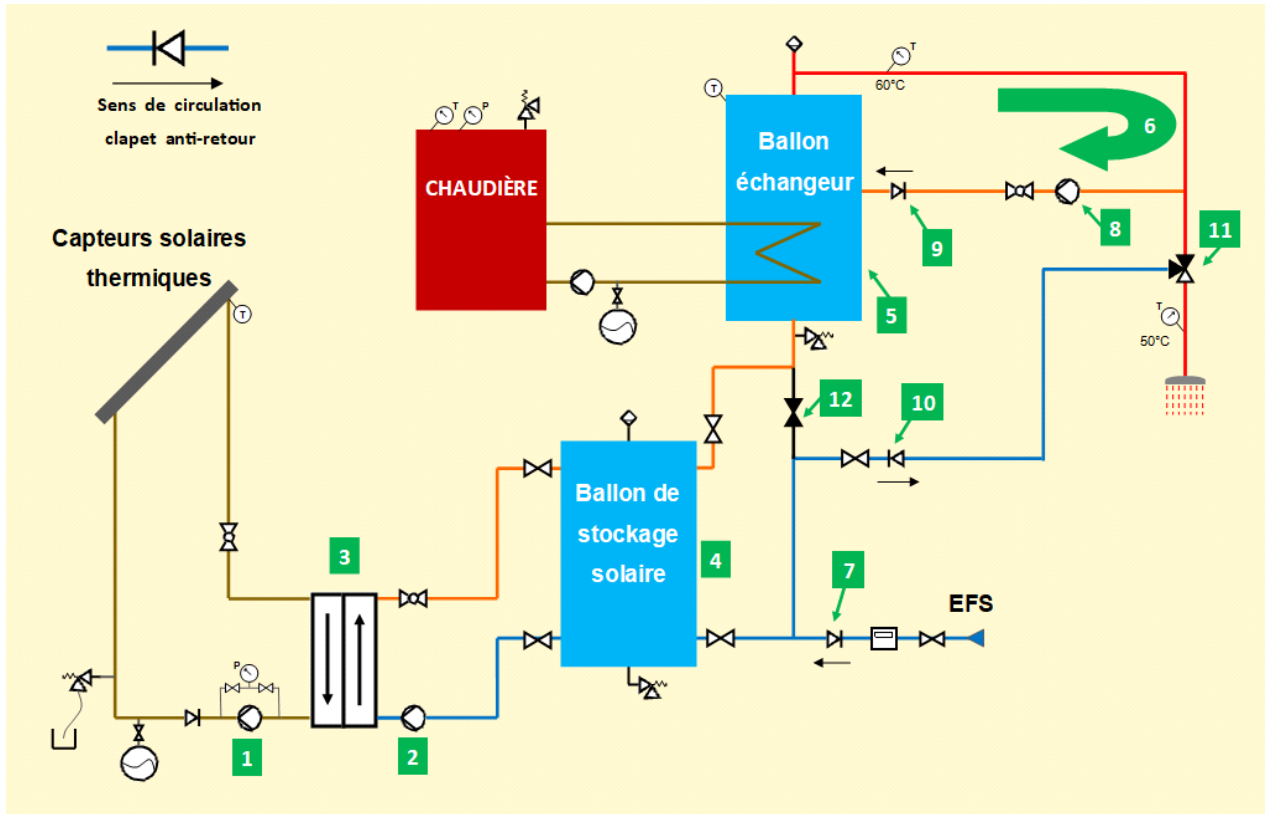


Figure II. 11: schéma de chauffe-eau solaire collective. [27]

c.Hôtellerie et restauration

Dans l'hôtellerie et la restauration comme dans toutes les branches du tourisme, on s'intéresse de plus en plus à l'écologie. Les vacanciers sont de plus en plus nombreux à opter pour des séjours respectueux de l'environnement. C'est pourquoi installer un chauffe-eau solaire et des panneaux solaires dans un hôtel ou restaurant serait une nouvelle étape vers l'évolution de offre touristique dans un secteur très concurrentiel.

Les termes d'utilisation des panneaux solaires sont parfaits dans un hôtel. En effet, c'est l'été qui reçoit le plus de clients et c'est aussi au cours de cette période que le soleil offre le meilleur. Donc c'est mieux de utilise les CES pour couvrir les besoins en eau chaude.

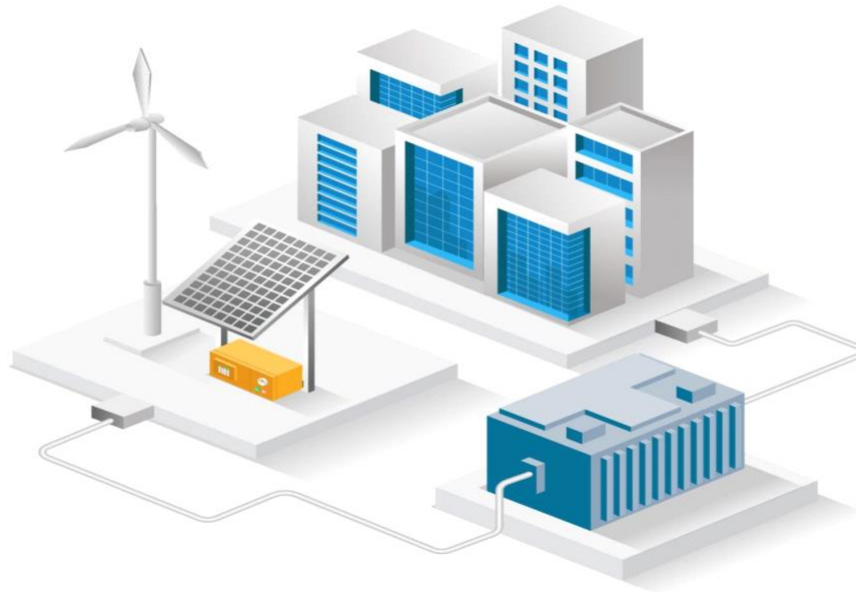


Figure II. 12: chauffe-eau solaire dans un hotel

D.Autres applications

❖ Chauffage solaire d'une piscine

Vous pouvez également utiliser l'énergie solaire pour chauffer l'eau de votre piscine.

Le fonctionnement du chauffage solaire d'une piscine est plutôt simple : l'eau de la piscine qui passe dans le circuit de filtration est acheminée vers le ballon de stockage ou directement vers les capteurs solaires, où elle est filtrée et chauffée. Ensuite, l'eau chaude est renvoyée dans la piscine.

Les deux systèmes les plus répandus pour le chauffage d'une piscine sont les suivants :

Tapis solaire : ce système consiste à dérouler du « tapis solaire » sur le sol près de votre piscine. Il s'agit de capteurs non vitrés souples, composés d'EPDM. Ces capteurs simples et peu coûteux chauffent à maximum 30 °C, ce qui correspond à la température idéale d'une piscine. C'est une solution abordable, mais qui est insuffisante quand il n'y a pas assez de soleil.

Chauffe-eau solaire : le chauffe-eau solaire peut également être utilisé pour fournir de l'eau chaude à une piscine. Cela reste une solution écologique et économique, mais son installation demande tout de même un certain budget

II.5.8. Les normes et réglementations du chauffe-eau solaire

a. Normes de qualité et de performance

Ces normes établissent des critères pour la performance, l'efficacité, la sécurité et la durabilité des systèmes de chauffage solaire. Les fabricants de chauffe-eau solaires doivent répondre à ces normes pour garantir la qualité de leurs produits et leur sécurité pour les utilisateurs finaux. Les normes de qualité et de performance aident également les consommateurs à évaluer et à comparer les différentes options de chauffage solaire disponibles sur le marché

Voici quelques-unes des normes les plus courantes :

Normes ISO : Les normes ISO (Organisation internationale de normalisation) définissent les exigences relatives aux performances, aux méthodes d'essai et aux caractéristiques des systèmes de chauffage solaire.

Normes EN : Les normes EN (Européen Norme) sont des normes européennes qui établissent les exigences de qualité et de performance pour les systèmes de chauffage solaire.

Normes SRCC : Les normes SRCC (Solar Rating and Certification Corporation) sont des normes nord-américaines qui établissent les critères de performance et de sécurité pour les chauffe-eaux solaires.

Normes CSTB : Les normes CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) sont des normes françaises qui réglementent la conception, l'installation et l'entretien des systèmes de chauffage solaire.

Normes CE : Les normes CE sont des normes de conformité européennes qui garantissent que les produits répondent aux exigences de sécurité, de santé et d'environnement de l'Union européenne. [28]

b. Incitations fiscales et subventions

Dans de nombreux pays, les gouvernements offrent des incitations fiscales et des subventions pour encourager l'installation de chauffe-eau solaires et d'autres technologies d'énergie renouvelable. Voici quelques exemples de mesures incitatives disponibles dans certains pays :

En France, le crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE) permet aux propriétaires de bénéficier d'un crédit d'impôt de 30% sur le coût total du chauffe-eau solaire.

En Allemagne, les propriétaires peuvent bénéficier d'une subvention allant jusqu'à 30% du coût total d'installation d'un chauffe-eau solaire, dans le cadre du programme de subventions pour les énergies renouvelables (EEG).

Aux États-Unis, le gouvernement fédéral offre un crédit d'impôt fédéral pour l'installation d'un chauffe-eau solaire, qui permet de déduire jusqu'à 26% du coût total de l'installation de l'impôt fédéral sur le revenu.

Au Canada, la province de l'Ontario offre une subvention pour les maisons équipées de chauffe-eau solaires, qui peut atteindre jusqu'à 20% du coût total de l'installation.

Il est important de noter que ces mesures incitatives sont souvent soumises à des critères d'éligibilité spécifiques, tels que le lieu d'installation, la taille et la capacité du chauffe-eau solaire, ainsi que la certification du produit et de l'installateur. Il est donc recommandé de se renseigner auprès des autorités compétentes ou de professionnels qualifiés pour connaître les conditions spécifiques applicables à votre situation.[28]

c.Cadre réglementaire

Le cadre réglementaire du chauffe-eau solaire varie en fonction du pays et de la région où vous vous trouvez. Dans de nombreux pays, il existe des normes et des réglementations en matière d'installation et de fonctionnement des systèmes de chauffe-eau solaires. Voici quelques exemples de réglementations courantes :

En Europe, les normes applicables aux chauffe-eau solaires sont définies dans la directive européenne sur les équipements sous pression (PED) et la directive sur l'efficacité énergétique (DEE). Ces directives établissent des exigences de qualité et de sécurité pour les systèmes de chauffe-eau solaires, ainsi que des normes d'efficacité énergétique pour garantir leur performance optimale.

Aux États-Unis, les chauffe-eaux solaires sont réglementés par l'Energy Policy Act de 2005, qui établit des normes de performance minimales pour les systèmes de chauffe-eau solaires et offre des crédits d'impôt pour leur installation.

Au Canada, la norme CSA F379 définit les exigences de sécurité pour les systèmes de chauffe-eau solaires.

Il est important de se renseigner sur les réglementations en vigueur dans votre pays ou région pour garantir que votre système de chauffe-eau solaire est installé et fonctionne en toute sécurité et conformément aux normes de performance applicables. En outre, il est recommandé de faire installer votre système de chauffe-eau solaire par des professionnels qualifiés qui connaissent les réglementations locales et peuvent vous assurer que votre installation est conforme aux normes en vigueur.

II.5.9. Les tendances du chauffe-eau solaire

a.Évolution technologique

L'engouement total autour de l'énergie solaire ne cesse de se développer. C'est cette demande croissante qui motive l'innovation et le progrès technique.

Voici quelques-unes des tendances technologiques les plus récentes pour les chauffe-eaux solaires :

Matériaux avancés : les nouvelles technologies de matériaux, telles que les tubes à vide, les plaques absorbantes hautement sélectives et les matériaux de stockage de chaleur à changement de phase, permettent une meilleure absorption de la chaleur et un stockage plus efficace de l'énergie solaire.

Capteurs solaires de nouvelle génération : les capteurs solaires plats à haute performance, les capteurs solaires à concentration et les capteurs hybrides photovoltaïques-thermiques (PVT) sont de plus en plus utilisés pour maximiser la production d'énergie solaire.

Contrôleurs et systèmes de suivi : les nouveaux contrôleurs et les systèmes de suivi améliorent l'efficacité des systèmes de chauffe-eau solaires en ajustant automatiquement la position des capteurs solaires pour optimiser l'exposition au soleil.

Stockage de l'énergie : les nouveaux systèmes de stockage de l'énergie solaire, tels que les réservoirs de stockage à haute efficacité et les systèmes de stockage à chaud et à froid, permettent de stocker de grandes quantités d'énergie solaire pour une utilisation ultérieure.

Intégration à d'autres systèmes : les systèmes de chauffe-eau solaires sont de plus en plus intégrés à d'autres technologies d'énergie renouvelable, telles que les systèmes de chauffage par le sol et les pompes à chaleur, pour créer des solutions énergétiques complètes et efficaces. [29]

b. Augmentation de l'utilisation du chauffe-eau solaire dans le monde

Le marché des chauffe-eau solaires devrait enregistrer un TCAC de plus de 5,5 % sur la période 2021-2026. L'épidémie mondiale de COVID-19 au premier trimestre 2020 a entraîné une perturbation de la chaîne d'approvisionnement en raison des mesures de confinement prises par divers pays du monde. L'impact sur l'économie mondiale devrait être un autre facteur majeur susceptible d'affecter négativement cette utilisation de la technologie. Cependant, les effets du virus semblent maîtrisés dans de nombreux pays. Avec la levée des mesures de confinement, les économies de ces pays sont dopées par d'importants plans de relance. Cependant, d'autres pays semblent encore être au cœur de la crise. Des facteurs tels que la réduction de l'empreinte carbone et l'augmentation de l'efficacité sont associés à l'augmentation de l'utilisation des radiateurs solaires en raison de la baisse des prix, et l'adoption croissante des chauffe-eau solaires vitrés devrait stimuler le marché des chauffe-eau solaires au cours de la période de prévision. De plus, des politiques gouvernementales favorables et des préoccupations environnementales croissantes devraient stimuler cette technologie au cours de la période de prévision. Cependant, l'amélioration de la rentabilité associée aux batteries ou aux modules devrait limiter le marché des chauffe-eau solaires au cours de la période de prévision, car l'installation du chauffe-eau solaire nécessite une

modification majeure des systèmes de plomberie d'un bâtiment et a une durée de vie relativement inférieure à celle du solaire photovoltaïque.

Le chauffe-eau solaire vitré devrait être le plus grand marché au cours de la période de prévision, en raison de facteurs tels qu'une efficacité accrue et des coûts de maintenance réduits.

Les gouvernements font pression pour que des programmes poussent le chauffe-eau solaire à réduire les chauffe-eaux à gaz et les systèmes de chauffage urbain. Des programmes comme la ville solaire de Séoul sont mis en place pour subventionner le marché des chauffe-eau solaires et les rendre moins chers que leurs alternatives. Ceci, à son tour, est susceptible de créer des opportunités pour les acteurs impliqués dans le marché dans un proche avenir.

La région du Moyen-Orient et de l'Afrique devrait dominer le marché, la majorité de la demande provenant de pays tels que l'Arabie saoudite, la Turquie. [30]

c.Perspectives d'avenir

Le chauffage solaire a un avenir prometteur en raison de sa capacité à produire de l'énergie propre et renouvelable à partir de sources illimitées et gratuites, c'est-à-dire le soleil. Voici quelques-unes des perspectives du chauffage solaire :

Développement de nouvelles technologies : Les avancées technologiques dans le domaine des capteurs solaires thermiques et des matériaux de stockage de chaleur ont conduit à des améliorations significatives dans l'efficacité des systèmes de chauffage solaire. Ces développements permettent aux systèmes de chauffage solaire de fournir de l'énergie plus efficacement et à un coût moindre, augmentant ainsi leur adoption.

Réduction des coûts : La baisse des coûts des capteurs solaires, des matériaux de stockage de chaleur et des systèmes de régulation, associée aux avancées technologiques, rend le chauffage solaire plus accessible aux particuliers et aux entreprises.

Incitations gouvernementales : De nombreux gouvernements offrent des incitations financières et fiscales pour encourager l'installation de systèmes de chauffage solaire, ce qui encourage la croissance du marché et l'adoption de la technologie.

Prise de conscience environnementale : La prise de conscience de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de lutter contre le changement climatique conduit de plus en plus de personnes à rechercher des sources d'énergie plus propres et renouvelables, comme le chauffage solaire.

Émergence de nouvelles applications : Les avancées technologiques ont ouvert de nouvelles applications pour le chauffage solaire, comme le chauffage de l'eau et le chauffage des piscines. De plus, les systèmes de chauffage solaire peuvent être intégrés à d'autres

technologies, comme les systèmes de chauffage géothermique et les systèmes de chauffage central, pour maximiser leur efficacité.

Dans l'ensemble, les perspectives du chauffage solaire sont très positives. Avec la baisse des coûts, les avancées technologiques et les incitations gouvernementales, le chauffage solaire devient une option de plus en plus accessible et attractive pour les particuliers et les entreprises qui cherchent à réduire leur empreinte carbone tout en économisant de l'argent sur leur facture d'énergie. [31]

II.6. Conclusion

II.6.1. Bilan sur le chauffe-eau solaire

Le chauffe-eau solaire est une alternative intéressante pour les consommateurs soucieux de l'environnement et cherchant à réduire leur consommation d'énergie. Il s'agit d'un système qui utilise l'énergie solaire pour chauffer l'eau, permettant ainsi de réaliser des économies sur les factures d'électricité ou de gaz.

Les avantages du chauffe-eau solaire sont nombreux. Tout d'abord, il permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la protection de l'environnement. De plus, le chauffe-eau solaire est une source d'énergie renouvelable, gratuite et disponible en abondance, ce qui réduit la dépendance aux énergies fossiles.

En outre, le coût d'installation d'un chauffe-eau solaire peut être élevé, mais il est rapidement amorti grâce aux économies réalisées sur la facture d'énergie. Enfin, le chauffe-eau solaire nécessite peu d'entretien et a une durée de vie plus longue que les chauffe-eaux traditionnels.

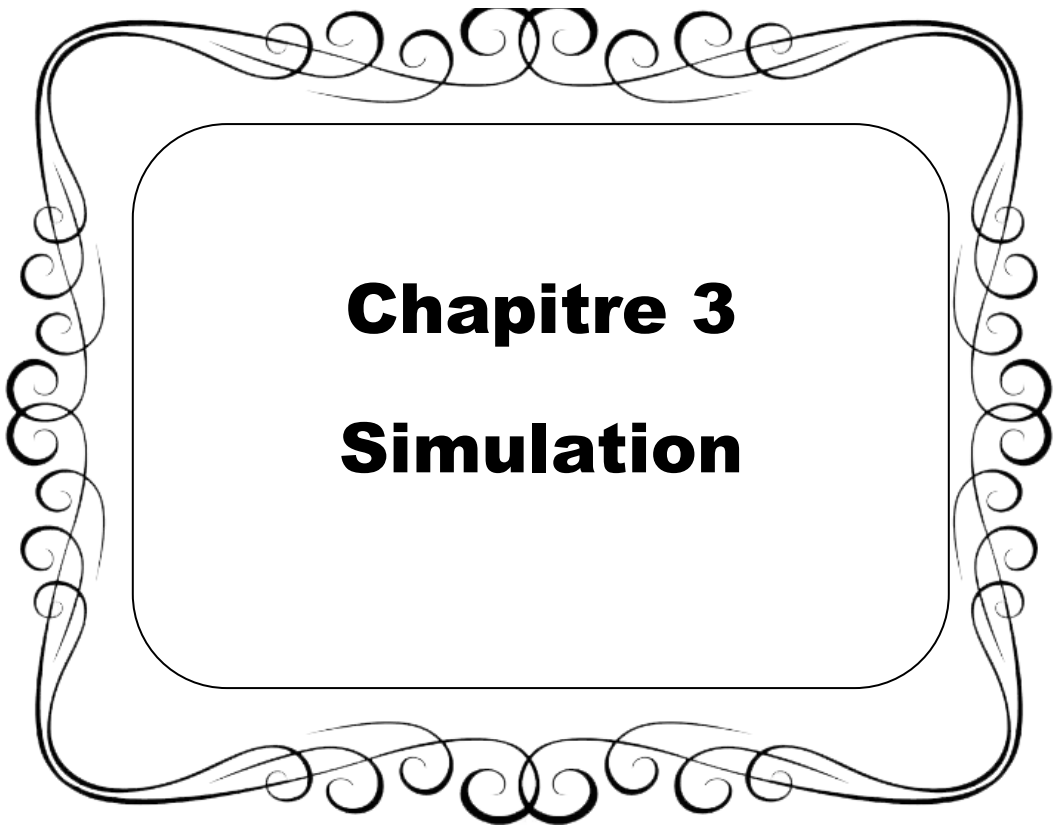
Cependant, il convient de noter que l'efficacité du chauffe-eau solaire dépend en grande partie des conditions météorologiques et de l'exposition au soleil. Par conséquent, son utilisation peut être limitée dans certaines régions ou en fonction de la saison.

En conclusion, le chauffe-eau solaire est une option écologique et économique pour chauffer l'eau dans les foyers. Bien que son efficacité puisse varier en fonction des conditions environnementales, il représente une alternative prometteuse aux méthodes de chauffage d'eau plus traditionnelles. [32]

II.6.2. Importance du chauffe-eau solaire dans la transition énergétique

Le chauffe-eau solaire est un équipement important dans la transition énergétique. Il permet d'utiliser une énergie renouvelable et gratuite, de réaliser des économies d'énergie et de préserver l'environnement. Le chauffe-eau solaire est une alternative technologique fiable, économique et écologique qui contribue à la réduction des émissions de CO₂. Il est également éligible aux aides à la transition énergétique. En somme, le chauffe-eau solaire est un

équipement qui fonctionne à l'énergie propre et durable, et qui peut jouer un rôle important dans la transition énergétique



Chapitre 3
Simulation

III.1. Introduction

Le système énergétique est devenu de plus en plus complexe avec l'introduction de nouvelles technologies et sources d'énergie. Pour optimiser la conception et l'exploitation des systèmes énergétiques, les simulateurs sont devenus un outil indispensable pour les ingénieurs et les décideurs.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'utilisation de la simulation pour faire une évaluation technique et économique d'un chauffe-eau solaire résidentiel à l'aide de System Advisor Model (SAM).

III.2. Présentation du logiciel

Le System Advisor Model (SAM) est un modèle de performance et financier conçu pour faciliter la prise de décision pour les personnes impliquées dans l'industrie des énergies renouvelables:

- ✓ Chefs de projets et ingénieurs
- ✓ Analystes politiques
- ✓ Développeurs de technologie
- ✓ Des chercheurs

SAM effectue des prévisions de performances et des estimations de coûts énergétiques pour les projets d'électricité connectés au réseau en fonction des coûts d'installation et d'exploitation et des paramètres de conception du système que vous spécifiez comme entrées du modèle.

Les projets peuvent être soit du côté client du compteur de services publics, achetant et vendant de l'électricité aux tarifs de détail, Ou du côté utilitaire du compteur, vendant de l'électricité à un prix négocié par le biais d'un achat d'électricité Convention (PPA).

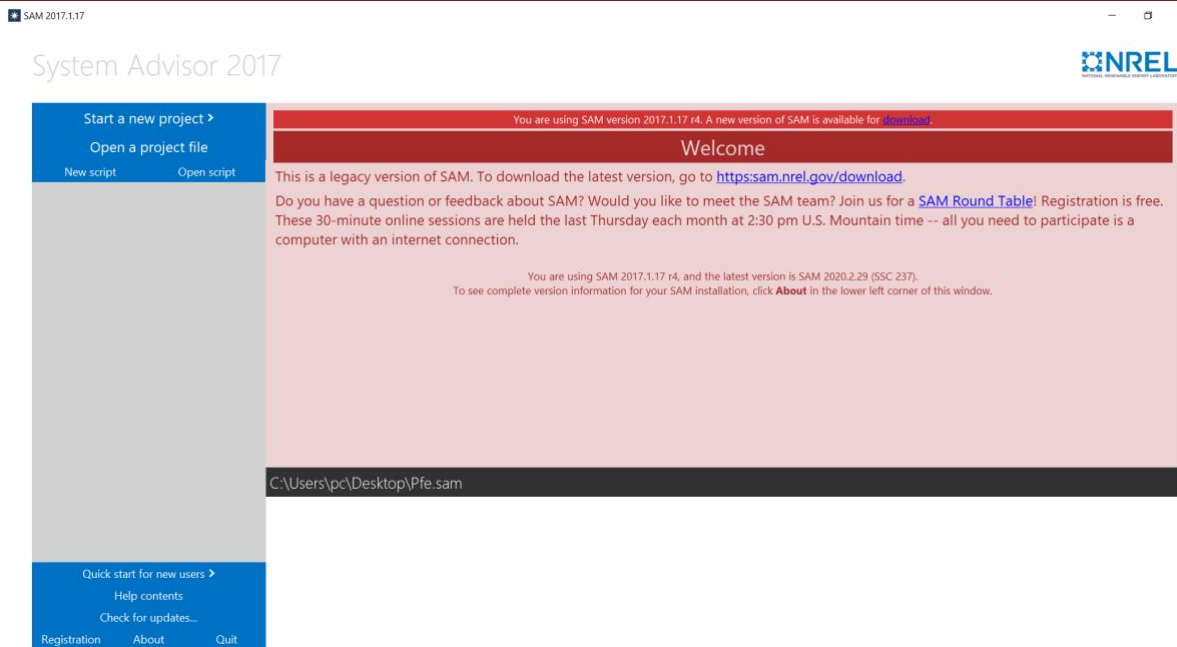


Figure III. 1: page d'accueillie de SAM

III.3. Les étapes de la simulation

III.3.1. Localisation et ressource

La page localisation et ressource nous propose trois options pour choisir un fichier météo pour notre analyse :

Téléchargez un fichier météo à partir de la base de données nationale sur le rayonnement solaire NREL

Choisissez un fichier météo dans la bibliothèque de ressources solaires

Utiliser un fichier météo spécifique sur disque

Dans notre cas en pris la deuxième option pour choisir l'université d'ain témouchent quelle est à 35.294 °N de latitude et -1.123 °E de longitude avec un moyen annuel de température de 17.5 ° C et un moyen annuel de vitesse de vente de 2.1ms.

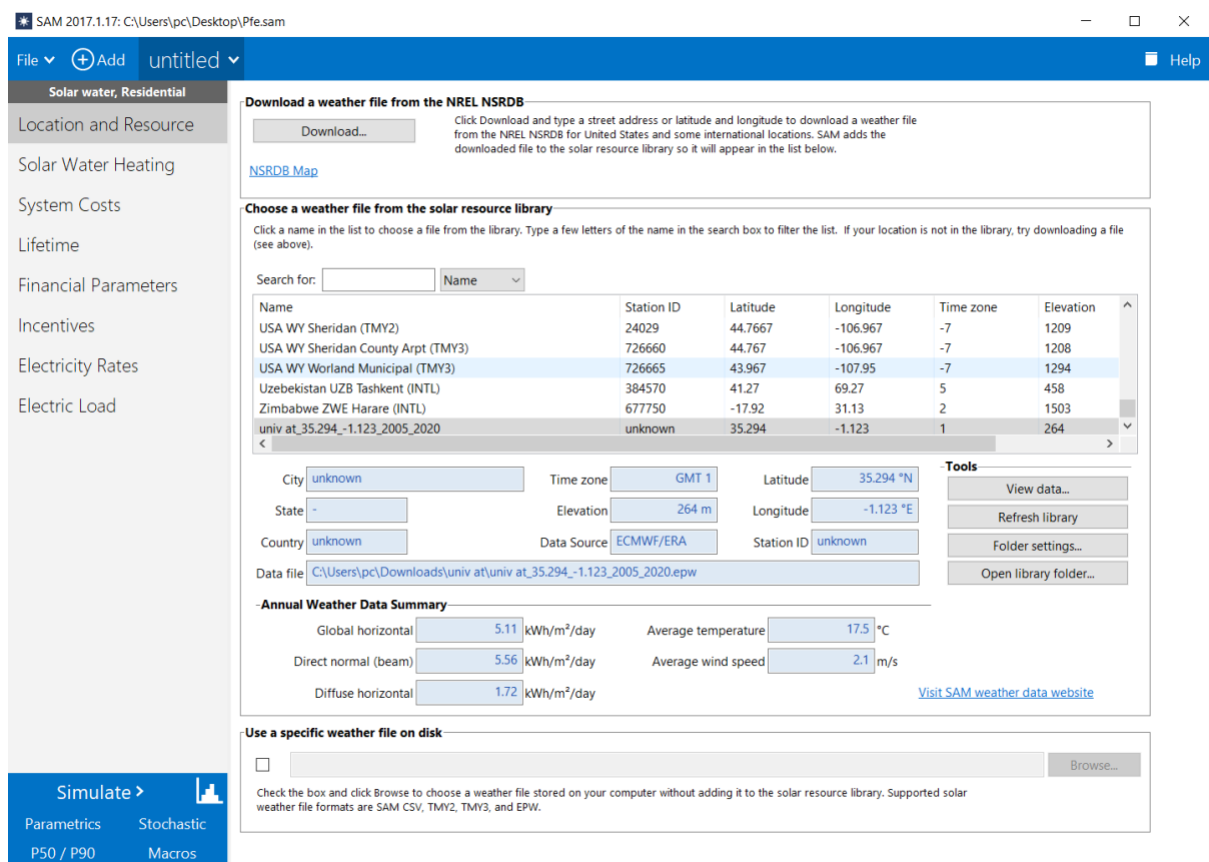


Figure III. 2: page de localisation et ressource

III.3.2. Chauffe-eau solaire

La page Système CES est l'endroit où nous spécifions les paramètres de conception pour le système de chauffe-eau solaire.

On trouve dans cette page

Prélèvement d'eau chaude : dont on a proposé 200kg la consommation quotidienne moyenne d'eau chaude ce qui donne 73000 kg annuellement

III.3.3. System:

Tilt: 30 deg

Azimuth: 180 deg

Total system flow rate: 0.0910556

Working fluid: glycol

Number of collectors: 2

Diffuse sky model: isotropic

Irradiance inputs: beam and diffuse

Albedo: 0.2

Total system collector area (m2): 5.14 m

Rated system size (kWt): 3.05059 Kw

Pour Les entrées du collecteur et de réservoir et de la tuyauterie, qu'ils décrivent les caractéristiques physiques. On a choisi un ensemble de paramètres à partir de la bibliothèque.

III.3.4. Capteur:

Capteur solaire thermique plan vitré (green one tec) de production étrangère (Austria)

1.Parameters de capteur

Collector area: 2.57

FRta : 0.679

FRUL (W/m2-°C): 2.85

Incidence angle modifier (IAM): 0.11

Test fluid: 0

Test flow rate : 0.0514

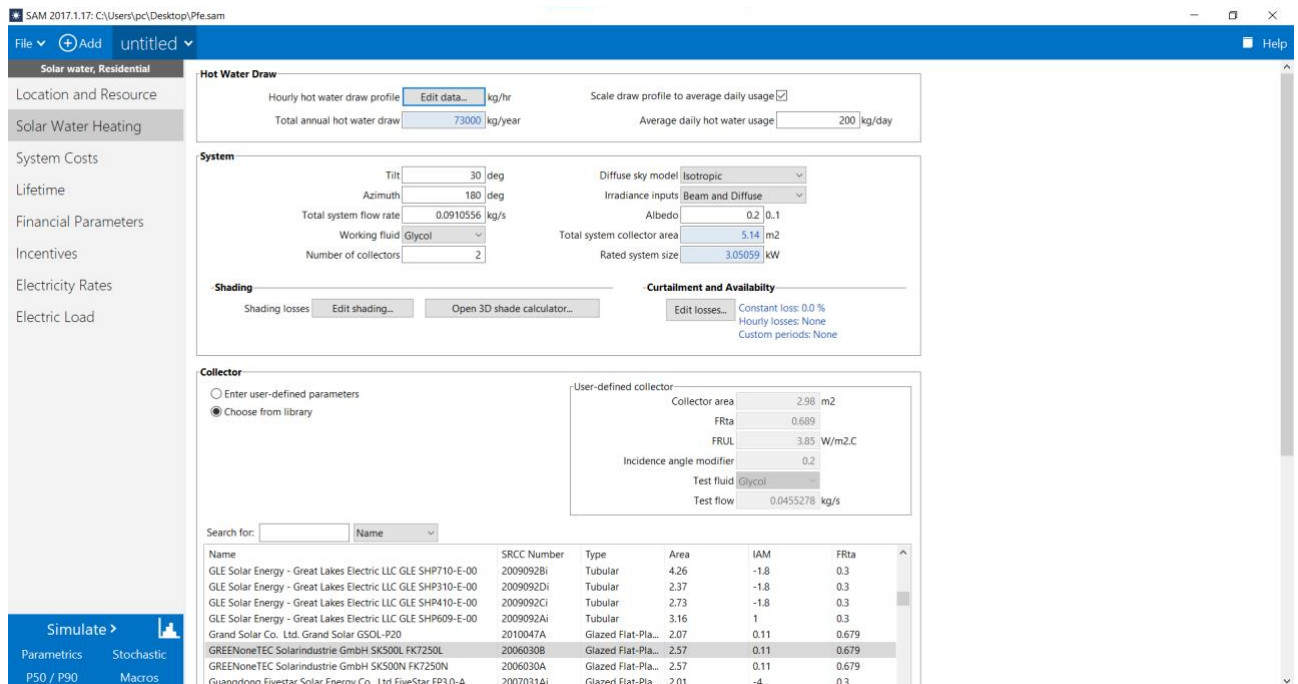


Figure III. 3: page de Chauffe-eau solaire

III.3.5. Réservoir solaire et échangeur de chaleur :

Solar tank volume: 0.3

Solar tank height to diameter ratio: 2

Solar tank heat loss coefficient (U value): 1

Solar tank maximum water temperature: 99 C

Heat exchanger effectiveness: 0.75

Outlet set temperature: 55 C

Mechanical room temperature: 20 C

III.3.6. Tuyauterie et pompage :

Total piping length in system: 10

Pipe diameter: 0.019

Pipe insulation conductivity: 0.03

Pipe insulation thickness:0.006

Pump power: 45

Pump efficiency: 0.85

Solar Tank and Heat Exchanger			
Solar tank volume	<input type="text" value="0.3"/>	m3	Heat exchanger effectiveness
Solar tank height to diameter ratio	<input type="text" value="2"/>		<input type="text" value="0.75"/>
Solar tank heat loss coefficient (U value)	<input type="text" value="1"/>	W/m2.C	Outlet set temperature
Solar tank maximum water temperature	<input type="text" value="99"/>	C	<input type="text" value="55"/>
			Mechanical room temperature
			<input type="text" value="20"/>
Piping and Pumping			
Total piping length in system	<input type="text" value="10"/>	m	Pump power
Pipe diameter	<input type="text" value="0.019"/>	m	<input type="text" value="45"/>
Pipe insulation conductivity	<input type="text" value="0.03"/>	W/m.C	Pump efficiency
Pipe insulation thickness	<input type="text" value="0.006"/>	m	<input type="text" value="0.85"/>
Advanced			
Use custom mains profile	<input type="checkbox"/>		Use custom set temperatures
Hourly custom mains profile	<input type="text" value="Edit data..."/>	C	Hourly custom set temperatures
			<input type="text" value="Edit data..."/>

Figure III. 4: page de stockage et Tuyauterie et pompage

III.3.7. Coût du système

SAM utilise les variables de la page Coûts du système CES pour calculer le coût d’investissement du projet et les coûts d’exploitation annuels déclarés dans les flux de trésorerie du projet et utilisés pour calculer les mesures de coût.

Les valeurs variables dans les boîtes avec des fonds blancs sont des valeurs que nous pouvons modifier. Les boîtes avec des fonds bleus contiennent des valeurs calculées ou des valeurs d'autres pages que SAM affiche pour notre information.

La page Coûts du système CES est divisée en quatre catégories principales. Les deux premiers, Coûts directs d'immobilisations et Coûts indirects d'immobilisations, sont additionnés dans la troisième catégorie, Coûts totaux d'installation. Étant donné que seule la valeur totale des coûts installés influe sur les calculs des flux de trésorerie, vous pouvez attribuer les coûts en capital aux différentes catégories de coûts de la façon qui convient à votre analyse. Par exemple, nous pourrions attribuer le coût de conception du collecteur à la catégorie de coût collecteur ou à la catégorie ingénieur-approvisionnement-construction avec des résultats équivalents. Les catégories sont fournies pour nous aider à suivre les différents coûts, mais n'affectent pas les calculs économiques. Après avoir attribué les coûts aux catégories, on doit vérifier que la valeur totale des coûts installés correspond à nos attentes. La quatrième catégorie de coûts couvre le fonctionnement et l'entretien

a.Le coût de capitale directe

Un coût en capital direct représente une dépense pour une pièce d'équipement ou un service d'installation spécifique qui s'applique à l'année zéro du flux de trésorerie.

On a utilisé 2 capteur solaire, Le coût du capteur dans le système est à 600 \$/m² et Le coût des réservoirs de stockage solaire est 2000 \$/m³

b.Le coût de capitale indirecte

Un coût indirect est généralement un coût qui ne peut pas être identifié avec un équipement ou un service d'installation spécifique.

c.Coût total de l'installation

Le coût total installé est la somme de tous les coûts d'investissement directs et indirects que vous spécifiez. SAM utilise cette valeur pour calculer le coût en capital net du projet, qui est le coût total installé moins les incitations en espèces sur la page Incitations et plus tous les coûts de financement supplémentaires de la page Paramètres financiers.

d.Coûts de fonctionnement et d'entretien

Les coûts d'exploitation et de maintenance (O&M) représentent les dépenses annuelles en équipement et en services qui surviennent après l'installation du système. SAM vous permet de saisir les coûts d'exploitation et de maintenance de trois manières : fixe annuel, fixe par capacité et variable par génération. Les coûts d'exploitation et de maintenance sont rapportés sur le flux de trésorerie du projet au cours des années 1 et suivantes.

Pour chaque catégorie de coût d'O&M, vous pouvez spécifier un taux d'indexation annuel facultatif pour représenter une augmentation annuelle prévue des coûts d'O&M au-dessus du

taux d'inflation annuel spécifié sur la page Paramètres financiers. Pour un taux d'indexation de zéro, le coût d'exploitation et d'entretien de la deuxième année et des années suivantes correspond au coût de la première année ajusté en fonction de l'inflation. Pour un taux d'indexation non nul, le coût d'exploitation et d'entretien de la deuxième année et des années suivantes correspond au coût de la première année ajusté en fonction de l'inflation plus l'indexation.

Direct Capital Costs

Number of Collectors	2	Collector cost	600.00	\$/m2		\$ 3,084.00
		Storage cost	2000.00	\$/m3		\$ 600.00
		Balance of system				\$ 1,000.00
		Installation cost				\$ 2,500.00
		Contingency	1 %			\$ 71.84
		Total direct cost				\$ 7,255.84

Indirect Capital Costs

	% of Direct Cost	Non-fixed Cost	Fixed Cost	Total
Engineer, Procure, Construct	3 %	\$ 217.68	\$ 0.00	\$ 217.68
Project, Land, Miscellaneous	1 %	\$ 72.56	\$ 0.00	\$ 72.56
Sales tax of	5 %	applies to 100 % of direct cost		\$ 362.79
				Total indirect cost
				\$ 653.03

Total Installed Costs

Total Installed Cost excludes financing costs (if any, see Financing Page)	Total installed cost	\$ 7,908.87
	Total installed cost per capacity (\$/Wt)	\$ 2.59

Operation and Maintenance Costs

	First year cost	Escalation rate (above inflation)	
Fixed annual cost	100	0 %	In Value mode, SAM applies both inflation and escalation to the first year cost to calculate out-year costs. In Schedule mode, neither inflation nor escalation applies. See Help for details.
Fixed cost by capacity	50	0 %	
Variable cost by generation	0	0 %	

Figure III. 5: page de Coût du système

e. Durée de vie

Les intrants de durée de vie nous permettent de modéliser une baisse annuelle de la production du système en raison, par exemple, du vieillissement de l'équipement au fil du temps.

SAM applique le taux de dégradation pour calculer la production annuelle au cours des années deux et suivantes : un taux de dégradation de 1 % signifierait que la production

annuelle du système diminue de 1 % par rapport à la production de l’année précédente, un taux de dégradation de 0 signifie que la production annuelle du système est constante pendant la durée de vie du projet.

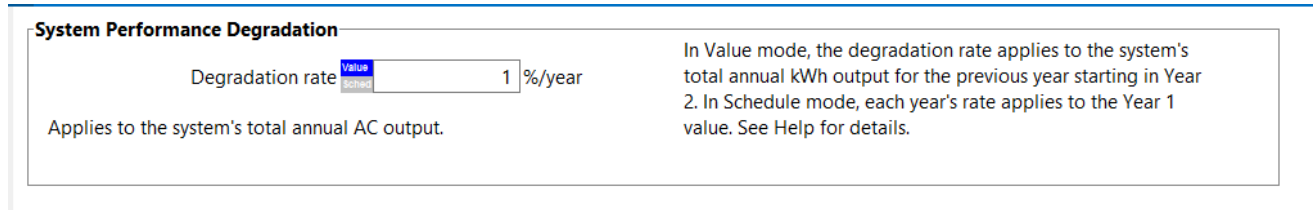


Figure III. 6: page de durée de vie

III.3.8. Paramètre financier

Cette rubrique décrit les entrées sur la page Paramètres financiers du modèle financier résidentiel.

a.Type de crédit

Crédit standard

Pour l’option de crédit standard, les paiements d’intérêts ne sont pas déductibles d’impôt.

Hypothèque

Pour l’option hypothécaire, les intérêts sur le prêt sont déductibles d’impôt.

Pour notre projet on a pris le crédit standard.

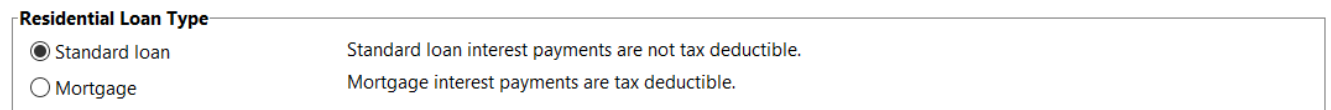


Figure III. 7: page de type de crédit

a. Paramètre de crédit

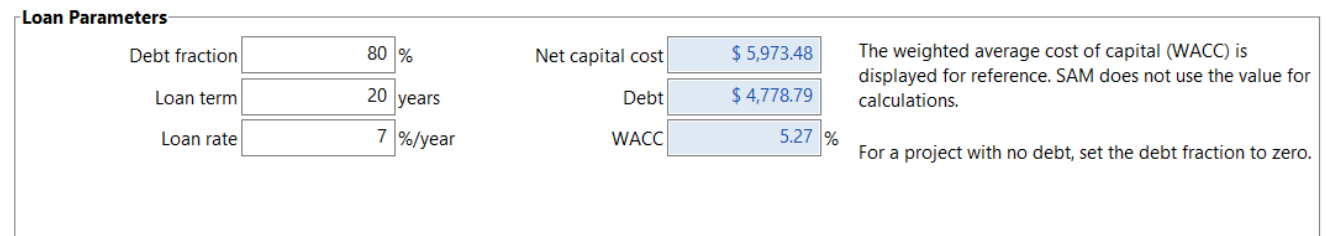


Figure III. 8: page de paramètre de crédit

b.Paramètres d’analyse

Analysis Parameters	
Analysis period	25 years
Inflation rate	2.5 %/year
Real discount rate	5.5 %/year
Nominal discount rate	8.14 %/year

Figure III. 9: page de paramètres d’analyse

c.Taxe et taux d’assurance

Tax and Insurance Rates		Property Tax	
Federal income tax rate	30 %/year	Assessed percentage	100 % of installed cost
State income tax rate	7 %/year	Assessed value	\$ 5,973.48
Sales tax	5 % of total direct cost	Annual decline	0 %/year
Insurance rate (annual)	1 % of installed cost	Property tax rate	1 %/year

Figure III. 10: page de taxe et taux d’assurance

D.Valeur de récupération

Salvage Value	
Net salvage value	5 % of installed cost
End of analysis period value	\$ 299

Figure III. 11: page de valeur de récupération

e.Incitations

Un crédit d’impôt est un montant qui est déduit de l’impôt sur le revenu du projet :

- ❖ Crédits d’impôt à l’investissement (CII)
- ❖ Crédits d’impôt à la production

Un incitatif financier est un montant versé au projet qui contribue au flux de trésorerie annuel du projet :

- ❖ Incitatif à l’investissement
- ❖ Incitatif fondé sur la capacité
- ❖ Incitatif basé sur la production

F.Tarifs d’électricité

La page Tarifs d’électricité détermine comment SAM calcule la facture d’électricité mensuelle et comment le projet est compensé pour l’électricité générée par le système

d'énergie renouvelable pour les modèles de propriété financière résidentiels, commerciaux et tiers.

Pour les modèles financiers résidentiels et commerciaux, SAM suppose que l'électricité que le client possède et exploite le système, et que l'électricité produite par le système compense les achats d'électricité auprès d'un fournisseur de services électriques pour répondre à la charge électrique d'un bâtiment ou d'une installation. Pour ces modèles, il rapporte les économies sur la facture d'électricité et la valeur actualisée nette du projet.

Pour le modèle de propriété d'un tiers, SAM suppose qu'un tiers possède et exploite le système d'énergie renouvelable, et que le client d'électricité bénéficie des achats d'électricité compensés par le système. SAM rapporte la valeur de ces économies, comptabilisant le coût de l'accord avec un tiers comme la valeur actualisée nette du projet.

g.Charge électrique

La page Charge électrique vous permet de spécifier la charge électrique pour les systèmes avec le modèle financier Résidentiel ou Commercial. Pour ces modèles, SAM suppose que l'électricité générée par le système réduit la consommation d'électricité d'un bâtiment ou d'une installation, et selon la structure des tarifs d'électricité sur la page Tarifs d'électricité, l'électricité excédentaire est soit vendue au fournisseur de services d'électricité, soit s'accumule en crédits de comptage net. .

III.4.Conclusion

Les étapes de simulation avec SAM commencent par la collecte et la saisie des données pertinentes, telles que les caractéristiques du site, les données météorologiques, les équipements et les coûts associés. Ensuite, le logiciel utilise ces informations pour modéliser le système énergétique dans son ensemble, en prenant en compte les facteurs clés tels que la production d'énergie, la consommation, les pertes et les performances attendues.

Une fois le modèle créé, SAM effectue des simulations détaillées en utilisant des algorithmes sophistiqués pour estimer les sorties du système, tels que la production d'énergie, les économies potentielles et d'autres paramètres pertinents. Ces simulations permettent d'évaluer l'impact de différentes configurations, options de conception et stratégies opérationnelles sur les performances globales du système.



Chapitre 4
Interprétation *des*
Résultats

IV.1. Introduction

Après avoir réalisé des simulations approfondies et collecté des données significatives, il est maintenant temps d'analyser et de comprendre les résultats obtenus. Cette étape permettra d'évaluer la performance du système solaire thermique dans le contexte résidentiel, ainsi que son impact économique.

Dans ce chapitre, nous examinerons attentivement les résultats fournis par le logiciel SAM, qui joue un rôle essentiel dans la modélisation et l'analyse des systèmes d'énergie solaire. Nous mettrons l'accent sur l'interprétation des résultats, en nous concentrant sur les principales mesures de performance et les indicateurs économiques clés. Notre objectif est de déterminer dans quelle mesure le chauffe-eau solaire résidentiel évalué présente une solution techniquement viable et économiquement rentable.

IV.2-resultats

Météo

Pour la région de notre étude, on remarque que la courbe de l'irradiation, atteint son maximum au mois d'août pour une valeur de 1000[Wh/m²] et un minimum en hiver (mois de décembre) avec une valeur de 450 Wh/m². On peut dire aussi que c'est un potentiel très important pour des telles installations.

Concernant la courbe de vitesse du vent, on remarque qu'elle atteint son maximum en hiver à 18 m/s, et son minimum en été à 9 m/s.

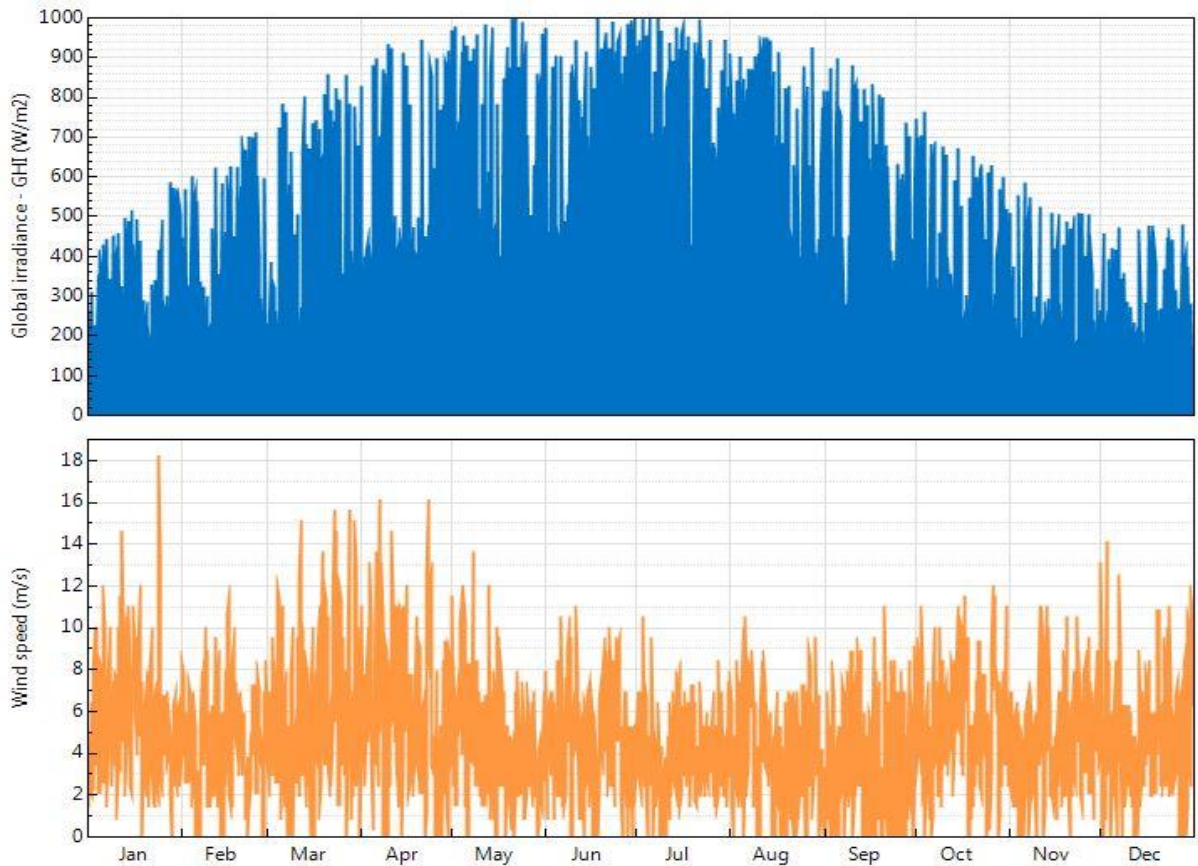


Figure IV : 1: courbes de rayonnement global et la vitesse de vent

IV.3-Résultats Techniques :

2.1- production d'énergie et tableau des mesures

Pour notre zone d'étude, nous notons que la courbe production énergétique mensuelle, atteignant son maximum en août avec une valeur de 250 KWH. Nous pouvons également dire que c'est un potentiel très important pour de telles installations. Et le minimum en hiver (décembre) avec une valeur de 120 KWH.

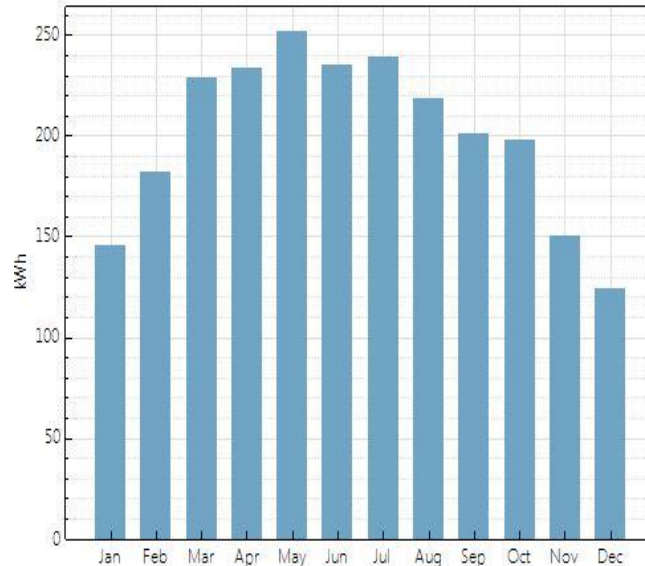


Figure IV: 2: production d'énergie mensuelle.

Nous remarquons dans le tableau de mesures que la consommation d'énergie par an avec l'utilisation de l'énergie solaire est inférieure à la consommation d'énergie sans système, car elle atteint 1046 kW / h avec le système et sans système 3546 kW / h

Metric	Value
Annual energy saved (year 1)	2,407 kWh
Solar fraction (year 1)	0.68
Aux with solar (year 1)	1,046.6 kWh
Aux without solar (year 1)	3,546.6 kWh
Capacity factor (year 1)	8.0%
Levelized COE (nominal)	35.20 ¢/kWh
Levelized COE (real)	26.92 ¢/kWh
Electricity bill without system (year 1)	\$1,122
Electricity bill with system (year 1)	\$833
Net savings with system (year 1)	\$289
Net present value	\$-5,322
Payback period	NaN
Discounted payback period	NaN
Net capital cost	\$8,060
Equity	\$1,612
Debt	\$6,448

Tableau IV. 1: tableau des mesures et leur valeur

2.2- Q auxiliaire et Q délivré

On remarque à travers le tableau que la quantité d'énergie auxiliaire atteint son maximum l'hiver à 197 kW/h et un minimum l'été à 6 kW/h alors que l'énergie auxiliaire est seule donc on constate qu'il n'y a pas de changement significatif lorsqu'elle atteint 348 kW/h en hiver et 247 kW/h en été.

	Q auxiliary (kWh)	Q auxiliary only (kWh)	Q delivered (kWh)
Jan	197.042	348.214	151.172
Feb	131.609	320.471	189.494
Mar	110.672	347.408	241.543
Apr	74.5189	317.137	263.258
May	40.4349	300.852	303.809
Jun	21.1227	265.263	301.849
Jul	6.332	254.702	331.955
Aug	20.6059	247.819	292.278
Sep	37.8268	247.27	251.116
Oct	70.0771	275.581	217.673
Nov	136.826	292.769	156.021
Dec	199.484	329.13	129.646

Tableau IV. 2: tableau de quantités de chaleur

2.3- température chaude

On remarque au travers des séries chronologiques pendant l'année que la température de l'eau chaude en hiver est plus basse qu'en été, puisqu'elle atteint 40 degrés en janvier, alors qu'elle atteint 90 degrés en août.

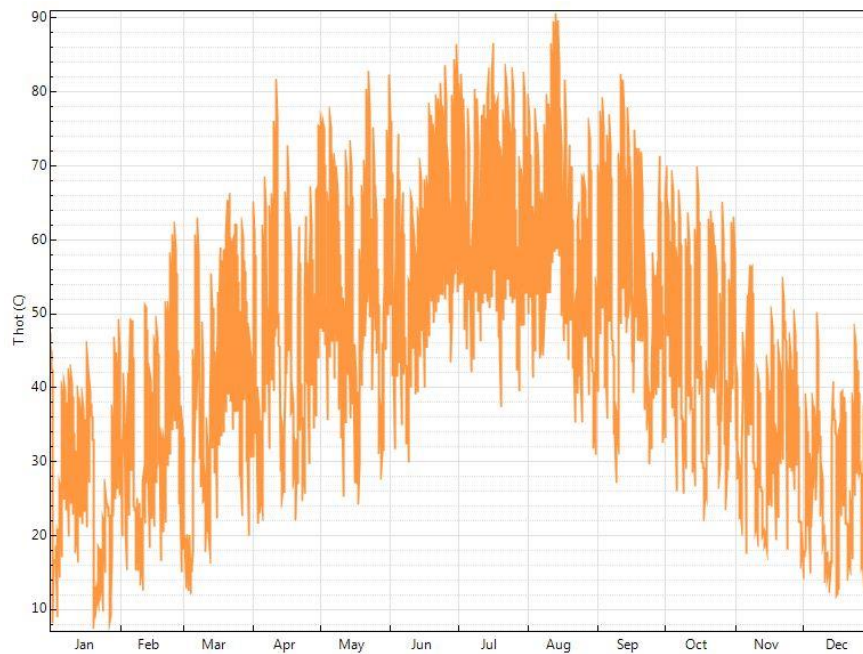


Figure IV: 3: courbe de température chaude

2-4- température délivrée et température secteur

On remarque à travers les séries chronologiques annuelles de la température des canalisations et des raccordements qu'elle est basse en hiver, lorsque la température des canalisations atteint 6C et des raccordements à 35C, alors qu'elle monte en été, lorsque la température des canalisations atteint 21C et les connexions à 90C.

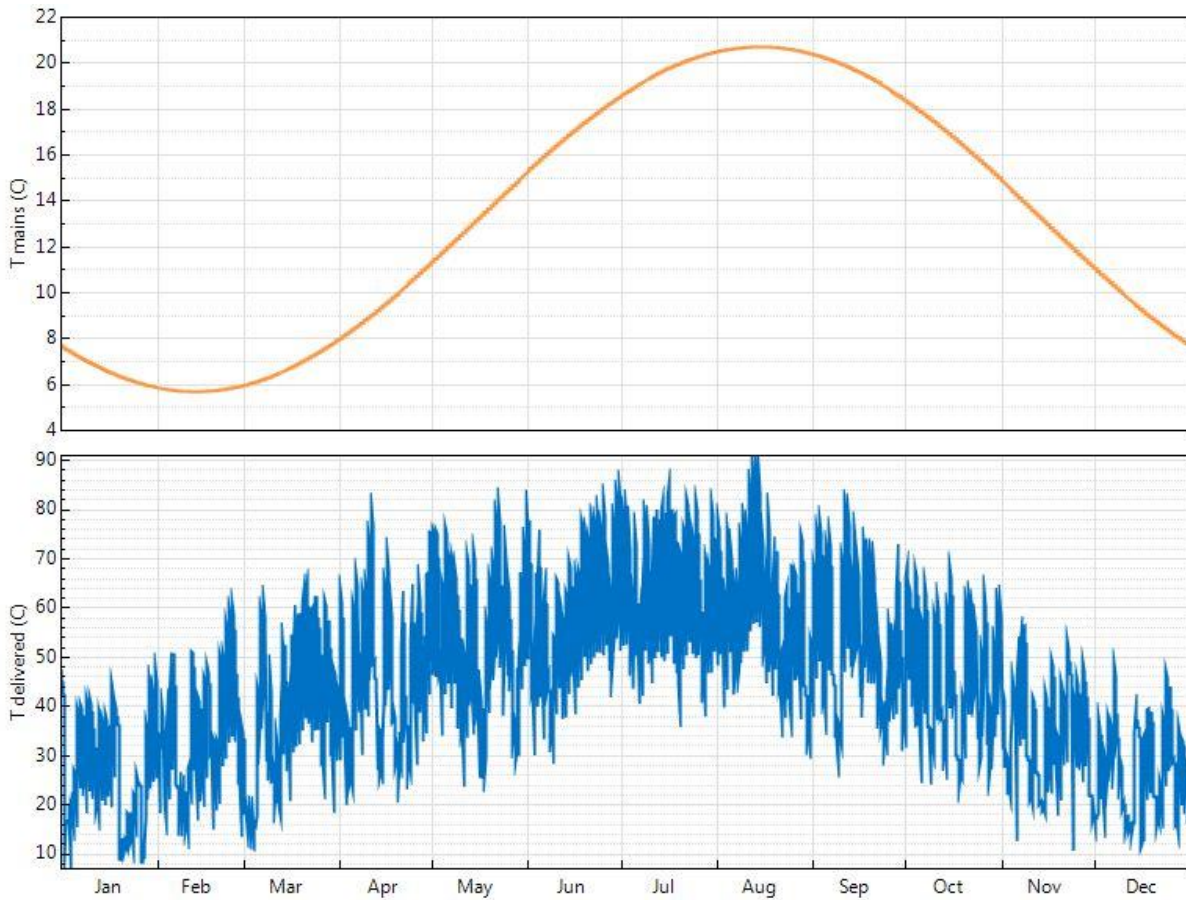


Figure IV: 4: courbes de température délivrée et température secteur

2-5- puissance de pompe et la chaleur utile :

On remarque à travers la courbe que la puissance de la pompe est constante durant tous les mois de l'année. Cette constance de la puissance de la pompe est un aspect important des chauffe-eau solaires résidentiels. Elle garantit un fonctionnement efficace et régulier du système, indépendamment des variations saisonnières.

Une puissance de pompe constante signifie que le système est capable de fournir un débit d'eau adéquat et de maintenir une circulation constante, contribuant ainsi à une distribution uniforme de la chaleur et à une performance optimale. Cela permet d'obtenir une utilisation efficace de l'énergie solaire captée par les panneaux solaires thermiques.

Par ailleurs, on remarque également à travers la courbe la quantité de chaleur utilisée par an. On peut observer que cette quantité est relativement faible en hiver, atteignant environ 0,5 kW, et continue d'augmenter progressivement jusqu'à atteindre environ 3,5 kW en été.

Cette observation est cohérente avec les variations saisonnières de la demande en eau chaude. En hiver, les besoins de chauffage de l'eau sont plus importants en raison des températures plus froides, tandis qu'en été, la demande est généralement moins élevée en raison des températures plus élevées et de la possibilité de préchauffage de l'eau.

Ces variations dans la quantité de chaleur utilisée démontrent la capacité du chauffe-eau solaire résidentiel à s'adapter aux besoins saisonniers, en fournissant une quantité adéquate de chaleur pour répondre à la demande en eau chaude tout au long de l'année. Cela contribue à l'efficacité du système en utilisant l'énergie solaire disponible de manière optimale, tout en réduisant la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables.

En résumé, la constance de la puissance de la pompe et les variations saisonnières de la quantité de chaleur utilisée mettent en évidence l'adaptabilité et l'efficacité des chauffe-eau solaires résidentiels pour répondre aux besoins en eau chaude tout au long de l'année, en utilisant efficacement l'énergie solaire disponible.

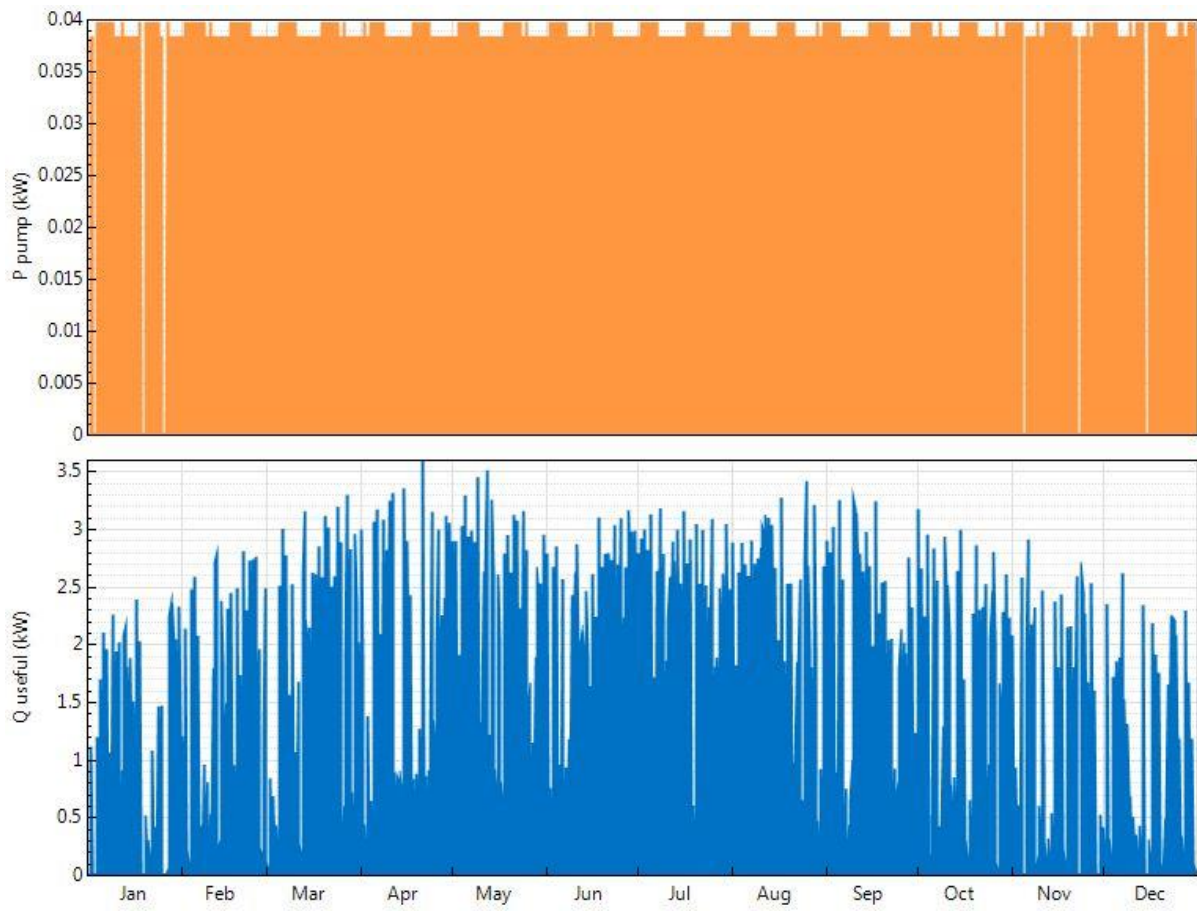


Figure IV : 5: courbes de puissance de pompe et la chaleur utile

2-6- volume de l'eau chaude et l'eau froide

Ces courbes représentent la variation du volume de l'eau chaude et froide en fonction du temps, et elles mettent en évidence une relation inverse entre les deux. En observant les courbes, on peut constater que lorsque le volume d'eau chaude diminue, le volume d'eau froide augmente, et vice versa.

Cette relation entre l'eau chaude et l'eau froide est tout à fait logique et cohérente avec le fonctionnement du chauffe-eau solaire résidentiel. Lorsque de l'eau chaude est utilisée, elle est remplacée par de l'eau froide qui entre dans le système pour être chauffée. Cela permet de maintenir un approvisionnement constant en eau chaude dans le réservoir.

Lorsque le volume d'eau chaude diminue, cela signifie que l'eau chaude est utilisée plus rapidement qu'elle n'est chauffée par le système solaire. En conséquence, le volume d'eau froide augmente pour compenser cette diminution et maintenir un débit constant d'eau chaude disponible.

De même, lorsque le volume d'eau chaude augmente, cela indique que l'eau chaude est produite plus rapidement qu'elle n'est utilisée, entraînant une diminution du volume d'eau froide.

Cette relation positive entre l'eau chaude et l'eau froide souligne la capacité du système à ajuster automatiquement la production d'eau chaude en fonction de la demande, assurant ainsi un approvisionnement constant en eau chaude tout en optimisant l'utilisation de l'énergie solaire disponible.

En conclusion, l'observation de ces courbes met en évidence la dynamique entre l'eau chaude et l'eau froide dans un système de chauffe-eau solaire résidentiel, où une variation du volume d'eau chaude entraîne une variation inverse du volume d'eau froide pour maintenir un approvisionnement constant en eau chaude. Cela démontre l'efficacité et la capacité d'adaptation du système pour répondre aux besoins en eau chaude des utilisateurs de manière équilibrée.

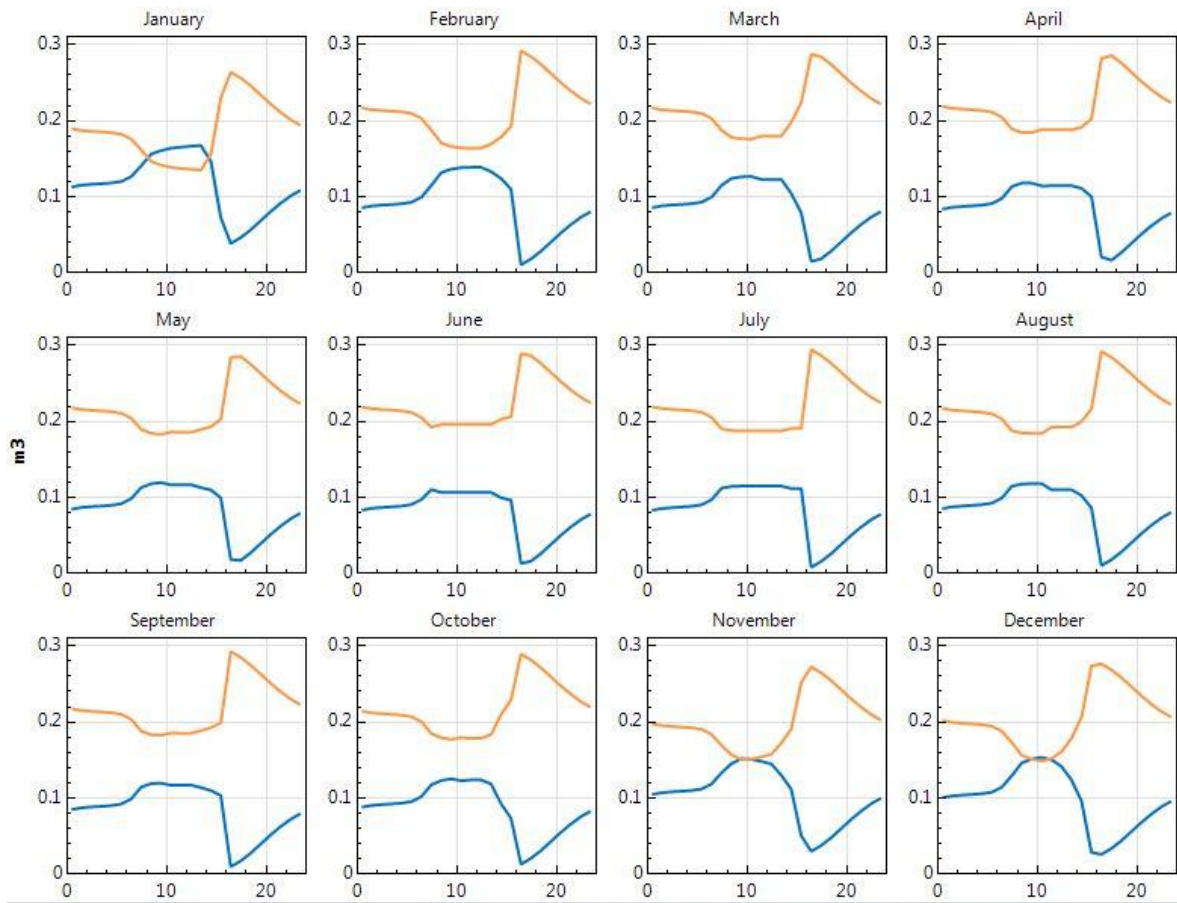


Figure IV: 6: courbes de volume de l'eau chaude et l'eau froide

2-7-prelevement de l'eau chaude

On remarque à travers les courbes que le débit d'eau chaude est constant tout au long des mois de l'année. Cette constance du débit est une caractéristique avantageuse des chauffe-eau solaires résidentiels. Elle garantit un approvisionnement régulier en eau chaude, indépendamment des variations saisonnières de l'ensoleillement.

Cela signifie que les utilisateurs peuvent compter sur une source d'eau chaude stable et fiable, ce qui est essentiel pour répondre aux besoins quotidiens en eau chaude des foyers. Que ce soit pour les douches, le lavage des mains, la vaisselle ou toute autre utilisation, le débit constant permet une expérience confortable et pratique pour les utilisateurs.

De plus, cette constance du débit tout au long de l'année témoigne de l'efficacité et de la capacité des chauffe-eau solaires à utiliser l'énergie solaire disponible de manière optimale. Même pendant les mois où l'ensoleillement est moins intense, le système est conçu pour compenser en utilisant des réserves d'eau chaude préchauffée ou en fonctionnant conjointement avec un système de chauffage d'appoint.

Cela permet de maintenir une performance élevée du système et de garantir un approvisionnement continu en eau chaude, tout en maximisant l'utilisation de l'énergie solaire gratuite et renouvelable. Cette constance du débit tout au long de l'année contribue ainsi à l'efficacité énergétique du chauffe-eau solaire et à la réduction des coûts de chauffage de l'eau

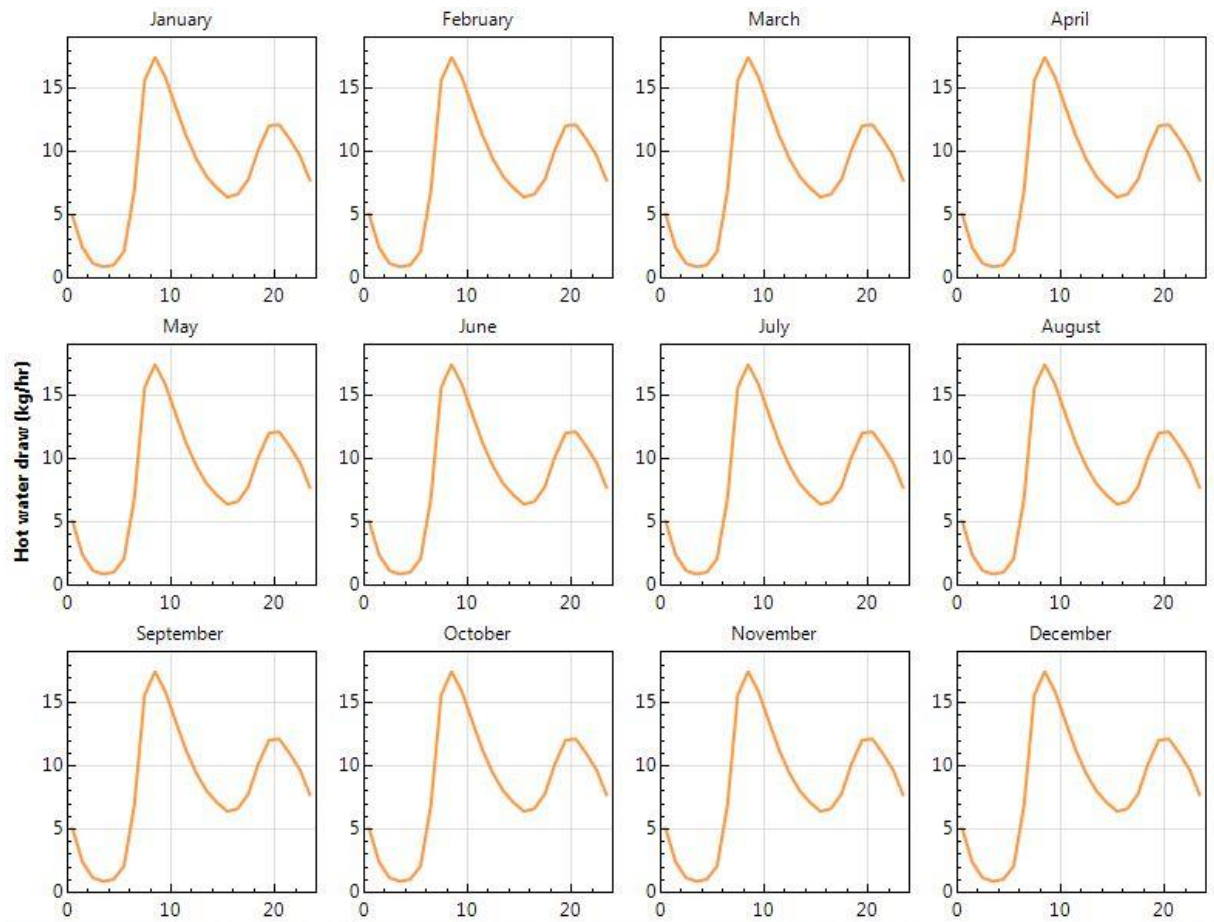


Figure IV : 7: courbes de prélèvement de l'eau chaude

IV.4-Résultats économiques:

3.1-tableau de mesures

La figure représente différentes mesures et leurs valeurs, telles que le coût initial (6 448 \$), le coût net de capital (8 060 \$) et la facture d'électricité avec et sans le système. En examinant la figure, on peut remarquer que la facture d'électricité avec le système est plus élevée que sans le système.

Cette observation souligne l'impact positif du chauffe-eau solaire résidentiel sur les coûts énergétiques à long terme. Bien que le coût initial d'installation du système soit présenté dans la figure, il est important de noter que ce coût est rapidement compensé par les économies réalisées sur la facture d'électricité.

La comparaison des factures d'électricité avec et sans le système met en évidence les avantages économiques de l'utilisation du chauffe-eau solaire résidentiel. Avec le système en place, la consommation d'électricité pour le chauffage de l'eau est réduite, ce qui se traduit par des économies significatives sur les factures d'électricité.

Cela démontre la rentabilité à long terme du système, où les économies réalisées sur les coûts énergétiques compensent rapidement le coût initial d'installation. Les utilisateurs peuvent donc bénéficier de réductions substantielles sur leurs dépenses énergétiques tout en profitant d'une source d'eau chaude durable et fiable.

En conclusion, la figure met en évidence les mesures liées aux coûts et aux économies associées à l'utilisation d'un chauffe-eau solaire résidentiel. Les chiffres présentés, tels que le coût initial, le coût net de capital et les factures d'électricité, illustrent l'avantage économique de l'adoption de cette technologie, où les économies sur les coûts énergétiques compensent largement les dépenses initiales.

Metric	Value
Annual energy saved (year 1)	2,407 kWh
Solar fraction (year 1)	0.68
Aux with solar (year 1)	1,046.6 kWh
Aux without solar (year 1)	3,546.6 kWh
Capacity factor (year 1)	8.0%
Levelized COE (nominal)	35.20 ¢/kWh
Levelized COE (real)	26.92 ¢/kWh
Electricity bill without system (year 1)	\$1,122
Electricity bill with system (year 1)	\$833
Net savings with system (year 1)	\$289
Net present value	\$-5,322
Payback period	NaN
Discounted payback period	NaN
Net capital cost	\$8,060
Equity	\$1,612
Debt	\$6,448

Tableau IV. 3: tableau des mesures et leur valeur

3.2- Le coût d'énergie de charge avec et sans le système

Les figures (IV.11) et (IV.12) représentent le coût de l'énergie de charge avec et sans le système. En comparant le coût de l'énergie avec le système et le coût de l'énergie sans système, on remarque que ce dernier est le plus élevé pendant tous les mois de l'année.

Cette observation met en évidence l'effet bénéfique du chauffe-eau solaire résidentiel sur la réduction des coûts énergétiques. En ayant le système en place, le coût de l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau est significativement réduit par rapport à l'utilisation d'autres sources d'énergie conventionnelles.

Lorsque nous comparons les coûts d'énergie avec et sans le système tout au long de l'année, nous constatons que le système de chauffe-eau solaire résidentiel permet de réaliser des économies substantielles. Les utilisateurs peuvent ainsi bénéficier d'une réduction significative de leurs dépenses énergétiques mensuelles.

Ces figures illustrent donc l'impact positif du chauffe-eau solaire résidentiel sur la réduction des coûts énergétiques tout au long de l'année. En optant pour cette technologie, les utilisateurs peuvent réduire leur dépendance aux sources d'énergie traditionnelles plus coûteuses, ce qui se traduit par des économies financières significatives.

En conclusion, les figures (IV.11) et (IV.12) démontrent de manière visuelle l'avantage économique du chauffe-eau solaire résidentiel en comparant les coûts de l'énergie avec et sans le système. Ces figures confirment que l'utilisation du système permet de réduire

considérablement les dépenses énergétiques, ce qui en fait une solution économiquement avantageuse pour les utilisateurs.

	Energy charge without system (\$/mo)	Energy charge with system (\$/mo)
Jan	117.129	99.6996
Feb	102.241	80.3765
Mar	97.2798	69.8401
Apr	85.08	57.0079
May	78.29	48.091
Jun	76.6943	48.4946
Jul	94.469	65.78
Aug	89.0799	62.8655
Sep	83.674	59.5552
Oct	89.2924	65.5684
Nov	95.7392	77.6962
Dec	113.293	98.3968

Tableau IV. 4: tableau de frais d'énergie avec et sans le système

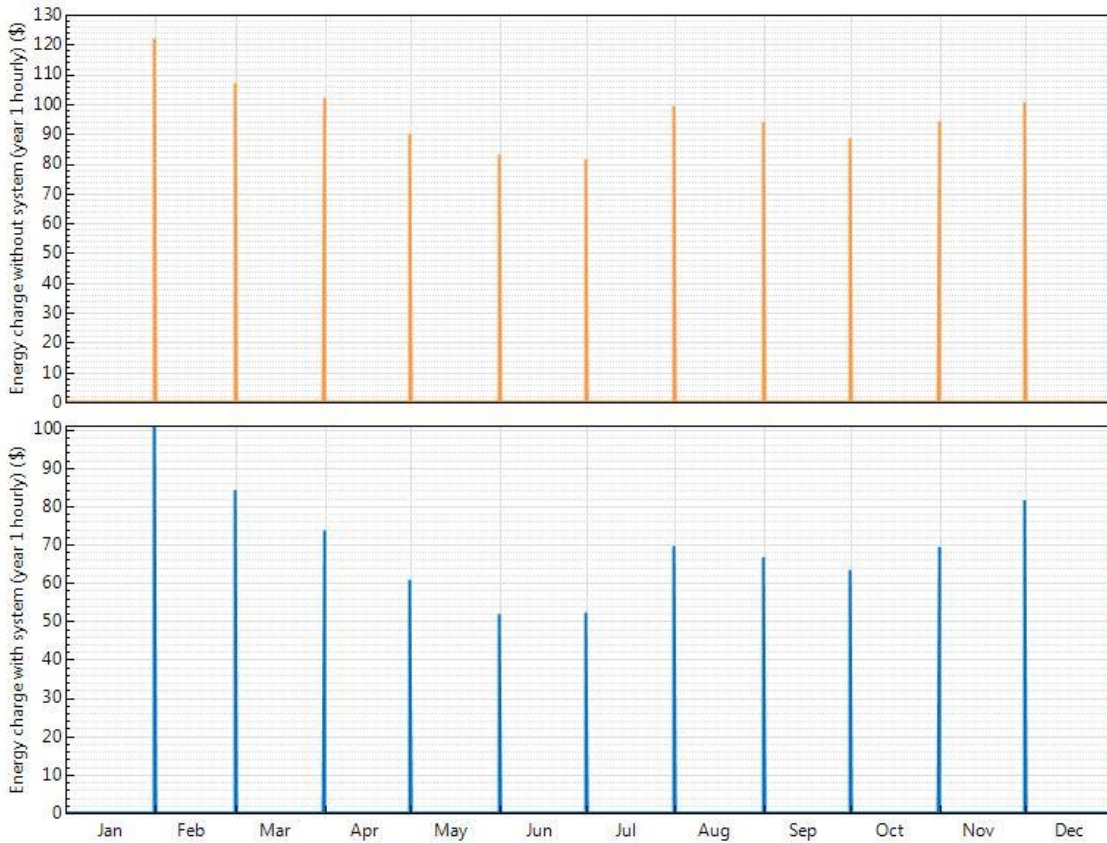


Figure IV: 8: courbes de frais d'énergie avec le système et sans le système

IV.5-Conclusion

Les résultats de ce chapitre mettent en évidence plusieurs aspects importants liés à l'évaluation du potentiel et des performances d'un système de chauffe-eau solaire résidentiel dans la région étudiée.

En ce qui concerne la météo, il est observé que l'irradiation solaire atteint son maximum au mois d'août avec une valeur de 1000 Wh/m², tandis que son minimum est enregistré en hiver (mois de décembre) avec une valeur de 450 Wh/m². Cette observation démontre un potentiel très important pour l'installation de systèmes solaires dans la région.

De plus, la vitesse du vent présente une courbe avec un maximum en hiver à 18 m/s et un minimum en été à 9 m/s. Ces informations sont pertinentes pour la conception et l'optimisation des systèmes de chauffe-eau solaire, car la vitesse du vent peut influencer les performances des dispositifs de captation de l'énergie solaire.

Sur le plan technique, la courbe de production énergétique mensuelle montre un pic en août avec une valeur de 250 kWh, tandis que le minimum est enregistré en hiver (décembre) avec une valeur de 120 kWh. Ces résultats confirment à nouveau un potentiel significatif pour les installations de chauffe-eau solaire dans la région.

En examinant le tableau des mesures, il est remarqué que la consommation d'énergie annuelle avec l'utilisation du système solaire est inférieure à celle sans système, avec des valeurs respectives de 1046 kWh et 3546 kWh. Cela indique clairement les avantages économiques et énergétiques de l'installation de chauffe-eau solaire résidentiel.

Les résultats concernant la quantité d'énergie auxiliaire montrent un maximum en hiver à 197 kWh et un minimum en été à 6 kWh. Cependant, il est également constaté que l'énergie auxiliaire reste relativement stable, atteignant 348 kWh en hiver et 247 kWh en été lorsque l'énergie auxiliaire est seule. Ces informations sont essentielles pour la gestion efficace de l'énergie dans le système.

Les courbes de température de l'eau chaude indiquent une température plus basse en hiver par rapport à l'été, avec des valeurs de 40 degrés en janvier et 90 degrés en août. De même, les séries chronologiques annuelles montrent une baisse de la température des canalisations et des raccordements en hiver, avec des valeurs respectives de 6°C et 35°C, tandis qu'en été, elles augmentent à 21°C et 90°C. Ces résultats sont importants pour évaluer le confort thermique et l'efficacité du système.

Les courbes de puissance de la pompe et de la chaleur utile illustrent les performances du système de chauffe-eau solaire. Elles fournissent des informations sur la puissance nécessaire pour le fonctionnement de la pompe et la quantité de chaleur réellement utilisée. Ces données sont essentielles pour optimiser l'efficacité du système.

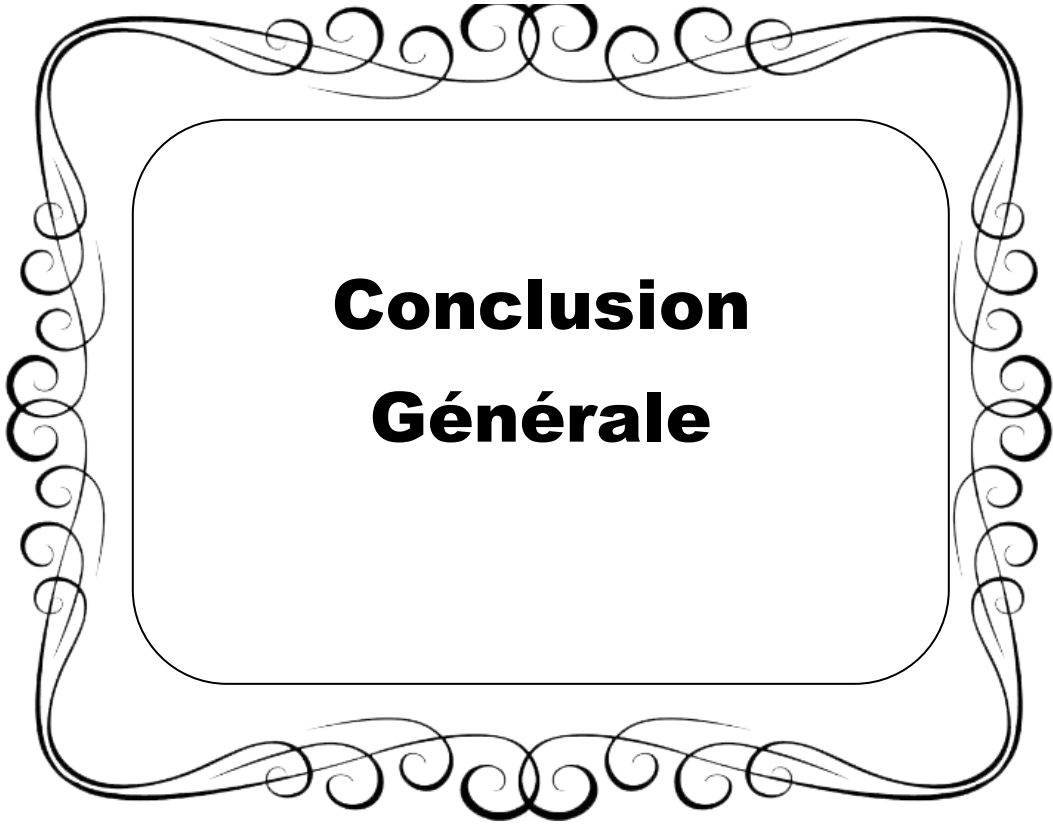
L'observation des courbes de variation du volume d'eau chaude et d'eau froide révèle une relation inverse entre les deux. Cette dynamique entre l'eau chaude et l'eau froide démontre l'efficacité et la capacité d'adaptation du système pour répondre aux besoins en eau chaude des utilisateurs de manière équilibrée.

La constance du débit d'eau chaude tout au long de l'année, indépendamment des variations saisonnières d'ensoleillement, garantit un approvisionnement régulier en eau chaude, offrant ainsi une expérience confortable et pratique pour les utilisateurs.

L'analyse des mesures économiques met en évidence les avantages financiers de l'utilisation d'un chauffe-eau solaire résidentiel. Malgré le coût initial d'installation, les économies réalisées sur les factures d'électricité compensent rapidement ce coût, offrant ainsi des réductions substantielles sur les dépenses énergétiques à long terme. Les coûts de l'énergie de charge avec le système sont significativement inférieurs à ceux sans le système, ce qui

témoigne de l'impact positif du chauffe-eau solaire résidentiel sur la réduction des coûts énergétiques mensuels.

En conclusion, l'utilisation d'un chauffe-eau solaire résidentiel offre une source d'eau chaude durable, fiable et économiquement avantageuse. Ce système permet de maintenir un approvisionnement constant en eau chaude, d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire disponible et de réaliser des économies significatives sur les dépenses énergétiques. Il s'agit d'une solution efficace, rentable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins en eau chaude des foyers.



**Conclusion
Générale**

Conclusion Générale :

Conclusion Générale :

Le travail que nous avons élaboré nous a permis de découvrir non seulement l'aspect technique, mais aussi l'aspect économique et environnemental d'une telle installation solaire.

D'après les statistiques montrées dans notre travail, nous constatons que le rendement est satisfaisant et la production d'eau chaude est suffisante pour l'utilisateur durant une grande partie de l'année. Ces performances peuvent être améliorées par l'utilisation des surfaces sélectives de captation et d'absorption.

Un chauffe-eau solaire couvre plus de la moitié des besoins en eau chaude du ménage. L'appoint ne fournira que l'énergie pour combler la différence non fournie par le solaire.

Du point de vue technique, l'utilisation du logiciel SAM consiste à évaluer les performances d'une installation d'un chauffe-eau solaire résidentiel, en exploitant son code de calcul, il nous a été possible de simuler le comportement du modèle choisi au cours de l'année. Sur le plan météorologique, l'irradiation solaire atteint son maximum en août avec 1000 Wh/m² et son minimum en décembre avec 450 Wh/m². De plus, la vitesse du vent présente une courbe avec un maximum en hiver à 18 m/s et un minimum en été à 9 m/s, la courbe de production énergétique mensuelle montre un pic en août avec une valeur de 250 kWh, tandis que le minimum est enregistré en hiver (décembre) avec une valeur de 120 kWh, Les résultats concernant la quantité d'énergie auxiliaire montrent un maximum en hiver à 197 kWh et un minimum en été à 6 kWh

Du point de vue économique, vu la cherté du capteur solaire, le retour des capitaux propres d'une installation solaire n'est pas actuellement intéressant, le prix de l'investissement est très important, étant donné que le prix du kWh d'électricité reste toujours subventionné. Les coûts de l'énergie de charge avec le système sont significativement inférieurs à ceux sans le système.

Cette étude n'est qu'une initiation au chauffage solaire résidentiel, elle permet d'offrir la possibilité de généraliser l'utilisation de ce dernier et d'interpeller les pouvoirs publics à sensibiliser à exploiter l'énergie solaire thermique et à contribuer à la diminution de l'exploitation des énergies fossiles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Fatiha yettou et F.chekired et Nedjma ouchiche,2007.Étude technico-économique pour la conception et la réalisation d'un chauffe-eau solaire.

[2] <https://www.lavoisier.fr>

[3] <http://www.industrie.gouv.fr>

[4] <https://www.cnrs.fr>

[5] Ghilas BECHA. Salah BEN CHABANE, Mémoire fin d'étude,2014. Étude technico-économique d'une installation de chauffe-eau solaire à usage industriel.

[6] Drif Idir, Mémoire fin d'étude,2013. Bilan thermique d'un chauffe-eau solaire.

[7] <https://entreprises-collectivites.engie.fr>

[8] <https://www.les-energies-renouvelables.eu>

[9] <https://www.google.com>

[10] <https://expertises.ademe.fr>

[11] <https://www.insee.fr>

[12] <https://mypower.engie.fr>

[13] <https://www.sirenergies.com>

[14] <https://www.ecologie.gouv.fr>

[15] <https://conseils-thermiques.org>

[16] <https://www.mordorintelligence.com/fr>

[17] <https://www.panneausolaire-info.be>

[18] HAKEM Sid-Ali, 2010. Etude stochastique des performances journalière d'un chauffe eau solaire. Thèse magister USTHB.

[19]] <https://acsolue-energie.fr>

[20] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, 2010. Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude. Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 465 – 476 465.

- [21] Anne Labouret, Michel Villos « Energie solaire photovoltaïque » édition LE MONITEUR.
- [22] <https://energieplus-lesite.be>
- [23] B. Zaouari« étude technico-économique d'une installation solaire collective pour le chauffage de l'eau sanitaire à l'école national d'ingénieurs de Monastir». Tunisie ;(1996).
- [24] Fatiha Bouhired, 'Développement des Chauffe Eau Solaires en Algérie', N°17 2010.
- [25]] Bouakaz .A «Etude du potentiel d'énergie solaire thermique utilisé pour la production de l'eau chaude dans l'industrie agroalimentaire». These magister , université Hadj Lakhdar Batna (2012)
- [26] <https://www.infochauffeeausolaire.be>
- [27] <https://www.nouvenergie.fr>
- [28] Ministère de l'Industrie, de l'Energie et des PME Centre Technique des Matériaux de Construction, de la Céramique et du Verre (CTMCCV) Les Normes Tunisiennes & Les Procédures des Tests des CES. ZAIANE Rafik
- [29] <https://www.les-energies-renouvelables.eu>
- [30] <https://www.mordorintelligence.com>
- [31] <https://www.finance-investissement.com>
- [32] <https://www.techniques-ingenieur.fr>

