الجمهـوريـــة الجزائـريـــة الديمقـراطيـــة الشـعبيـــة

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التـــعلـيـــم العـــالـــي والبـحـــث العـلمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran II Mohamed Ben Ahmed جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Institut de Maintenance et de sécurité industrielle معهد الصيانة والأمن الصناعي

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle et Électromécanique

Thème :

Étude et Simulation d'un Système de Chauffage d'Eau Solaire pour une Base de vie Industrielle

Présenté par :
ZERAOULA Aboubakr
SOUALMI Mohamed Zineddine

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
MOUFOK Souad		IMSI (Université d'Oran 2)	Président
REGUIEG YSSAAD Sadek	MAA	IMSI (Université d'Oran 2)	**Encadreur**
HERROUZ Keltoum		IMSI (Université d'Oran 2)	Examinateur

Année universitaire : 2025/2026

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

À mon cher père pour qui je dois mon éducation et mon instruction, sa présence en toute circonstance m'a maintes fois rappelé le sens de la responsabilité.

À ma chère mère pour sa sollicitude à mon égard, et qui m'a entouré avec sa tendresse, toujours prête à se sacrifier pour ses enfants.

À tous mes proches.

À mon binôme dans ce projet de fin d'études

À tous mes Ami(e)s

À tous mes collèges de notre promotion, spécialité Maintenance Industrielle et Electromécanique, Année 2025/2026.

À tous ceux qui me connaissent et qui comptent pour moi…

ZERAOULA Aboubakr

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien tout au long de mes études.

À ma famille et à mes proches, pour leurs encouragements et leur confiance.

À mon binôme de mémoire, pour sa collaboration et son sérieux.

À tous les ami(e)s et camarades de notre promotion, spécialité Maintenance Industrielle et Electromécanique, Année 2025/2026.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Avec toute ma reconnaissance et mon respect.

SOUALMI Mohamed Zineddine

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à notre encadreur Mr REGUIEG YSSAAD Sadek, pour nous avoir suivi durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.

Nos remerciements s'adressent également aux :
Membres de jury qui ont accepté de juger ce travail,
Les enseignants de l'institut de maintenance et de sécurité industrielle, université d'Oran 2,
Les collègues de notre promotion spécialité MIE pour leur soutien, que Dieu les aide dans leur vie professionnelle,
Nos familles respectueuses pour leur soutien matériel et moral et l'atmosphère qui nous ont présenté.

Merci infiniment …

ZERAOULA Aboubakr

SOUALMI Mohamed Zineddine

Résumé. Cette étude porte sur le dimensionnement et la simulation d'un système de chauffe-eau solaire destiné à satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire d'une base de vie pour la située dans la région de Tindouf (gisement de Gara Djebilet), en exploitant l'énergie solaire thermique. Les principaux composants du système ont été sélectionnés et dimensionnés selon les besoins énergétiques requis. L'évaluation des performances a été réalisée à l'aide du logiciel T*SOL. Les résultats de simulation montrent un taux de couverture solaire élevé et un rendement satisfaisant, tout en réduisant le recours à l'énergie électrique d'appoint, ce qui confirme l'efficacité du système proposé et son adaptation aux conditions climatiques de la région.

Mots-clés : Énergie solaire thermique, chauffe-eau solaire, dimensionnement, simulation, T*SOL, efficacité énergétique, base de vie.

ملخص. تهدف هذه الدراسة إلى تصميم ومحاكاة نظام سخان مائي شمسي لتلبية احتياجات الماء الساخن الصحي لقاعدة حياة بمنطقة تندوف (منجم غار جبيلات)، اعتمادًا على الاستغلال الأمثل للطاقة الشمسية الحرارية. تم اختيار المكونات الرئيسية للنظام وحساب أبعادها وفق المتطلبات الطاقوية، ثم تقييم أدائه باستخدام برنامج T*SOL. أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام يحقق نسبة تغطية شمسية مرتفعة ومردودًا جيدًا مع تقليل الاعتماد على الطاقة الكهربائية المساعدة، مما يؤكد فعاليته وملاءمته للظروف المناخية للمنطقة.

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية الحرارية، السخان المائي الشمسي، التصميم، المحاكاة، T*SOL، الكفاءة الطاقوية، قاعدة حياة.

Abstract. This study focuses on the sizing and simulation of a solar water heating system designed to meet the domestic hot water needs of a living base located in the Tindouf region (Gara Djebilet deposit), by utilizing solar thermal energy. The main system components were selected and sized according to the required energy demand. The system performance was evaluated using T*SOL simulation software. The simulation results indicate a high solar coverage rate and satisfactory overall efficiency while significantly reducing the need for auxiliary electrical energy. These findings confirm the effectiveness of the proposed system and its suitability for the climatic conditions of the region.

Keywords: Solar thermal energy, solar water heater, sizing, simulation, T*SOL, energy efficiency, living base.

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur l`énergie solaire

1. Introduction 2
2. Le soleil comme source d'énergie 2
   2.1. Présentation du soleil 2
   2.2. Caractéristiques du soleil 2
   2.3. Structure interne du soleil 2
3. Rayonnement solaire 3
   3.1. Rayonnement au niveau de la Terre 3
   3.2. Types du Rayonnement solaire 4
   3.2.1. Rayonnement direct 4
   3.2.2. Rayonnement diffus 4
   3.2.3. Rayonnement réfléchi 4
   3.2.4. Rayonnement global 5
   3.3. Interaction avec l'atmosphère 5
4. L'énergie solaire 6
   4.1. Conversion de l`énergie solaire 6
   4.1.1. Conversion thermique 6
   4.1.2. Conversion photovoltaïque 7
   4.1.3. Conversion thermodynamique 7
5. L'énergie solaire thermique 7
   5.1. Types de systèmes solaires thermiques 7
   5.1.1. Systèmes passifs 7
   5.1.2. Systèmes actifs 8
   5.2. Capteurs solaires thermiques 9
   5.2.1. Capteurs solaires sans vitrage 9
   5.2.2. Capteurs solaires plans 9
   5.2.3. Capteurs solaires à tubes sous vide 10
6. Potentiel solaire 10
   6.1. Potentiel solaire en Algérie 11
7. Applications de l'énergie solaire 13
8. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire 13
9. Conclusion 14

Chapitre II : Les chauffe-eaux solaires

1. Introduction 15
2. Chauffe-eau solaire 15
2.1. Définition 15
2.2. Principe de fonctionnement 15
3. Types de chauffe-eaux solaires 16
3.1. Chauffe-eau solaire à thermosiphon 17
3.1.1. Principe de fonctionnement 17
3.1.2. Thermosiphon monobloc 17
3.1.3. Thermosiphon à éléments séparés 18
3.2. Chauffe-eau solaire à circulation forcée 19
3.3. Chauffe-eau solaire à auto-vidange 19
4. Comparaison de types de chauffe-eaux solaires 20
5. Les principaux composants d'un chauffe-eau solaire 21
5.1. Le capteur solaire plan 21
5.1.1 Les composants du capteur solaire plan 21
5.1.2 Fonctionnement d'un capteur solaire plan 23
5.2. L'unité de stockage (Ballon d'eau chaude) 23
5.3. L'échangeur thermique 25
5.4. Le système d'appoint 25
5.5. Le groupe de transfert 26
5.5.1 La pompe (Circulateur) 26
5.5.2 Régulation et contrôle 26
5.5.3 Le circuit hydraulique (Tuyauterie) 27
5.5.4 Dispositifs de sécurité 28
5.5.5. Instruments de mesure 30
5.5.6 Les organes de distribution 31
6. Avantages et inconvénients des chauffe-eaux solaires 32
7. Conclusion 33

Chapitre III : Dimensionnement d'un chauffe-eau solaire pour une base de vie

1. Introduction 34
2. Gisement de Gara Djebilet 34
3. Présentation de la base de vie 34
4. Hypothèses de calcul 35
5. Dimensionnement du ballon de stockage 35
5.1. Estimation de la consommation d'eau chaude sanitaire 35
5.2. Expression du volume du ballon 36

6. Dimensionnement des capteurs solaires 36
6.1. Analyse des capteurs solaires thermiques utilisés pour le chauffage de l'eau 36
6.2. Calcul de l'énergie calorifique journalière 37
6.3. Calcul de la surface totale du panneau de captage 37
6.4. Calcul du nombre de capteurs nécessaires 37
7. Dimensionnement de la tuyauterie 38
8. Dimensionnement de l'échangeur thermique 39
9. Dimensionnement de l'appoint électrique 40
10. Récapitulatif des résultats de dimensionnement 41
11. Conclusion 41

Chapitre IV : Analyse et simulation du chauffe-eau solaire proposé

1. Introduction 42
2. Présentation du logiciel T*SOL 42
2.1. Description 42
2.2. Interface du logiciel T*SOL 43
2.3. Avantages du logiciel 43
3. Sélection de notre modèle d'installation ECS solaire 44
3.1 Météo 44
4. Paramétrage des composants de notre installation 45
4.1. Consommation ECS 45
4.2. Ballon d'eau chaude 46
4.3. Capteur solaire 47
4.4. Tuyauterie : 48
4.6. Circuit solaire 50
4.7. L'appoint électrique 51
5. Résultats et Analyse 52
5.1. Résultats « installation ECS avec résistance électrique » 52
5.2. Résultats « Météo » 54
5.3. Résultats « Consommation ECS » 56
5.4. Résultats « Circuit capteurs » 58
5.6. Synthèse des résultats 62
6. Conclusion 62
Conclusion générale 63
Bibliographies 64

Liste des figures

Figure 1 : Rayonnement solaire transmis à la terre. 4
Figure 2 : Les différents types de rayonnement. 5
Figure 3 : Rayonnement solaire à travers l'atmosphère. 6
Figure 4 : Chauffage solaire passif. 8
Figure 5 : Capteur moquette pour le chauffage de piscines. 9
Figure 6 : Schéma d'un capteur solaire vitré. 10
Figure 7 : Capteur sous vide. 10
Figure 8 : Approche Top-Down pour l'estimation du potentiel solaire. 11
Figure 9 : Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée en Algérie 12
Figure 10 : Schéma général de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire. 16
Figure 11 : Le chauff e-eau solaire thermosiphon. 17
Figure 12 : Chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc. 18
Figure 13 : Chauffe-eau solaire à thermosiphon éléments séparés. 18
Figure 14 : Chauffe-eau solaire à circulation forcée. 19
Figure 15 : Le chauffe-eau solaire à auto-vidange 20
Figure 16 : Composants d'un capteur solaire plan. 21
Figure 17 : Diverses formes d'absorbeurs (d'après DGS Solar Anlagen 2001) 22
Figure 18 : Principe de fonctionnement du capteur solaire plan 23
Figure 19 : Ballon avec échangeur 24
Figure 20 : Ballon sans échangeur 25
Figure 21 : Emplacement de l'appoint électrique dans le ballon 25
Figure 22 : Une pompe (Circulateur) 26
Figure 23 : Schéma simplifié d'une régulation différentielle. 27
Figure 24 : Conduites de liaison isolées 28
Figure 25 : Une soupape de sécurité 28
Figure 26 : Un vase d'expansion. 29
Figure 27 : Un purgeur d'air 29
Figure 28 : Un clapet anti-retour 30
Figure 29 : Manomètre 30
Figure 30 : Thermomètre 31
Figure 31 : Débitmètre 31
Figure 32 : La vanne d'arrêt 32
Figure 33 : Le mitigeur thermostatique 32
Figure 34 : Exemple d'un échangeur thermique dans un ballon de 1000L 39

Figure 35 : Appoint électrique (Résistance)..... 40
Figure 36 : Interface du logiciel T*SOL. 43
Figure 37 : Installation ECS avec résistance électrique et dispositif de charge stratifiée 44
Figure 38 : Choix de la localisation du projet (Tindouf)..... 45
Figure 39 : Entrée des paramètres de consommation d'ECS 46
Figure 40 : Dimensionnement du volume du ballon d'ECS 47
Figure 41 : Caractéristiques techniques de notre capteur solaire (TSOL) 48
Figure 42 : Entrée des caractéristiques de la tuyauterie 49
Figure 43 : Entrée des caractéristiques de l'échangeur thermique 50
Figure 44 : Entrée des caractéristiques de l'appoint électrique..... 51
Figure 45 : Taux de couverture en eau chaude sanitaire 52
Figure 46 : Rendement de système 53
Figure 47 : L'évolution de la température extérieure en fonction du mois 54
Figure 48 : La variation du rayonnement solaire global horizontal 55
Figure 49 : Températures eau chaude sanitaire et températures eau froide 56
Figure 50 : Besoins énergétiques pour le réchauffement d'eau sanitaire. 57
Figure 51 : Température en sortie du circuit capteurs. 58
Figure 52 : Pertes thermiques (Capteurs et Tuyauterie extérieur et intérieur) 59
Figure 53 : Le rendement moyen du circuit capteurs. 60
Figure 54 : Energie solaire et énergie d'appoint nécessaires. 61

Liste des tableaux

Tableau 1 : Le potentiel énergétique solaire en Algérie. 13
Tableau 2 : Tableau comparatif de CES de deux familles. 20
Tableau 3 : Résultats du dimensionnement de la tuyauterie. 38
Tableau 4 : Récapitulatif des résultats de dimensionnement 41
Tableau 5 : Les déférents paramètres consommation ECS 45
Tableau 6 : Paramètres utilisés dans le ballon d'eau chaude. 46
Tableau 7 : Caractéristiques techniques de notre capteur solaire. 47
Tableau 8 : Caractéristiques de la tuyauterie. 48
Tableau 9 : Caractéristiques de l'échangeur thermique. 49
Tableau 10 : Paramètres utilisés dans le circuit solaire. 50
Tableau 11 : Caractéristiques de l'appoint électrique 51
Tableau 12 : Résultats de la simulation 62

Introduction générale

Introduction générale

Le monde connaît aujourd'hui une croissance rapide de la demande en énergie, portée par l'essor démographique et le développement industriel continu, tandis que les sources traditionnelles telles que le pétrole, le gaz et le charbon font face à un épuisement croissant qui menace leur durabilité à long terme. À cela s'ajoutent les graves conséquences environnementales liées à la dépendance excessive à ces ressources fossiles, notamment la hausse des émissions de CO_2 et l'accélération des changements climatiques, ce qui rend la recherche d'alternatives énergétiques propres et renouvelables une nécessité incontournable.

Dans ce cadre, l'énergie solaire s'est imposée comme l'une des solutions les plus prometteuses et durables, en raison de son abondance, de son caractère inépuisable et de l'absence d'émissions nuisibles. L'Algérie occupe une position privilégiée dans ce domaine, disposant de l'un des taux d'ensoleillement les plus élevés au monde, avec une durée d'insolation dépassant trois mille heures par an dans ses régions du sud. Dans ce contexte, la région de Tindouf revêt une importance particulière, notamment avec le lancement du grand projet minier de Gara Djebilet dans la région de Tindouf, considéré comme l'un des plus grands gisements de fer au monde, ce qui nécessite la mise en place de bases de vie et d'installations industrielles demandant des approvisionnements énergétiques fiables et durables, faisant ainsi de l'exploitation de l'énergie solaire dans cette région un choix stratégique par excellence.

Parmi les applications pratiques les plus importantes de l'énergie solaire thermique, on trouve les chauffe-eaux solaires utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire dans les habitations, les installations industrielles et les bases de vie. Ces systèmes s'appuient sur des capteurs solaires plans pour absorber le rayonnement solaire et le convertir en énergie thermique, stockée ensuite dans des ballons appropriés pour fournir de l'eau chaude à la demande, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles et abaissant la facture énergétique.

Sur la base de ces éléments, ce mémoire a pour objet l'étude, le dimensionnement et la simulation d'un système de chauffe-eau solaire destiné à une base de vie dans la région de Tindouf, tirant profit du potentiel solaire exceptionnel de cette région où l'irradiation solaire annuelle atteint 2 195 kWh/m². Le logiciel T*SOL a été utilisé pour simuler les performances du système et valider le dimensionnement adopté.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre introduit le concept de l'énergie solaire, les caractéristiques du rayonnement solaire et met la lumière sur le potentiel solaire en Algérie. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents types de chauffe-eaux solaires et de leurs composants principaux. Le troisième chapitre aborde le dimensionnement du système et le calcul de ses composantes sur la base des besoins énergétiques de la base de vie. Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats de la simulation et leur analyse, avec les conclusions relatives aux performances et à l'efficacité énergétique du système.

Chapitre I :

Généralités sur l'énergie solaire

1. Introduction

L'énergie solaire constitue l'une des principales sources d'énergie renouvelable, suscitant un intérêt croissant face à l'augmentation continue de la demande mondiale en énergie et à l'épuisement des ressources conventionnelles. Elle représente une solution durable et propre, exploitable dans plusieurs domaines. Cette énergie se distingue par sa large disponibilité, ce qui en fait une option adaptée pour répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant les impacts environnementaux. [1]

L'exploitation de l'énergie solaire repose également sur la compréhension des caractéristiques du rayonnement solaire et des mécanismes de sa conversion en une énergie utilisable, notamment dans les applications thermiques telles que la production d'eau chaude. Ainsi, l'accent est mis sur l'étude des systèmes solaires thermiques et des capteurs solaires en tant que moyens essentiels pour valoriser efficacement cette énergie.

2. Le soleil comme source d'énergie

2.1. Présentation du soleil

Le Soleil est une étoile que l'on peut étudier à partir du rayonnement qu'elle envoie vers la Terre. Ce rayonnement peut être mesuré sous forme d'énergie reçue par unité de surface et de temps, ce qui permet d'obtenir des informations sur certaines de ses propriétés physiques. [2]

Le Soleil se situe au centre du système solaire et se trouve à une distance moyenne d'environ 149597870 km de la Terre. Cette distance varie légèrement à cause du mouvement de la Terre autour du Soleil, ce qui entraîne une variation de la quantité d'énergie reçue sur Terre. [3]

2.2. Caractéristiques du soleil

Le Soleil possède plusieurs caractéristiques physiques importantes. Sa masse est d'environ 1.989×10^{30} kg, ce qui représente la plus grande partie de la masse du système solaire, et son rayon est proche de 6.96×10^{8} m. Sa luminosité est estimée à environ 3.84×10^{26} W. La température à sa surface est d'environ 5800 K, ce qui explique son émission d'énergie dans le domaine visible. Le Soleil est principalement composé d'hydrogène et d'hélium, ce qui influence ses propriétés physiques et son évolution. [3]

2.3. Structure interne du soleil

Le Soleil possède une structure interne qu'on ne peut pas observer directement, mais qu'on étudie à l'aide de modèles physiques. À l'intérieur, la température et la pression augmentent vers le centre. C'est dans cette région que l'énergie est produite grâce à des réactions thermonucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium. Ensuite, cette énergie se déplace progressivement vers la surface, ce qui permet au Soleil d'émettre de la lumière et de la chaleur. Malgré ces phénomènes internes, le Soleil reste stable grâce à l'équilibre entre la pression interne et la gravité. [3]

3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire correspond à l'énergie émise par le soleil et qui se propage dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques. En raison de la température élevée de la surface solaire, estimée à environ 5800 K, ce rayonnement se situe principalement dans le domaine du visible, compris entre 0,4 et 0,75 µm, ainsi que dans le domaine de l'infrarouge proche qui peut atteindre environ 4 µm.

Au niveau du sommet de l'atmosphère terrestre, la puissance moyenne du rayonnement solaire est d'environ 340 W/m². Toutefois, cette énergie n'atteint pas entièrement la surface de la Terre. Une partie est réfléchie vers l'espace par les nuages et certains constituants de l'atmosphère, tandis qu'une autre partie est absorbée par l'atmosphère et la surface terrestre. Ainsi, seule une fraction du rayonnement solaire incident parvient réellement au sol, où elle constitue une source importante d'énergie exploitable. [4]

3.1. Rayonnement au niveau de la Terre

La terre se situe à une distance moyenne d'environ 150 millions de kilomètres du Soleil. Celui-ci émet en permanence une grande quantité d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une partie de cette énergie atteint la surface de la Terre et constitue la principale source d'énergie naturelle pour notre planète.

Le rayonnement solaire est composé principalement de trois types de rayonnements : le rayonnement visible, le rayonnement infrarouge (IR) et le rayonnement ultraviolet (UV). Cependant, lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère terrestre, une partie importante est absorbée ou diffusée par les différents gaz présents tels que le dioxyde de carbone, l'ozone et la vapeur d'eau.

Par conséquent, la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre dépend de plusieurs facteurs. Plus l'épaisseur de l'atmosphère traversée est grande, plus l'énergie reçue au sol diminue. De plus, l'inclinaison des rayons solaires varie selon la position géographique : près de l'équateur les rayons sont plus directs, tandis qu'aux régions polaires ils sont plus inclinés, ce qui répartit l'énergie sur une surface plus grande.

Enfin, l'énergie solaire reçue à la surface de la Terre peut également varier en fonction de plusieurs conditions naturelles telles que l'alternance du jour et de la nuit, la présence des nuages ainsi que les variations saisonnières. [5]

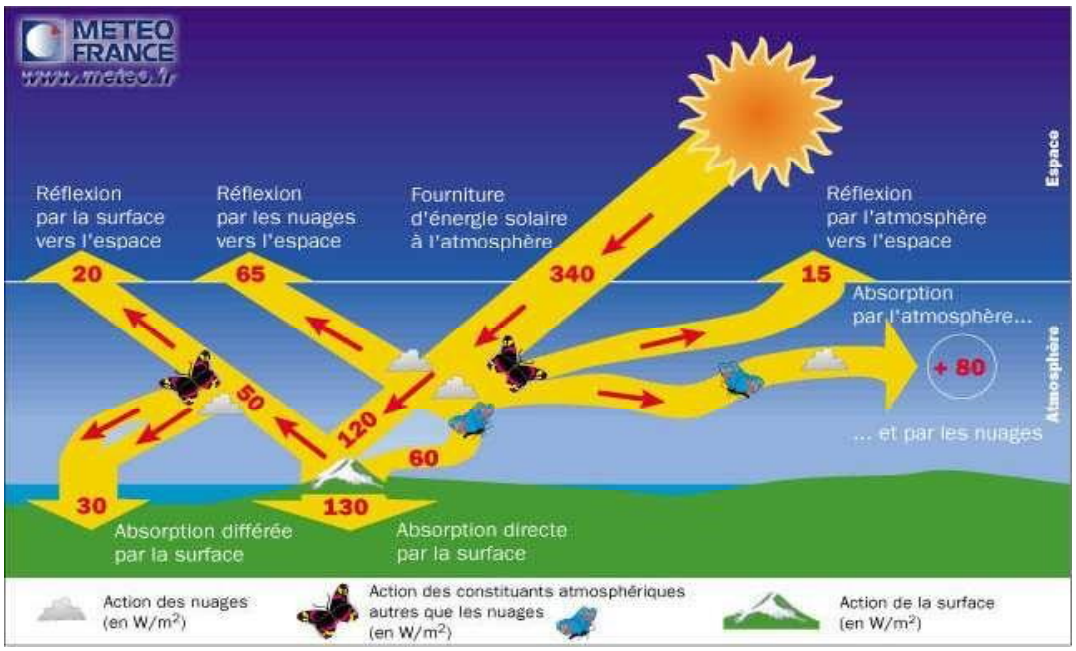


Figure 1 : Rayonnement solaire transmis à la terre. [4]

3.2. Types du Rayonnement solaire

3.2.1. Rayonnement direct

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement qui arrive directement du soleil vers la surface de la Terre sans subir de déviation importante dans l'atmosphère. Il est généralement observé lorsque le ciel est clair et sans nuages. Dans ce cas, les rayons du soleil atteignent directement le sol. En revanche, lorsque le ciel est couvert, le rayonnement direct peut diminuer fortement ou même disparaître à cause des nuages. Plusieurs modèles ont été proposés pour calculer le rayonnement solaire incident sur une surface inclinée, notamment celui de Bird et Hulstrom. [6]

3.2.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire qui a été dispersé dans l'atmosphère par les nuages, les particules de l'air ou certains obstacles comme les bâtiments et le sol. Contrairement au rayonnement direct, il arrive à la surface terrestre depuis plusieurs directions. Même s'il est indirect, sa contribution au rayonnement solaire global est importante et peut atteindre environ 50 % selon les conditions climatiques et la localisation géographique. De plus, cette part du rayonnement varie au cours de l'année. [6]

3.2.3. Rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi correspond à la partie du rayonnement solaire qui est renvoyée par la surface de la Terre ou par les objets présents sur le sol. La quantité de ce rayonnement dépend de la capacité de réflexion de la surface, appelée albédo. Les surfaces très réfléchissantes comme l'eau ou la neige peuvent augmenter ce rayonnement. [6]

3.2.4. Rayonnement global

Le rayonnement solaire global représente la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus, et correspond donc à l'ensemble de l'énergie solaire reçue par la surface terrestre. [6]

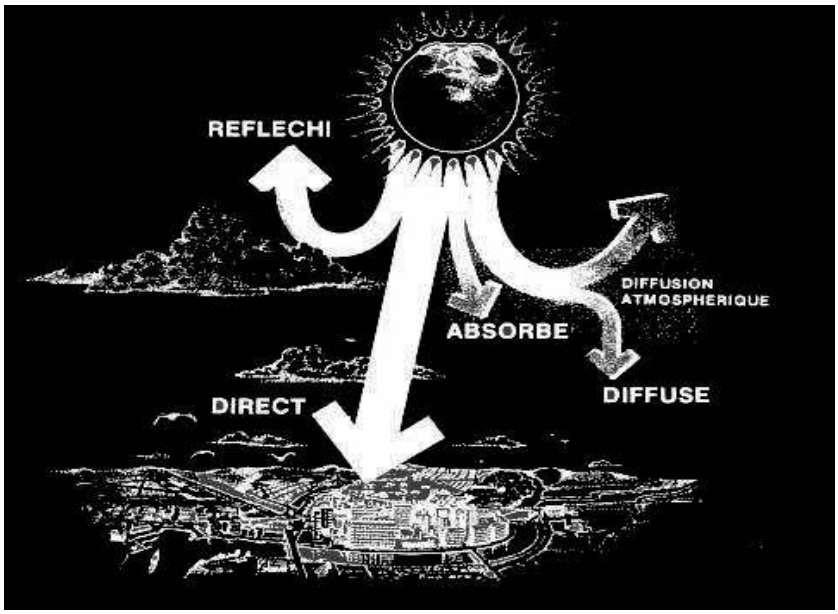


Figure 2 : Les différents types de rayonnement. [7]

3.3. Interaction avec l'atmosphère

Lorsque le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère terrestre, il ne reste pas inchangé, mais il subit plusieurs interactions physiques importantes. Une partie de ce rayonnement est diffusée par les molécules de l'air et les particules en suspension, comme les poussières et les aérosols. Cette diffusion dépend de la longueur d'onde, ce qui explique pourquoi le ciel apparaît bleu pendant la journée. Une autre partie de l'énergie solaire est absorbée par certains gaz atmosphériques, notamment l'ozone qui absorbe le rayonnement ultraviolet, ainsi que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge. Le reste du rayonnement traverse l'atmosphère et atteint la surface terrestre, où il est en partie absorbé et en partie réfléchi. Ainsi, les phénomènes de diffusion, d'absorption et de transmission déterminent la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre et jouent un rôle essentiel dans le bilan énergétique et la régulation de la température de la planète. [8]

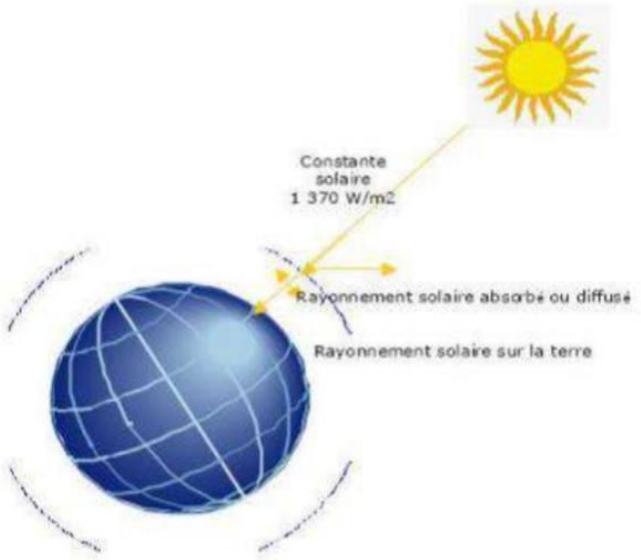


Figure 3 : Rayonnement solaire à travers l'atmosphère. [9]

4. L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable provenant du rayonnement du soleil. Elle est considérée comme une énergie propre, car elle est moins nocive pour l'environnement. Elle peut être utilisée pour produire de la chaleur ou de l'électricité dans plusieurs domaines, comme le chauffage de l'eau, le chauffage des habitations et la production d'électricité.

4.1. Conversion de l`énergie solaire

L'énergie solaire peut être exploitée directement de différentes manières. Les principales formes d'utilisation sont l'énergie solaire thermodynamique, l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque.

4.1.1. Conversion thermique

La conversion thermique de l'énergie solaire consiste à transformer le rayonnement solaire en chaleur. Cette chaleur est généralement utilisée pour chauffer l'eau, notamment dans les systèmes de chauffe-eau solaires. Cette technologie représente une source d'énergie renouvelable qui est de plus en plus utilisée dans les habitations.

Le principe de fonctionnement repose sur l'utilisation de capteurs solaires thermiques qui absorbent le rayonnement solaire et le transforment en énergie thermique. La surface absorbante, souvent de couleur noire, capte l'énergie solaire et la transmet au fluide caloporteur, généralement de l'eau. Dans les systèmes plus performants, l'absorbeur est placé dans un boîtier transparent permettant de créer un effet de serre, ce qui améliore le rendement du système. La chaleur produite est ensuite transportée par le fluide caloporteur vers le système de stockage ou d'utilisation**.** [4]

4.1.2. Conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque consiste à transformer directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Lorsque la lumière solaire, composée de photons, atteint une cellule photovoltaïque fabriquée à partir d'un matériau semi-conducteur, elle transmet son énergie aux électrons présents dans ce matériau. Ces électrons sont alors mis en mouvement, ce qui génère un courant électrique. Ce principe est à la base du fonctionnement des panneaux photovoltaïques utilisés pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire**.** [4]

4.1.3. Conversion thermodynamique

Le solaire thermodynamique à concentration est une technologie qui permet de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Son principe repose sur l'utilisation de miroirs qui concentrent les rayons du soleil vers un tube contenant un fluide caloporteur. Ce fluide est chauffé à des températures élevées pouvant atteindre environ 500 °C. La chaleur produite est ensuite utilisée pour générer de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine couplée à un alternateur afin de produire de l'électricité.

L'un des principaux avantages de cette technologie est la possibilité de stocker la chaleur, ce qui permet aux centrales solaires de continuer à produire de l'électricité même après le coucher du soleil. Par exemple, la centrale solaire Andasol 1 en Espagne dispose d'une capacité de stockage permettant une autonomie d'environ 7 heures.

Cette technologie se développe actuellement dans plusieurs pays, notamment aux États-Unis et en Espagne, où plusieurs centrales solaires thermodynamiques ont été construites. [4]

5. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique correspond à la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette énergie peut être utilisée directement pour certaines applications comme le chauffage des bâtiments ou la production d'eau chaude sanitaire. Elle peut également être utilisée de manière indirecte, par exemple pour produire de la vapeur d'eau afin d'entraîner des turbines et générer de l'électricité.

Contrairement aux systèmes photovoltaïques qui convertissent directement la lumière en électricité, les systèmes solaires thermiques exploitent principalement la chaleur produite par le rayonnement solaire. Le principe repose généralement sur deux méthodes principales: la captation de l'énergie solaire à l'aide d'une surface absorbante, souvent appelée corps noir, ou la concentration du rayonnement solaire en un point afin d'augmenter la température. [7]

5.1. Types de systèmes solaires thermiques

5.1.1. Systèmes passifs

Les systèmes solaires passifs utilisent directement le rayonnement solaire sans recourir à des dispositifs mécaniques. Dans ce type de systèmes, l'énergie solaire est exploitée principalement à travers la conception du bâtiment, comme l'utilisation des fenêtres, des murs ou des matériaux capables de stocker la chaleur. Ces systèmes sont généralement

utilisés pour le chauffage des bâtiments, l'éclairage naturel et parfois le rafraîchissement des locaux. [10]

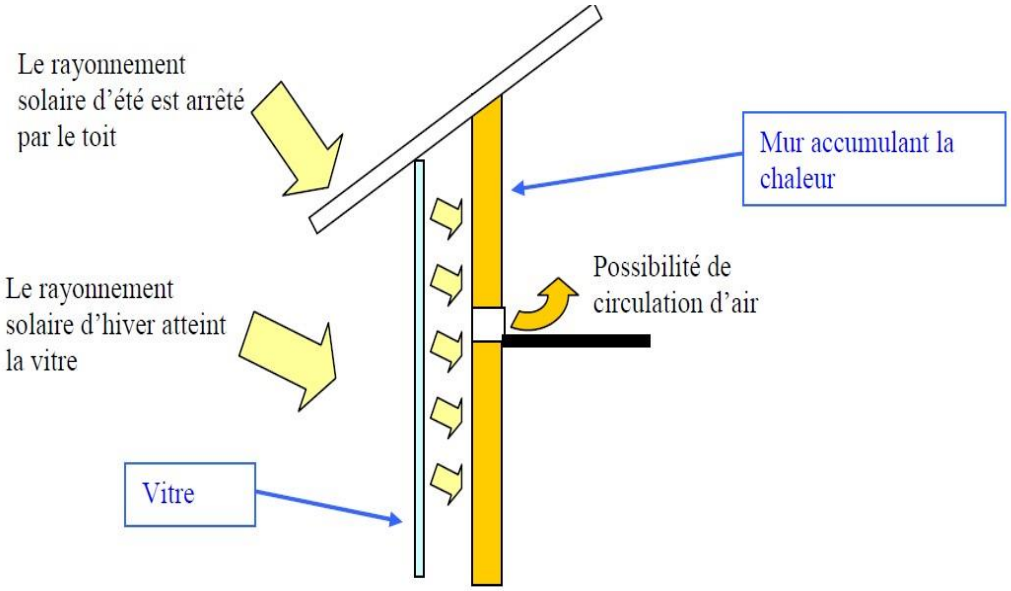


Figure 4 : Chauffage solaire passif. [7]

5.1.2. Systèmes actifs

Les systèmes solaires actifs utilisent le rayonnement solaire pour chauffer un fluide caloporteur qui permet ensuite de transférer la chaleur vers le système d'utilisation. Dans ce type de systèmes, l'énergie solaire est captée et transformée en énergie thermique afin d'être exploitée dans différentes applications, notamment la production d'eau chaude sanitaire. [10]

Les systèmes solaires actifs présentent plusieurs avantages, parmi lesquels :

- Les technologies utilisées pour exploiter l'énergie solaire thermique sont bien maîtrisées et peuvent être adaptées aux différentes conditions climatiques. De plus, les matériaux et les techniques employés sont similaires à ceux utilisés dans les installations traditionnelles de chauffage et de plomberie.
- Il s'agit d'un système modulable qui peut être dimensionné selon les besoins en énergie. Par exemple, dans une base de vie industrielle, un système solaire actif peut être installé pour assurer la production d'eau chaude sanitaire destinée aux travailleurs. [11]
- Les coûts de maintenance restent relativement faibles. Même si l'entretien des installations est nécessaire, les frais de fonctionnement demeurent généralement limités. [11]

Cependant, l'énergie solaire thermique active présente également certaines limites :

- Cette énergie est variable dans le temps, car elle dépend des conditions climatiques et de l'ensoleillement. Il est donc souvent nécessaire de prévoir un système de stockage de l'énergie thermique, ce qui peut augmenter le coût de l'installation.

- L'énergie solaire est une énergie diffuse, ce qui signifie que la puissance disponible par unité de surface reste limitée. Cela peut rendre plus difficile la couverture de besoins énergétiques très importants**.** [11]

5.2. Capteurs solaires thermiques

L'élément principal d'un système solaire actif est le capteur solaire. Son rôle est de capter le rayonnement solaire et de le transformer en chaleur transmise au fluide caloporteur. Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques, parmi lesquels :

5.2.1. Capteurs solaires sans vitrage

Ce sont les capteurs les plus simples. Ils fonctionnent à des températures relativement faibles et sont principalement utilisés pour le chauffage des piscines. [10]



Figure 5 : Capteur moquette pour le chauffage de piscines. [12]

5.2.2. Capteurs solaires plans

Ils sont composés d'une surface vitrée qui laisse passer le rayonnement solaire, d'un absorbeur généralement en cuivre ou en aluminium et d'un réseau de tubes dans lesquels circule le fluide caloporteur. L'ensemble est isolé thermiquement afin de limiter les pertes de chaleur. Ces capteurs sont largement utilisés pour la production d'eau chaude. [10]

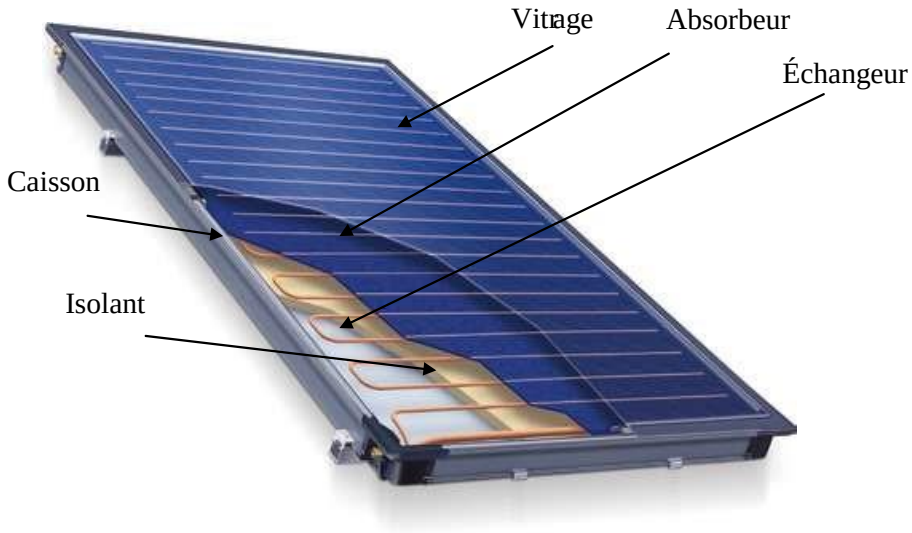


Figure 6 : Schéma d'un capteur solaire vitré. [12]

5.2.3. Capteurs solaires à tubes sous vide

Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels un vide est créé afin de réduire les pertes thermiques et d'améliorer le rendement du système Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. [10] [12]

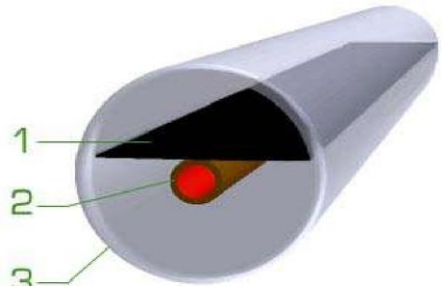


Figure 7 : Capteur sous vide. [12]

6. Potentiel solaire

L'énergie solaire est considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes, car elle provient du rayonnement émis en permanence par le soleil. Ainsi, la ressource solaire est pratiquement inépuisable et sa valeur reste relativement stable pour un lieu donné pendant une certaine période. Cependant, l'exploitation de cette énergie dépend de plusieurs facteurs, tels que la disponibilité des surfaces pour l'installation des systèmes solaires, le développement technologique des systèmes de conversion, ainsi que les conditions économiques et les politiques énergétiques adoptées par chaque pays.

Par ailleurs, l'énergie solaire se caractérise par son caractère variable dans le temps et dans l'espace. En effet, la quantité de rayonnement solaire reçue peut varier selon la localisation géographique et les conditions climatiques. Cela rend sa disponibilité moins

stable que celle des sources d'énergie conventionnelles comme les combustibles fossiles.

En général, il n'est pas possible d'exploiter la totalité de l'énergie solaire disponible. Pour cette raison, on distingue généralement trois types de potentiel solaire :

- Le potentiel brut (ou potentiel énergétique) : il représente la quantité totale d'énergie solaire disponible dans une région donnée.
- Le potentiel théorique : il correspond à la part de cette énergie qui peut être captée par les systèmes de conversion solaire, comme les capteurs ou les panneaux solaires.
- Le potentiel exploitable : il représente la fraction d'énergie qui peut être réellement utilisée en tenant compte des contraintes techniques, économiques et réglementaires.

Pour estimer le potentiel solaire d'une région, on utilise souvent une méthode appelée approche « Top Down ». Cette méthode consiste à commencer par l'évaluation du rayonnement solaire disponible dans la zone étudiée, puis à réduire progressivement cette valeur en prenant en considération les différentes contraintes techniques, économiques sociales, afin d'obtenir finalement l'énergie solaire réellement exploitable. [14]

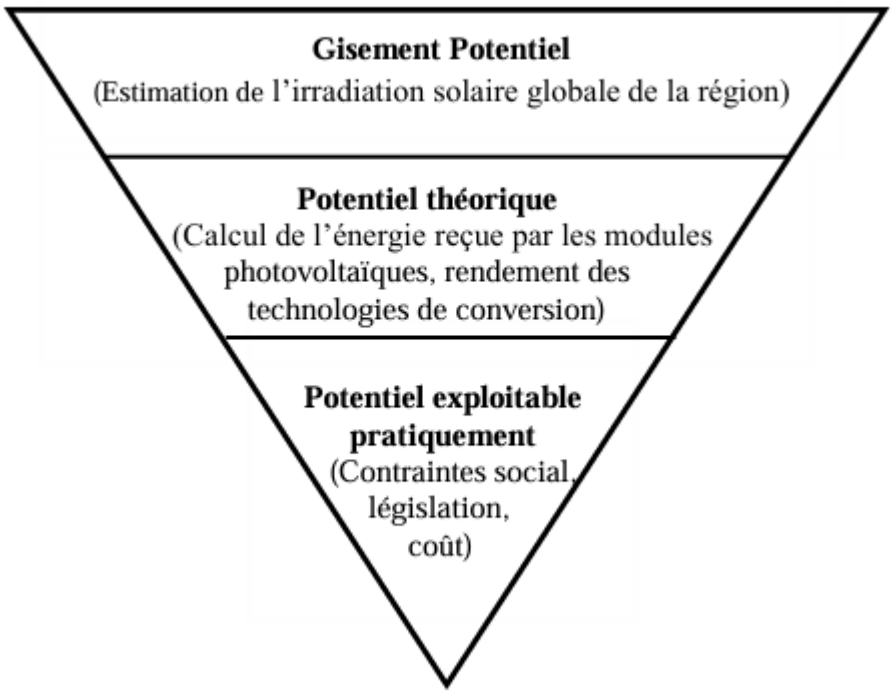


Figure 8 : Approche Top-Down pour l'estimation du potentiel solaire. [14]

6.1. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède un potentiel très important en énergie solaire. Cette énergie constitue l'une des sources d'énergie renouvelable les plus abondantes dans le pays. En effet, la durée d'ensoleillement dépasse 2000 heures par an dans la majorité du territoire national et peut atteindre environ 3900 heures par an, notamment dans les régions des hauts plateaux et du Sahara.

Dans les régions du nord du pays, la durée d'ensoleillement varie d'environ 5 heures par jour en hiver à plus de 11 heures par jour en été. En revanche, dans les régions du sud, cette durée est plus élevée, dépassant 8 heures par jour en hiver et pouvant atteindre environ 12 heures par jour en été, ce qui traduit une grande disponibilité de l'énergie solaire dans ces zones.

Par ailleurs, l'irradiation solaire reçue sur une surface horizontale dépasse 4,5 kWh/m²/jour dans la plupart des régions de l'Algérie. Les études indiquent que la valeur moyenne de l'irradiation solaire varie entre environ 4,7 kWh/m²/jour dans le nord du pays et 7,1 kWh/m²/jour dans les régions du sud.

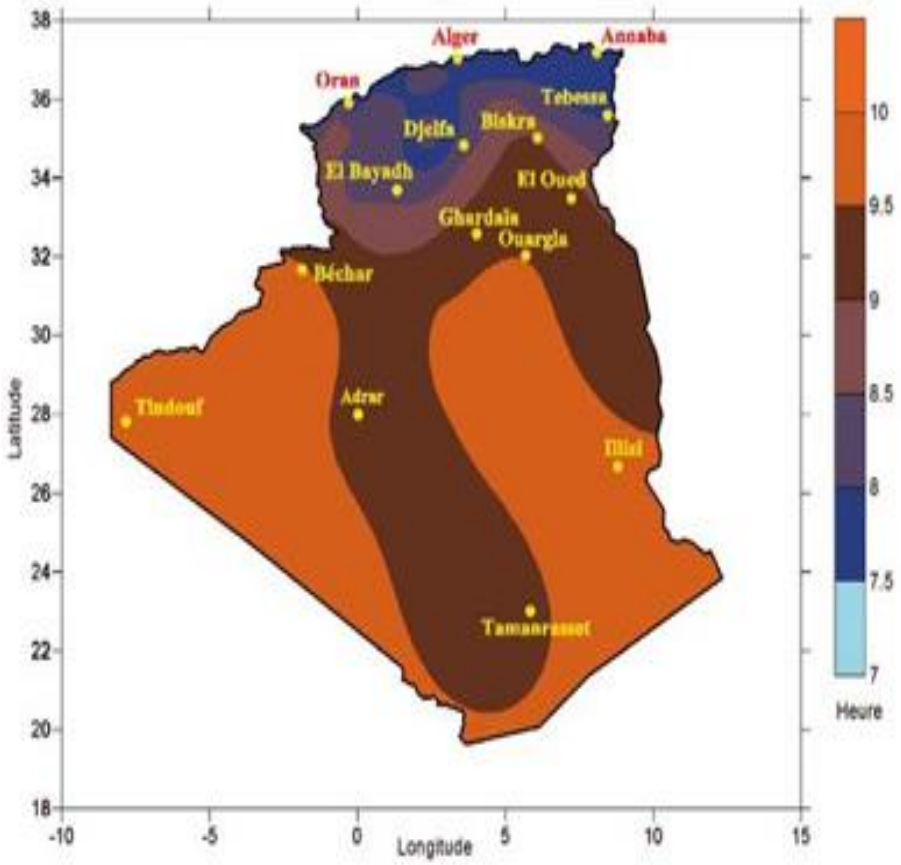


Figure 9 : Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée en Algérie

Grâce à ces niveaux élevés d'irradiation et à la longue durée d'ensoleillement, l'Algérie est considérée comme l'un des pays disposant d'un fort potentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, notamment dans les régions sahariennes. Cela représente une opportunité importante pour le développement des projets d'énergie solaire dans différentes régions du pays. [14]

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m2/an)	1700	1900	2650

Tableau 1: Le potentiel énergétique solaire en Algérie. [15]

7. Applications de l'énergie solaire

L'énergie solaire thermique est utilisée dans plusieurs domaines selon les besoins en chaleur. Dans la vie quotidienne, elle est principalement utilisée pour le chauffage de l'eau grâce à des systèmes solaires installés sur les toits, ce qui permet de réduire l'utilisation de l'électricité ou du gaz. Elle peut également être utilisée pour le chauffage des bâtiments, surtout dans les régions ensoleillées. Dans le domaine industriel, cette énergie est exploitée pour fournir de la chaleur dans différentes opérations comme le séchage ou la production de vapeur. On la retrouve aussi dans le secteur agricole, notamment pour le séchage des produits. Ces différentes applications montrent que l'énergie solaire thermique est une solution pratique, économique et respectueuse de l'environnement. [13]

8. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

Les avantages de l'énergie solaire les plus importants sont : [16]

Les avantages :

- L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et gratuite, car elle dépend du soleil.
- C'est une énergie propre et respectueuse de l'environnement, car elle ne produit pas de gaz polluants ni de déchets.
- Elle permet de produire de l'électricité et de réduire la dépendance au réseau électrique.
- Le système solaire peut être facilement agrandi selon les besoins en énergie.
- Dans certains cas, il est possible de vendre le surplus d'électricité produite, ce qui aide à récupérer une partie des coûts d'investissement.
- L'entretien est généralement faible par rapport à d'autres systèmes énergétiques.
- Elle ne produit pas de bruit pendant son fonctionnement.

Les inconvénients :

- La fabrication des panneaux solaires nécessite une technologie avancée et des investissements importants

- Le rendement des panneaux solaires reste relativement limité par rapport à certaines autres sources d'énergie.
- Les installations domestiques peuvent nécessiter des batteries pour stocker l'énergie.
- Le coût initial d'installation peut être élevé.

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions principales liées à l'énergie solaire. On a vu que le soleil est une source importante d'énergie et que son rayonnement joue un rôle essentiel dans plusieurs phénomènes. On a également compris comment ce rayonnement arrive à la terre et comment il est influencé par l'atmosphère. Ensuite, on a abordé les différentes façons d'exploiter cette énergie, en particulier l'énergie solaire thermique et ses applications comme le chauffage de l'eau. Enfin, on peut dire que l'énergie solaire représente une solution intéressante et durable pour répondre aux besoins énergétiques.

Chapitre II :
Les Chauffe-eaux solaires

1. Introduction

Dans le cadre de l'exploitation de l'énergie solaire thermique, le chauffe-eau solaire constitue une solution efficace pour la production d'eau chaude sanitaire. Ce système repose sur la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique, permettant ainsi de réduire la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des chauffe-eaux solaires en présentant leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types existants. Nous aborderons également les principaux composants constituant ces systèmes, tels que le capteur solaire, le ballon de stockage, l'échangeur thermique et les dispositifs de régulation. Cette étude permet de mieux comprendre le fonctionnement global du système et de préparer les bases nécessaires pour son dimensionnement et son optimisation.

2. Chauffe-eau solaire

2.1. Définition

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]

2.2. Principe de fonctionnement

Le chauffe-eau solaire utilise l'énergie du rayonnement solaire pour produire de l'eau chaude sanitaire. Le principe de fonctionnement repose sur la captation de l'énergie solaire par un capteur thermique qui chauffe un fluide caloporteur circulant dans un circuit fermé. Ce fluide transporte la chaleur vers le ballon de stockage à travers un échangeur thermique où l'énergie thermique est transférée à l'eau sanitaire. Après avoir cédé sa chaleur, le fluide refroidi retourne vers le capteur pour être réchauffé de nouveau. Ce cycle se répète tant que l'ensoleillement est suffisant. Lorsque l'énergie solaire devient insuffisante, un système d'appoint permet d'assurer la production d'eau chaude**.** [18]

Le capteur solaire **(1)** : il permet de capter l'énergie du rayonnement solaire et de la transformer en chaleur. Ce capteur est généralement installé sur le toit afin de recevoir un maximum d'ensoleillement.

Le circuit primaire **(2)** : il s'agit d'un circuit fermé et calorifugé contenant un fluide caloporteur, souvent constitué d'eau mélangée avec un antigel. Ce fluide se réchauffe dans les tubes du capteur puis se dirige vers le ballon de stockage.

L'échangeur thermique **(3)** : il constitué d'un serpentin qui permet de transférer la chaleur du fluide caloporteur vers l'eau sanitaire contenue dans le ballon.

Le retour du fluide **(4)** : après avoir transféré sa chaleur, le fluide refroidi retourne vers le capteur pour être chauffé à nouveau.

Le ballon de stockage **(5)** : c'est un réservoir métallique qui permet de stocker l'eau chaude produite par le système solaire pour une utilisation ultérieure.

L'arrivée d'eau froide **(6)** : l'eau froide provenant du réseau remplace l'eau chaude consommée et sera chauffée à nouveau dans le ballon.

Le circulateur **(7)** : il s'agit d'une pompe qui assure la circulation du fluide caloporteur dans le circuit solaire.

Le système de régulation **(8)** : il permet de contrôler le fonctionnement du circulateur en comparant la température du capteur solaire **(9)** à celle du capteur du ballon **(10)** : si la température du ballon est supérieure à celle du capteur, le circulateur s'arrête, sinon, il se remet en marche pour chauffer l'eau du ballon.

Le système d'appoint **(11), (12)** : c'est une source d'énergie supplémentaire, comme une résistance électrique ou une chaudière, utilisée en cas d'insuffisance de l'ensoleillement, notamment en hiver ou lors de mauvaises conditions climatiques. [18]

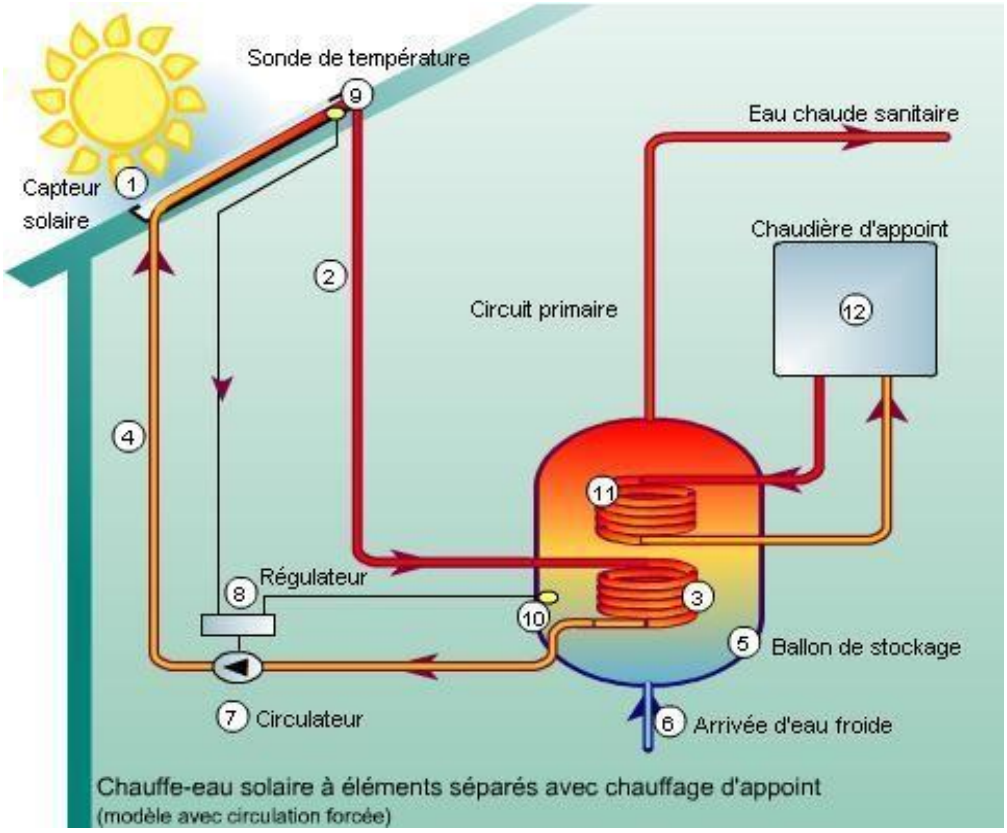


Figure 10 : Schéma général de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.

3. Types de chauffe-eaux solaires

Il existe plusieurs types de chauffe-eaux solaires disponibles sur le marché. Ces systèmes se distinguent principalement par leur conception et leur mode de fonctionnement. Parmi les types les plus couramment utilisés, on peut citer les suivants :

3.1. Chauffe-eau solaire à thermosiphon

3.1.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire à thermosiphon repose sur le principe de la circulation naturelle du fluide caloporteur. Lorsque ce fluide est chauffé par le rayonnement solaire dans le capteur, il se dilate et sa densité diminue. Ainsi, le fluide chaud a tendance à monter naturellement, tandis que le fluide plus froid, plus dense, descend.

Pour assurer cette circulation naturelle, le système doit être correctement conçu. Le capteur solaire est généralement placé en dessous du ballon de stockage, et la distance entre les capteurs et le ballon doit rester relativement faible. De plus, les conduites doivent être installées avec une pente régulière afin de faciliter le mouvement du fluide.

Le fluide chauffé dans le capteur solaire monte alors à travers les tuyaux vers la partie supérieure de l'échangeur thermique située dans le ballon solaire. Il transmet sa chaleur à l'eau froide contenue dans le ballon. En cédant cette chaleur, le fluide se refroidit, devient plus dense et redescend à travers le serpentin jusqu'au bas du capteur solaire, où il sera à nouveau chauffé**.** [19]

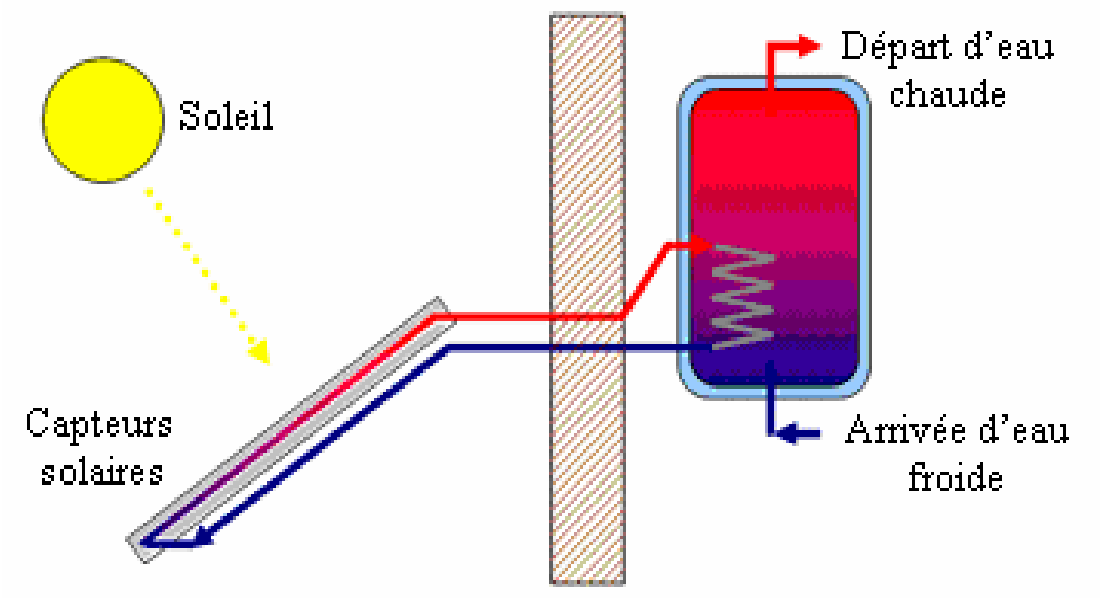


Figure 11 : Le chauffe-eau solaire thermosiphon.

3.1.2. Thermosiphon monobloc

Dans ce type de système, les capteurs solaires et le ballon de stockage sont intégrés dans une seule unité, Ce système se caractérise par sa simplicité d'installation et de fonctionnement, puisqu'il suffit de raccorder l'alimentation en eau froide et de connecter la sortie d'eau chaude au point d'utilisation. Ce type de chauffe-eau solaire est considéré comme l'un des systèmes les plus simples et les moins coûteux, ce qui explique sa large

utilisation dans plusieurs régions du monde. Cependant, le fait que le ballon soit placé à l'extérieur avec les capteurs peut entraîner des pertes thermiques plus importantes. De plus, son intégration architecturale dans les bâtiments peut être plus difficile. Ce système est particulièrement adapté aux régions à climat chaud, notamment pendant la saison estivale. [20]

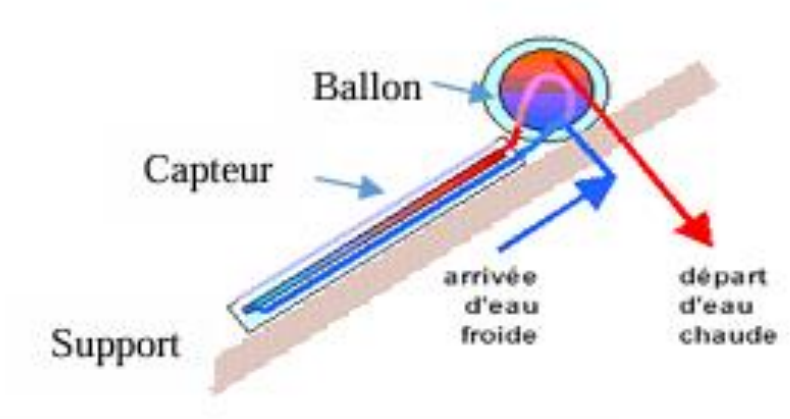


Figure 12 : Chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc. [21]

3.1.3. Thermosiphon à éléments séparés

Dans le chauffe-eau solaire à thermosiphon à éléments séparés, les capteurs solaires et le ballon de stockage ne sont pas installés dans une seule unité, mais placés séparément et reliés par des conduites. Cette configuration permet une plus grande flexibilité dans l'installation, car le ballon peut être installé selon les besoins (verticalement, mural ou même horizontalement). Les capteurs solaires sont généralement placés en contrebas et à proximité du ballon d'eau chaude sanitaire afin de faciliter la circulation naturelle du fluide caloporteur. [19]

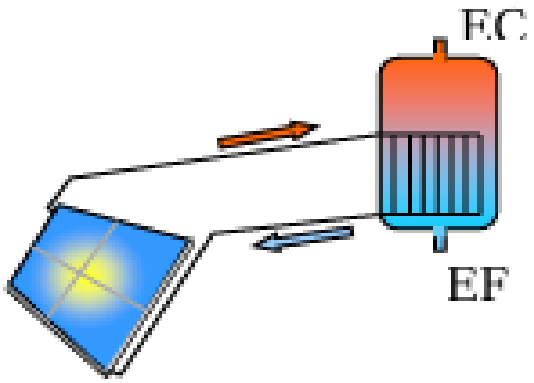


Figure 13 : Chauffe-eau solaire à thermosiphon éléments séparés. [21]

3.2. Chauffe-eau solaire à circulation forcée

Cette catégorie comprend les chauffe-eaux solaires qui utilisent un circulateur pour assurer la circulation du fluide caloporteur chauffé dans les capteurs solaires vers le ballon de stockage. Le fluide qui circule dans les capteurs est généralement un antigel, ce qui signifie qu'il n'est pas destiné à la consommation et qu'il ne doit en aucun cas être mélangé avec l'eau contenue dans le ballon.

Le fonctionnement du système est contrôlé par un régulateur qui compare la température de l'eau dans le ballon (Tb) avec celle du capteur solaire (Tc). En fonction de cette différence de température, le régulateur commande la mise en marche ou l'arrêt de la pompe qui fait circuler le fluide caloporteur, Lorsque l'ensoleillement est insuffisant, le ballon peut être relié à une source d'énergie d'appoint afin de garantir la production d'eau chaude. Cet appoint peut être assuré par une résistance électrique ou par un échangeur thermique alimenté par une chaudière. Contrairement aux systèmes fonctionnant par thermosiphon, ce type d'installation offre une grande liberté dans la disposition des éléments, car le ballon de stockage n'a pas besoin d'être placé au-dessus du capteur solaire. Bien que ce système soit plus complexe, il présente l'avantage d'offrir une plus grande flexibilité d'installation et permet une meilleure intégration dans les bâtiments**.** [22]

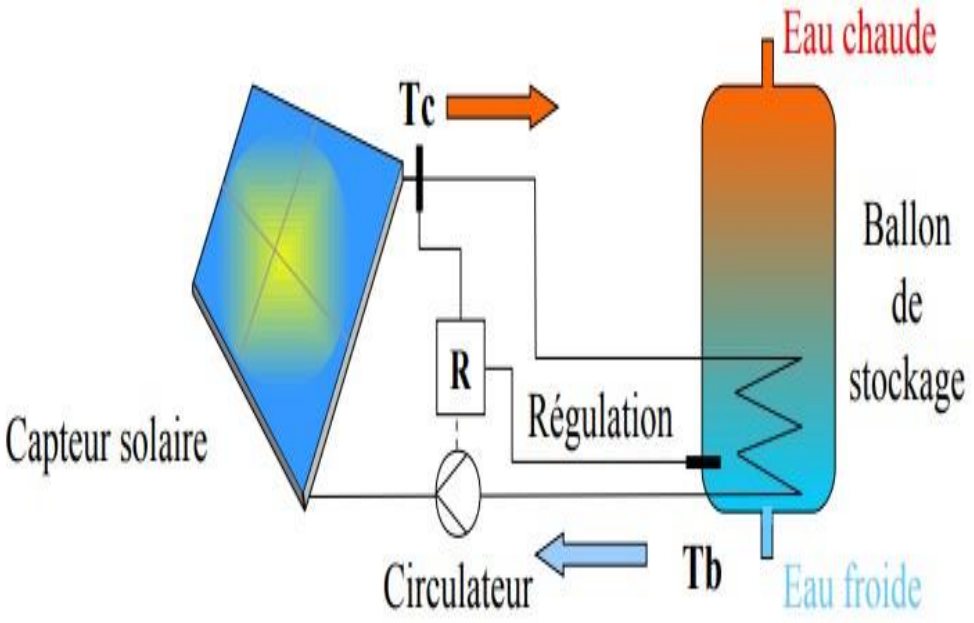


Figure 14: Chauffe-eau solaire à circulation forcée. [21]

3.3. Chauffe-eau solaire à auto-vidange

Le système à auto-vidange permet de protéger l'installation contre certains problèmes pouvant affecter les systèmes solaires, tels que la surchauffe en été ou le gel de l'eau dans les canalisations en hiver, Ce système fonctionne grâce à la possibilité de vidanger automatiquement les capteurs solaires lorsque la pompe s'arrête, en dirigeant le fluide vers un réservoir hermétique. Le ballon de stockage est généralement placé à un niveau inférieur aux capteurs solaires.

Lorsque l'ensoleillement devient insuffisant ou que le chauffage s'arrête, la circulation du fluide s'interrompt et le circuit se vide automatiquement. Dès que l'ensoleillement redevient suffisant, la circulation du fluide reprend et le système se remet en fonctionnement.

.



Figure 15 : Le chauffe-eau solaire à auto-vidange

4. Comparaison de types de chauffe-eaux solaires

Le tableau 2 résume la différence qui existe entre les deux familles de CES développés dans les paragraphes qui précèdent**.**

Eléments	CES à thermosiphon	CES à circulation forcée
Installation du CES	Plus simple (pas de circulateur, ni de régulateur), mais l'intégration architecturale est plus difficile.	Plus difficile : nécessite plus de main d'œuvre.
Durée de vie	Dure 20 ans en moyenne	Dure 20 ans en moyenne
Flexibilité d'installation	Moins flexible à cause de la position du ballon.	Plus flexible, car le ballon peut se positionner en dessous du capteur.
Utilisation	Souvent à titre individuel (CESI)	Employé généralement pour les utilisateurs collectifs ou industriel et peut être doté de plusieurs capteurs.
Maintenance	Plus facile	Moins facile à cause de panne des éléments fragiles (régulateur et pompe).

Tableau 2: Tableau comparatif de CES de deux familles. [23]

5. Les principaux composants d'un chauffe-eau solaire

5.1. Le capteur solaire plan

Le capteur solaire, c'est simplement un appareil conçu pour capter l'énergie des rayons du soleil, la transformer en chaleur et la transmettre à un fluide qui la transporte. Il repose sur deux principes physiques de base : l'effet de serre et le corps noir.

Le type plan peut atteindre des températures de 30°C à 150°C, sans besoin de concentrer les rayons ni de suivre le soleil. La raison pour laquelle la température n'est pas super élevée, c'est qu'il y a des pertes par rayonnement depuis la surface, en plus des déperditions thermiques sur les bords**.** [24]

5.1.1 Les composants du capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est constitué de plusieurs éléments principaux, notamment une couverture transparente, un absorbeur, un fluide caloporteur, une isolation thermique et un cadre extérieur. Ces éléments travaillent ensemble afin de capter le rayonnement solaire et de le transformer en énergie thermique utilisée pour chauffer l'eau

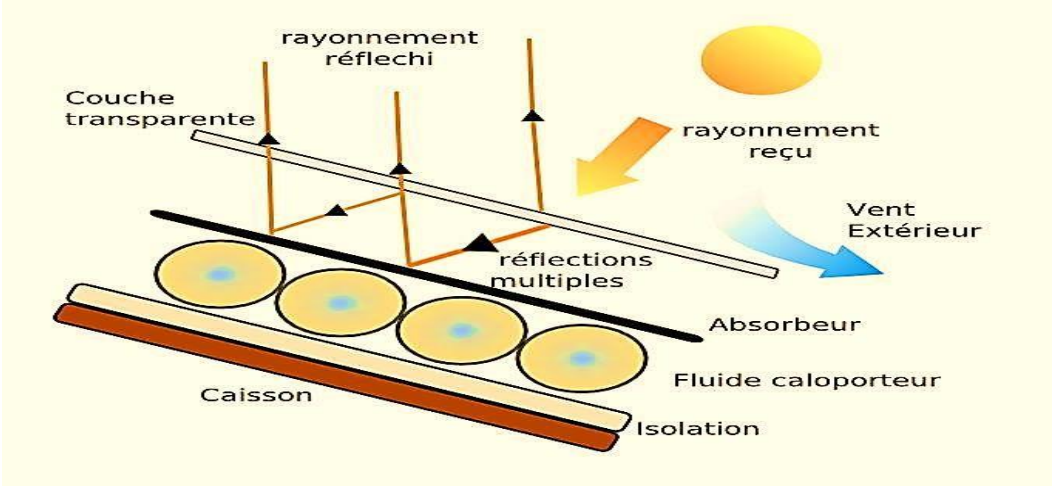
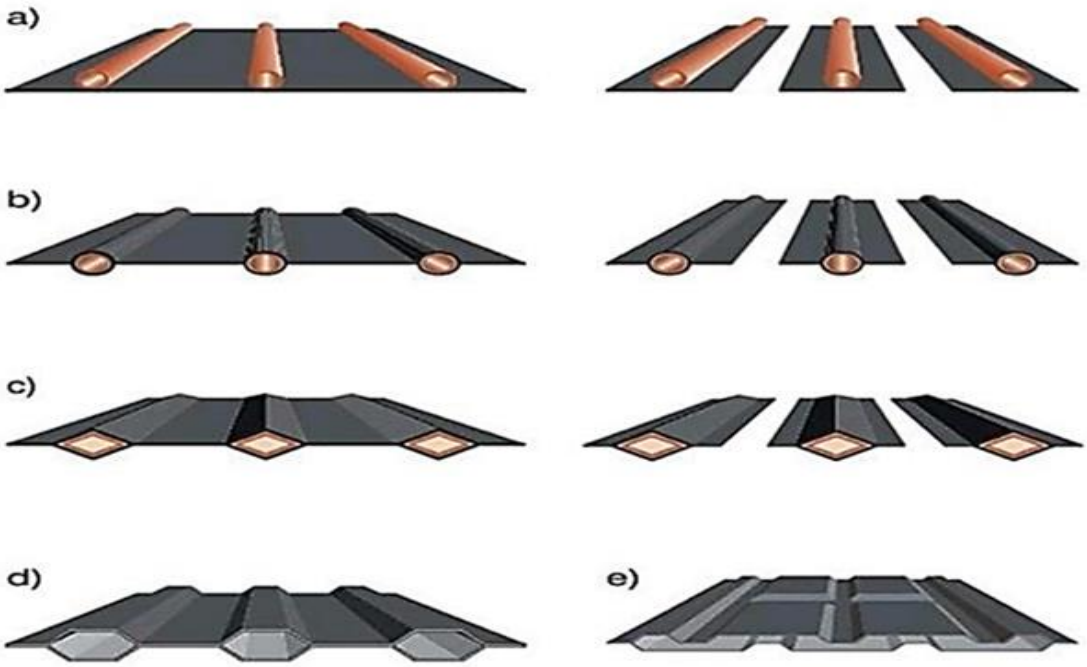


Figure 16 : Composants d'un capteur solaire plan.

a. L'absorbeur

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire thermique. Il est formé d'une plaque métallique dans laquelle sont intégrés des tubes par lesquels circule le fluide caloporteur. La surface absorbante capture un maximum de rayonnement solaire et transmet la chaleur produite au fluide avec un minimum de pertes. La plupart du temps, ces absorbeurs sont recouverts d'un traitement de surface qui les rend hautement absorbants. Ce qui détermine les performances d'un absorbeur, ce sont les coefficients d'absorption (α) et d'émission (ε), qui varient selon le type de revêtement utilisé. [25]



.

Figure 17 : Diverses formes d'absorbeurs (d'après DGS Solar Anlagen 2001)

La couche sélective est utilisée pour améliorer les performances de l'absorbeur. Elle permet d'absorber une grande partie du rayonnement solaire tout en limitant les pertes de chaleur sous forme de rayonnement thermique. Grâce à cette couche, le rendement du capteur solaire est amélioré. [24]

c. La couverture transparente

La couverture transparente est généralement réalisée en verre trempé, résistant aux chocs et aux variations de température. Elle permet de laisser passer le rayonnement solaire vers l'intérieur du capteur tout en réduisant les pertes de chaleur et en protégeant les composants internes contre les conditions extérieures. [26]

d. L'isolation thermique

L'isolation thermique est placée à l'arrière du capteur solaire afin de limiter les pertes de chaleur et de conserver l'énergie thermique à l'intérieur du système. Elle est souvent réalisée à partir de laine minérale ou de matériaux synthétiques capables de supporter des températures élevées. [26]

e. Le cadre

Le cadre constitue la structure externe du capteur solaire. Il sert à maintenir et à protéger les différents composants contre les agressions extérieures telles que le vent ou les chocs. Il est généralement fabriqué en aluminium ou en acier, car ces matériaux sont à la fois résistants et relativement légers. [26]

f. Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur est le fluide chargé de transporter la chaleur captée par les capteurs solaires vers le ballon de stockage. Le choix de ce fluide dépend de ses propriétés physiques et chimiques, notamment sa conductivité thermique, sa viscosité et sa capacité calorifique. Dans la plupart des installations solaires thermiques, on utilise de l'eau mélangée à un antigel, tel que l'éthylène glycol, afin d'éviter les problèmes de gel dans les conduites lorsque la température extérieure est basse. [26]

5.1.2 Fonctionnement d'un capteur solaire plan

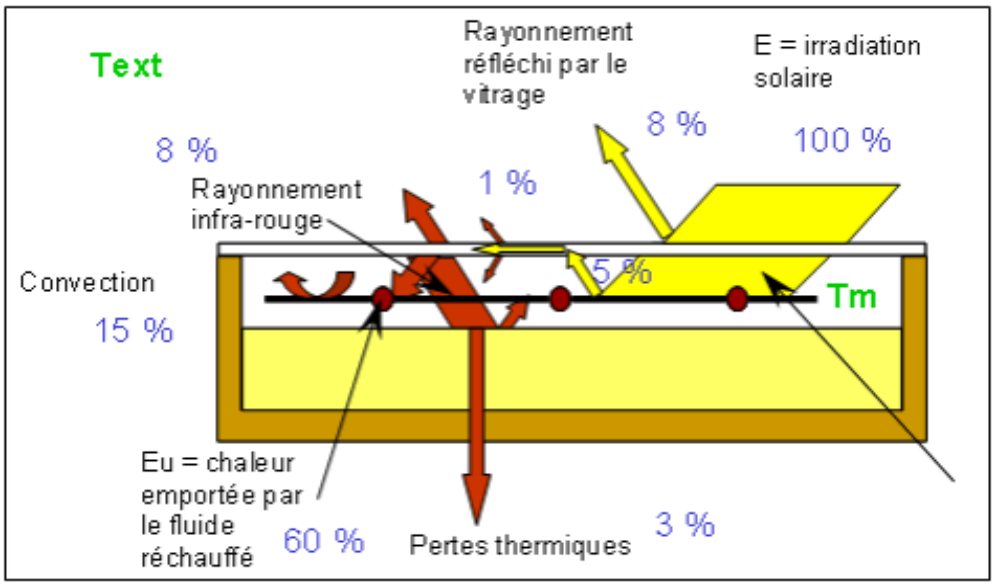


Figure 18: Principe de fonctionnement du capteur solaire plan

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple : [27]

Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur.

Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le rayonnement I.R proche mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre. L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement.

5.2. L'unité de stockage (Ballon d'eau chaude)

Le ballon de stockage est une cuve métallique bien isolée qui permet de stocker l'eau chaude sanitaire produite par le système solaire. Lors du chauffage, l'eau chaude, qui possède une densité plus faible que l'eau froide, a tendance à monter vers la partie supérieure du ballon. Ainsi, l'eau froide reste dans la partie inférieure du réservoir. Lorsque de l'eau chaude est utilisée, elle est progressivement remplacée par de l'eau froide provenant du réseau.

Pour assurer un bon fonctionnement du système, le ballon de stockage doit répondre à plusieurs critères. Il doit être capable de résister à la pression du liquide, qui ne dépasse généralement pas 2 bars. Il doit également être dimensionné de manière à répondre aux besoins quotidiens des utilisateurs, aussi bien en quantité d'eau chaude qu'en température d'utilisation. De plus, une bonne isolation thermique est nécessaire afin de limiter les pertes de chaleur, avec une conductivité thermique inférieure à 0,065 W/m·K. Enfin, il est important de limiter autant que possible la prolifération des bactéries telles que les légionnelles, qui se développent généralement dans les eaux stagnantes à des températures comprises entre 25 °C et 45 °C, mais qui sont éliminées lorsque la température dépasse 60 °C.

On distingue généralement deux types de technologies de ballons de stockage : le ballon avec échangeur thermique et le ballon sans échangeur thermique. [22]

a. Ballon de stockage avec échangeur (système à deux fluides)

Dans ce type de système, le fluide caloporteur circule entre les capteurs solaires et le ballon de stockage en passant par un échangeur thermique situé dans la partie inférieure du réservoir. Cet échangeur, généralement sous forme de serpentin, permet de transférer la chaleur du fluide caloporteur vers l'eau sanitaire sans contact direct entre les deux fluides. Une fois chauffée, l'eau chaude s'accumule dans la partie supérieure du ballon où elle est prête à être utilisée. [22]

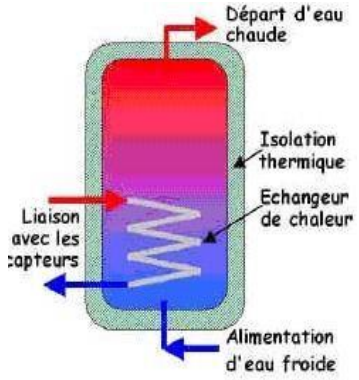


Figure 19 : Ballon avec échangeur

b. Ballon de stockage sans échangeur (système à un fluide)

Dans ce système, l'eau chauffée dans les capteurs solaires est directement stockée dans la partie supérieure du ballon et transmet sa chaleur à l'eau froide située dans la partie inférieure du réservoir. Cependant, ce système présente un inconvénient : le liquide circulant dans les capteurs est continuellement renouvelé, ce qui peut favoriser la formation de dépôts de calcaire dans l'absorbeur. [22]

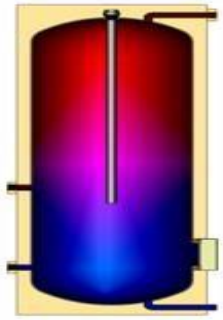


Figure 20 : Ballon sans échangeur.

5.3. L'échangeur thermique

L'échangeur thermique joue un rôle essentiel dans un chauffe-eau solaire. Il permet de chauffer l'eau sanitaire grâce à la chaleur récupérée par les capteurs solaires. Cet échangeur est généralement installé dans le circuit primaire du système et se présente souvent sous la forme d'un serpentin placé à l'intérieur du ballon de stockage. Cette configuration augmente la surface de contact entre les fluides et améliore ainsi l'efficacité du transfert thermique. Lorsque l'eau froide entre dans le ballon, elle est chauffée progressivement par la chaleur transmise par le fluide caloporteur circulant dans le serpentin. L'eau chauffée peut ensuite être utilisée lorsque cela est nécessaire. [28]

5.4. Le système d'appoint

Dans une installation de chauffe-eau solaire, un système d'appoint est généralement prévu afin de garantir la production d'eau chaude lorsque l'énergie solaire est insuffisante. Lorsque la température de l'eau dans le ballon de stockage n'atteint pas la valeur souhaitée, ce dispositif complémentaire intervient pour fournir la chaleur nécessaire.

L'appoint peut être intégré directement dans le ballon solaire ou être installé dans un ballon séparé. Il assure ainsi la disponibilité permanente de l'eau chaude, indépendamment des conditions d'ensoleillement ou de la consommation d'eau. Les sources d'énergie utilisées pour cet appoint peuvent être l'électricité, le gaz naturel ou encore le fioul, selon les besoins de l'installation.

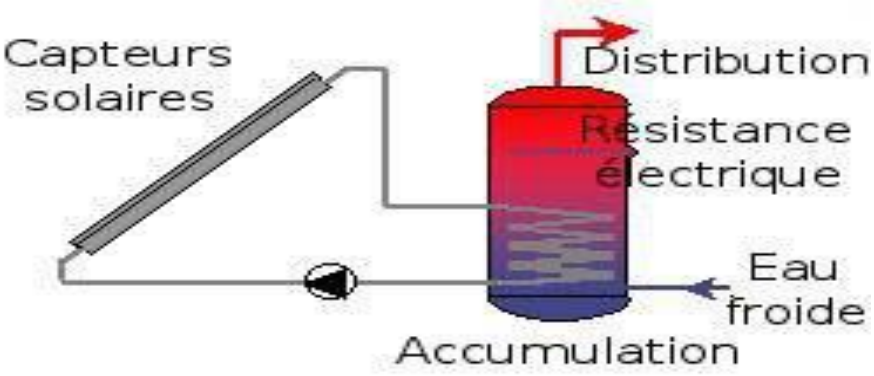


Figure 21: Emplacement de l'appoint électrique dans le ballon.

a. Appoint électrique intégré :

C'est le système qui connaît la plus grande diffusion. Dans le ballon solaire, une résistance électrique est incorporée. Elle commence à opérer sous l'action du régulateur lorsque cela s'avère nécessaire.

b. L'appoint séparé :

Il s'agit d'une situation où l'on a déjà un cumulus et qu'on envisage de le compléter avec une installation solaire. Dans ce cas, il est nécessaire de conserver le ballon d'origine et de se procurer un ballon solaire sans appoint intégré.

5.5. Le groupe de transfert

Le groupe de transfert regroupe l'ensemble des composants permettant d'assurer le transport de la chaleur depuis les capteurs solaires vers l'unité de stockage. Il comprend généralement une pompe de circulation destinée à faire circuler le fluide caloporteur dans le circuit solaire, ainsi que des capteurs de température et un système de régulation chargé de contrôler le fonctionnement de la pompe en fonction des conditions de fonctionnement du système.

5.5.1 La pompe (Circulateur)

La pompe, également appelée circulateur, a pour fonction d'assurer la circulation du fluide caloporteur dans le circuit solaire. Elle permet ainsi de transporter la chaleur captée par les capteurs solaires vers le ballon de stockage. Les circulateurs utilisés dans les installations solaires sont généralement capables de fonctionner à des températures relativement élevées, pouvant atteindre environ 120 °C, ce qui les rend adaptés aux systèmes de chauffe-eau solaire.



Figure 22 : Une pompe (Circulateur)

5.5.2 Régulation et contrôle

La régulation différentielle permet de contrôler le fonctionnement du circulateur afin d'optimiser le transfert de chaleur vers le ballon de stockage. Son rôle consiste à comparer la température du fluide à la sortie du capteur solaire avec celle de l'eau présente dans le ballon. Lorsque la température du capteur devient supérieure à celle du ballon, la régulation

active la pompe afin de transférer la chaleur. En revanche, lorsque cette différence de température diminue, la pompe est arrêtée afin d'éviter un transfert inutile de chaleur. Dans la pratique, la mise en marche et l'arrêt du circulateur sont déterminés par un régulateur différentiel qui utilise deux seuils de température, généralement compris entre 5 et 8 °C pour le démarrage et entre 2 et 4 °C pour l'arrêt

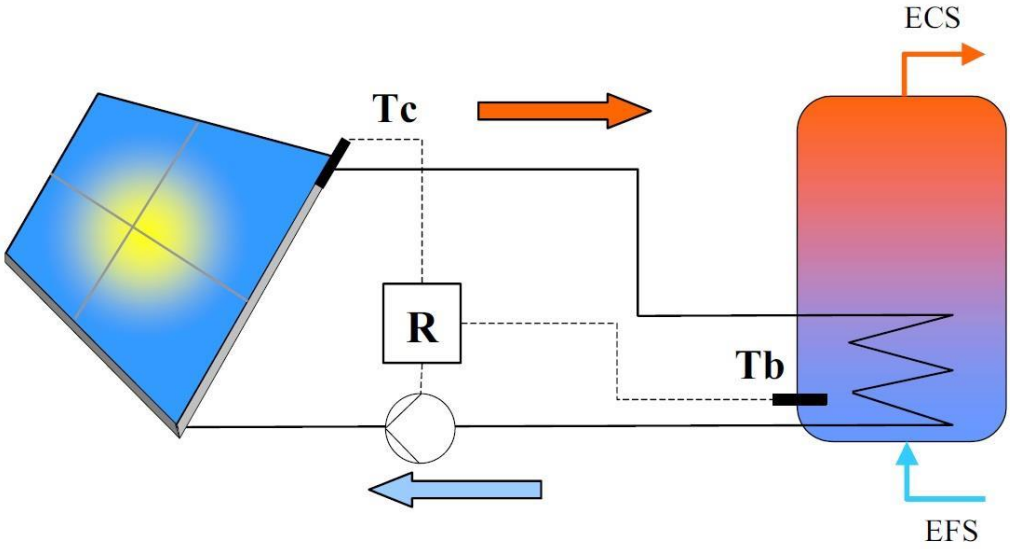


Figure 23 : Schéma simplifié d'une régulation différentielle.

5.5.3 Le circuit hydraulique (Tuyauterie)

a. Les tuyaux

La tuyauterie joue un rôle important dans le transport du fluide caloporteur entre les capteurs solaires et le ballon de stockage. Sa conception et son installation doivent être réalisées avec soin afin d'éviter les pertes de chaleur et d'assurer un fonctionnement efficace du système. Il est recommandé que le circuit hydraulique soit aussi simple que possible, avec des conduites courtes et peu de changements de diamètre. De plus, les tuyaux doivent être correctement calorifugés afin de limiter les pertes thermiques.

b. L'isolation thermique

L'isolation thermique des conduites joue un rôle important dans la réduction des pertes de chaleur entre les capteurs solaires et le ballon de stockage. Les tuyauteries utilisées dans les installations solaires sont généralement en cuivre ou en acier, et elles doivent être correctement isolées pour améliorer le rendement global du système.

L'isolant utilisé doit être capable de résister à des températures élevées, pouvant atteindre environ 150 °C à 180 °C, afin de garantir une bonne durabilité de l'installation.

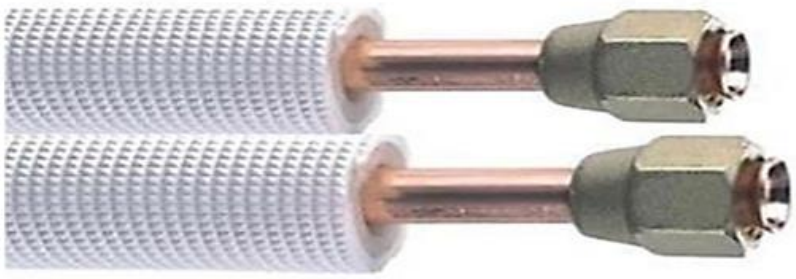


Figure 24 : Conduites de liaison isolées

5.5.4 Dispositifs de sécurité

Le circuit du fluide caloporteur comprend également plusieurs dispositifs de sécurité et de contrôle, tels que la soupape de sécurité, le vase d'expansion, le purgeur d'air et le clapet anti-retour.

a. La soupape de sécurité

La soupape de sécurité est un élément indispensable dans le circuit solaire. Elle permet d'évacuer les surpressions qui pourraient apparaître dans l'installation afin de protéger les différents composants du système. Cette soupape doit être reliée au circuit du fluide caloporteur et ne doit jamais être isolée du reste du système. En général, elle est réglée pour s'ouvrir à une pression d'environ 6 bars, bien que certains systèmes puissent être tarés à une pression plus faible, par exemple 3 bars.



Figure 25 : Une soupape de sécurité

b. **Le vase d'expansion**

Le vase d'expansion est également un élément essentiel du circuit solaire. Il permet de compenser les variations de volume du fluide caloporteur dues aux changements de température. Il est généralement installé entre les capteurs solaires et le ballon de stockage, dans la partie froide du circuit. Afin d'assurer un bon fonctionnement de l'installation, il ne doit jamais être isolé du circuit. Toutefois, la

présence d'une vanne d'isolement ouverte pendant le fonctionnement peut être utile pour faciliter les opérations de maintenance.



Figure 26 : Un vase d'expansion.

c. Le purgeur d'air

Le purgeur d'air est installé aux points les plus élevés du circuit solaire afin d'éliminer l'air présent dans l'installation. La présence d'air dans le circuit peut en effet perturber la circulation du fluide caloporteur et réduire l'efficacité du système. Dans les installations solaires, les purgeurs doivent être capables de supporter des températures élevées pouvant atteindre environ 200 °C. Dans certains cas, notamment lorsque les capteurs sont difficiles d'accès, on utilise une bouteille de purge reliée au point haut de l'installation par un tube capillaire.

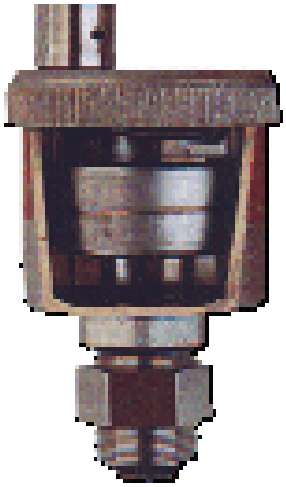


Figure 27 : Un purgeur d'air

d. Le clapet anti-retour

Dans les systèmes solaires à circulation forcée, le clapet anti-retour est utilisé pour empêcher la circulation inverse du fluide caloporteur. Il évite notamment la formation d'un thermosiphon pendant la nuit, qui pourrait provoquer un refroidissement du ballon de stockage. Il est recommandé d'utiliser des clapets de bonne qualité et de les installer en position verticale afin d'assurer un fonctionnement fiable du système.

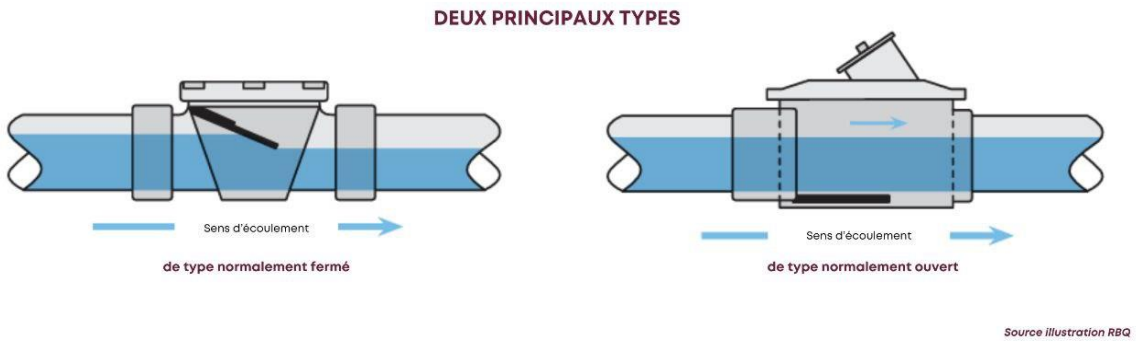


Figure 28 : Un clapet anti-retour

5.5.5. Instruments de mesure

a. Manomètre

Le manomètre est un appareil utilisé pour mesurer la pression du fluide dans le circuit primaire d'un chauffe-eau solaire. La pression est généralement exprimée en bars et doit être surveillée régulièrement afin d'assurer le bon fonctionnement du système. En pratique, cette pression ne doit pas dépasser environ 2 bars, sinon cela peut indiquer un dysfonctionnement ou un risque pour les composants de l'installation. [29]



Figure 29 : Manomètre

b. Thermomètre

Le thermomètre est un instrument de mesure utilisé pour déterminer et afficher la température dans un chauffe-eau solaire. Il permet de connaître les températures au niveau de la partie chaude ainsi que de la partie froide de l'installation. Cette information est essentielle pour surveiller le fonctionnement du système et vérifier que l'eau atteint la température souhaitée. [29]



Figure 30 : Thermomètre

c. Débitmètre

Le débitmètre est un instrument de mesure utilisé pour déterminer le débit du fluide circulant dans les capteurs solaires. Il permet de contrôler le débit de l'installation pendant son fonctionnement afin de vérifier qu'il est adéquat pour assurer un bon échange thermique. [25]



Figure 31 : Débitmètre

5.5.6 Les organes de distribution

Les organes de distribution regroupent les dispositifs qui permettent de contrôler et d'orienter la circulation de l'eau dans l'installation solaire. Parmi ces éléments, on trouve principalement la vanne d'arrêt et le mitigeur thermostatique. Ces dispositifs assurent une utilisation sûre et adaptée de l'eau chaude en fonction des besoins de l'utilisateur.

a. La vanne d'arrêt

La vanne d'arrêt est un dispositif qui permet d'isoler une partie du système en cas de maintenance ou d'intervention. Elle facilite les opérations d'entretien sans avoir besoin d'arrêter toute l'installation. [29]



Figure 32 : La vanne d'arrêt

b. Le mitigeur thermostatique

Le mitigeur thermostatique est un dispositif qui permet de mélanger l'eau chaude provenant du ballon avec l'eau froide du réseau. Il ajuste automatiquement la température de l'eau distribuée selon les besoins de l'utilisateur, garantissant ainsi confort et sécurité. [25]



Figure 33 : Le mitigeur thermostatique

6. Avantages et inconvénients des chauffe-eaux solaires

6.1. Les avantages

Le chauffe-eau solaire, c'est plein d'avantages écolos et économiques : un super choix pour les maisons qui veulent du confort sans abîmer la planète. [30]

- Écolo à fond : Il utilise le soleil, une source gratuite, propre et infinie. Ça aide à passer aux énergies renouvelables et à lâcher les combustibles fossiles.
- Moins de CO2 : Pas d'émissions polluantes ni de déchets toxiques. C'est un allié contre le réchauffement climatique et les gaz à effet de serre, pour un avenir plus vert.

- Épargne les ressources : Au lieu de cramer du gaz ou du fioul pour l'eau chaude, on mise sur le soleil et on garde le fossile pour des trucs plus essentiels.

- Couvre tous tes besoins : Parfait pour l'eau chaude quotidienne, et il peut même aider au chauffage central si t'es dans une région ensoleillée.

- Silencieux et fiable : Pas de bruit, super durable, facile à poser et entretien minimal. Idéal pour la vie de tous les jours.

- Économies inestimables : Jusqu'à 40-50% de moins sur ta facture d'énergie, et en été, on peut couper carrément la chaudière !

- Aides financières : Certains pays encouragent l'exploitation de l'énergie solaire.

- Investissement rentable : Ca se rentabilise vite avec les économies et la plus-value de la maison.

- Combo avec panneaux PV : Ajoute des panneaux photovoltaïques pour de l'eau chaude et de l'électricité : maximiser les économies !
- Entretien facile : Un petit check-up annuel (nettoyage des capteurs et circuit) et il dure 20 ans sans souci.

6.2. Les inconvénients

- Coût initial un peu élevé : Le chauffe-eau solaire coûte plus cher qu'un modèle classique, entre 3 000 et 6 000 euros. Mais l'état propose des aides financières qui couvrent une bonne partie (dans certains pays) !

- Performances limitées la nuit : Il faut un ballon super bien isolé pour que l'eau reste chaude toute la nuit.

- Besoin d'un appoint en hiver : Par temps froid ou nuageux, une chaudière d'appoint est nécessaire pour tout couvrir.

  Au final, les avantages l'emportent largement sur les inconvénients. Choisir le solaire, c'est miser sur l'environnement tout en profitant des subventions gouvernementales qui peuvent exister dans certains pays.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement des chauffe-eaux solaires ainsi que les différents types utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire. Nous avons également étudié les principaux composants de ces systèmes, tels que les capteurs solaires, le ballon de stockage, l'échangeur thermique et les éléments du circuit hydraulique. Ces données permettent de mieux comprendre le fonctionnement global d'un chauffe-eau solaire et constituent une base importante pour l'étude et le dimensionnement du système dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Dimensionnement d’un chauffe-eau solaire pour une base de vie

1. Introduction

Le dimensionnement d'un chauffe-eau solaire est une étape importante pour assurer une bonne production d'eau chaude sanitaire. L'utilisation de l'énergie solaire permet de réduire la consommation d'énergie électrique tout en profitant d'une source d'énergie gratuite et disponible, surtout dans les régions à fort ensoleillement.

Dans ce chapitre, nous réalisons le dimensionnement d'un système de chauffage d'eau sanitaire destiné à une base de vie (Gisement de Gara Djebilet), en prenant en compte les besoins en eau chaude, les conditions climatiques ainsi que les caractéristiques du système. L'objectif est de déterminer les différents éléments nécessaires pour assurer un fonctionnement correct et efficace de l'installation.

2. Gisement de Gara Djebilet

Le gisement de Gara Djebilet est considéré comme l'un des plus grands gisements de minerai de fer au monde. Il est situé au sud-ouest de l'Algérie, à environ 130 km au sud-est de la wilaya de Tindouf. Ce gisement contient d'importantes réserves estimées à plus de 3,5 milliards de tonnes de minerai de fer. Il se caractérise par une formation sédimentaire composée de minerai oolithique, répartie en trois zones principales : Ouest, Centre et Est. De plus, le gisement présente une structure subhorizontale avec une faible couverture stérile, et une épaisseur variant entre 15 et 30 mètres, ce qui facilite son exploitation à ciel ouvert. Ce projet est considéré comme stratégique pour l'Algérie, car il contribue au développement de l'industrie sidérurgique et au renforcement de l'économie nationale. [31]

3. Présentation de la base de vie

La base de vie représente un ensemble d'infrastructures destinées à assurer l'hébergement des travailleurs ainsi que des conditions de vie adéquates au sein du site. Elle comprend plusieurs équipements essentiels, tels que les espaces de logement, les installations sanitaires, les zones de restauration ainsi que les services nécessaires au bon déroulement des activités quotidiennes.

En raison de sa capacité d'accueil et de la nature des usages, la base de vie engendre une consommation importante en eau, notamment en eau chaude sanitaire utilisée pour les besoins d'hygiène et les usages domestiques.

Dans le cadre de cette étude, la base de vie considérée est dimensionnée pour une capacité de 300 personnes, ce qui implique une demande énergétique significative pour la production d'eau chaude.

Compte tenu des conditions climatiques favorables caractérisées par un fort ensoleillement, le recours à un système de chauffage d'eau basé sur l'énergie solaire constitue une solution pertinente, permettant de réduire la consommation d'énergie conventionnelle tout en assurant un fonctionnement fiable et continu.

4. Hypothèses de calcul

- Nombre de personnes : 300
- Consommation journalière par personne : $\boldsymbol{V_p}$ **=** *50 L/ jour/ personne*
- Température de l'eau froide : $\mathbf{T_{EF}}$ = 10° C
- Température de l'eau chaude sanitaire : $\mathbf{T_{EC}}$ = 55
- Température de stockage : $\mathbf{T_{ST}}$ = 60
- Capacité thermique de l'eau **:** $\mathbf{C_p}$ = 1.163 *Wh /kg.k*
- Masse volumique de l'eau **:** $\boldsymbol{\rho}$=1000 kg/m^3
- Irradiation solaire moyenne à Tindouf : $\mathbf{G_s}$= 6 kWh/m^2/jour
- Surface unitaire d'un capteur solaire : $\mathbf{S_u}$= 1 m^2
- Inclinaison des capteurs : 30°
- Orientation des capteurs : plein sud (180°)

La consommation journalière totale en eau chaude sanitaire est calculée à partir du nombre d'utilisateurs et de la consommation individuelle.

Ainsi, pour 300 personnes avec une consommation de 50 L/jour/personne, on obtient :

$$V = 300 \times 50 = \mathbf{15000\ L/jour} = \mathbf{15\ m^3/jour}$$

5. Dimensionnement du ballon de stockage

5.1. Estimation de la consommation d'eau chaude sanitaire

En se basant sur plusieurs études, la consommation d'eau chaude sanitaire est estimée à partir de la consommation totale d'eau, qui est d'environ 130 L/jour/personne, incluant l'ensemble des usages domestiques. Parmi ce volume, environ 55% correspondent à de l'eau mitigée (mélange d'eau chaude et froide). La part d'eau chaude dans cette eau mitigée est estimée à environ 60%, pour des températures de référence de 40°C à l'utilisation et 55°C à la production.

Dans cette étude, la température de l'eau froide a été fixée à 10°C. En appliquant la relation de mélange thermique, une diminution de la température de l'eau froide entraîne une augmentation de la proportion d'eau chaude nécessaire pour atteindre la même température d'utilisation, ce qui conduit à une valeur d'environ 66,7%. Par conséquent, la consommation d'eau chaude est estimée à environ 48 L/jour/personne [32]. Sur cette base, j'ai adopté une valeur de 50 L/jour/personne, afin d'introduire une marge de sécurité simple permettant d'assurer la disponibilité de l'eau chaude, notamment pendant les périodes de pointe. Par ailleurs, la température de stockage a été fixée à 60°C au lieu de 55°C, afin de compenser les pertes thermiques et de garantir une température adéquate à l'utilisation.

Dans cette partie, on détermine le volume minimal du ballon de stockage en se basant sur les données et hypothèses définies précédemment, afin de garantir la satisfaction des besoins en eau chaude sanitaire.

5.2. Expression du volume du ballon

$$V_{ST,\ min} = \frac{2 \times V_P \times P \times (T_{EC} - T_{EF})}{(T_{ST} - T_{EF})}$$

Définition des paramètres :

$\mathbf{V_{ST,\ min}}$: Volume minimal du ballon de stockage en Litres.

2 : Coefficient de sécurité pour garantir la couverture des besoins.

$\boldsymbol{V_P}$: Volume de consommation personne/jour en Litres.

P : Nombre de personnes.

$\boldsymbol{T_{EF}}$: Température de l'eau froide en °C.

$\boldsymbol{T_{EC}}$: Température souhaitée de l'eau chaude sanitaire en °C.

$\boldsymbol{T_{ST}}$: Température de stockage de l'eau dans le ballon en °C.

.**Application numérique :**

$$V_{ST,\ min} = \frac{2 \times 50 \times 300 \times (55 - 10)}{(60 - 10)} = \mathbf{27000\ Litres}$$

Interprétation :

Le volume du ballon de stockage nécessaire pour couvrir les besoins en eau chaude sanitaire de la base de vie est estimé à **27000 litres**.

Ce volume permet d'assurer une alimentation suffisante en eau chaude pour les 300 utilisateurs, tout en intégrant un facteur de sécurité garantissant la continuité du service.

6. Dimensionnement des capteurs solaires

6.1. Analyse des capteurs solaires thermiques utilisés pour le chauffage de l'eau

Les études montrent que le capteur solaire plan vitré peut fournir des températures dans le domaine thermique moyen, pouvant atteindre environ 177°C dans des conditions de fort rayonnement solaire et en absence de circulation du fluide (situation de stagnation). Cette valeur est suffisante pour les applications de chauffage de l'eau. En revanche, les capteurs à tubes sous vide peuvent atteindre des températures très élevées allant jusqu'à 350°C dans les mêmes conditions, ce qui nécessite l'utilisation de systèmes de contrôle et de protection supplémentaires afin d'assurer la sécurité du fonctionnement. Ainsi, le capteur plan vitré représente un bon compromis, car il permet d'obtenir une chaleur suffisante tout en limitant la complexité liée aux températures élevées, ce qui le rend plus stable et plus simple à exploiter.

Dans ce contexte, ce type de capteur est bien adapté à une région comme Tindouf, caractérisée par un fort ensoleillement et des conditions climatiques favorables. Cela permet d'améliorer ses performances et d'atteindre facilement les températures nécessaires pour le

chauffage de l'eau, sans recourir à des solutions plus complexes ou coûteuses. Par conséquent, le choix du capteur plan vitré apparaît pertinent du point de vue technique et économique. [33]

6.2. Calcul de l'énergie calorifique journalière

$$E_j = V_b \times C_P \times (T_{ST} - T_{EF})$$

Définition des paramètres :

E_j : Energie calorifique journalière nécessaire en KWh/j.

V_b : Volume du ballon de stockage.

C_P : Capacité thermique de l'eau.

T_{EF} : Température de l'eau froide en °C.

T_{ST} : Température de stockage de l'eau dans le ballon en °C.

Application numérique :

Le calcul de l'énergie calorifique journalière nécessaire donne :

$E_j = 27000 \times 1.163 \times (60 - 10)$ = **1570050 Wh/jour = 1570.05 kWh /jour**

6.3. Calcul de la surface totale du panneau de captage

$$S_{\{tot\}} = \frac{E_j}{G_s}$$

Définition des paramètres :

S_{tot}: Surface totale du panneau solaire en m².

***E_j* :** Energie calorifique journalière nécessaire en KWh/j.

***G_s* :** Énergie du rayonnement solaire en kWh/m².

Application numérique :

$$S_{\{tot\}} = \frac{1570.05}{6} = 261.657 \text{ m}^2 \cong 262 \text{ m}^2$$

6.4. Calcul du nombre de capteurs nécessaires

$$N_C = \frac{S_{tot}}{S_u}$$

Définition des paramètres :

N_C : Nombre de capteurs du panneau solaire.

S_{tot} : Surface totale du panneau en m2.

S_u : Surface unitaire du capteur solaire en m².

Application numérique :

$$N_C = \frac{262}{1} = 262 \text{ capteurs solaires (de 1 m}^2 \text{ chacun)}$$

Choix du degré d'orientation des capteurs :

En général, on oriente les capteurs en plein sud (pour l'hémisphère nord) ce qui correspond à un degré d'orientation de 180° pour notre application**.**

Choix du degré d'inclinaison des capteurs :

L'inclinaison des capteurs dépend essentiellement de deux paramètres :

1. La latitude,
2. La saisonnalité des besoins.

Pour notre application nous l'avons fixé à 30°, valeur estimée moyenne donnant un maximum de rayonnement solaire par année.

7. Dimensionnement de la tuyauterie

Le dimensionnement de la tuyauterie consiste à déterminer les longueurs et les caractéristiques du réseau reliant les capteurs solaires au ballon de stockage, afin d'assurer une circulation efficace du fluide caloporteur avec un minimum de pertes de charge**.**

Longueur totale entre capteur solaire et ballon [m] = Longueur X Nombre**.**

Emplacement	**Longueur (m)**	**Nombre**
Entre le capteur solaire et le ballon de stockage	30	2
Longueur totale	60	

Tableau 3: : Résultats du dimensionnement de la tuyauterie.

8. Dimensionnement de l'échangeur thermique



Figure 34 : Exemple d'un échangeur thermique dans un ballon de 1000L.

Le dimensionnement de l'échangeur thermique vise à assurer un transfert efficace de chaleur entre le fluide caloporteur et l'eau du ballon de stockage, afin d'atteindre la température souhaitée dans un temps donné.

$$\boldsymbol{P = \frac{E_j}{\Delta t}}$$

Définition des paramètres :

$\boldsymbol{E_j}$ **:** Energie calorifique journalière.

$\boldsymbol{\Delta t}$ **:** Le temps de montée en température (en nombre d'heures). En général, il est souhaitable que la montée en température de l'eau dans le réservoir ait lieu en quelques heures.

Le temps de chauffage est fixé à 6 heures, correspondant à la durée moyenne d'ensoleillement efficace dans la région de Tindouf.

$$P = \frac{1570050}{6} = \mathbf{261675\ W = 261.675\ kW}$$

La conduction thermique :

Le transfert de chaleur à travers l'échangeur thermique peut être exprimé par la relation suivante :

$$uA = \frac{P}{\Delta T} = \frac{261675}{50} = \mathbf{5233.5\ W/K}$$

Cette valeur représente le produit du coefficient global d'échange thermique par la surface d'échange, caractérisant ainsi la capacité de l'échangeur à transférer la chaleur.

9. Dimensionnement de l'appoint électrique

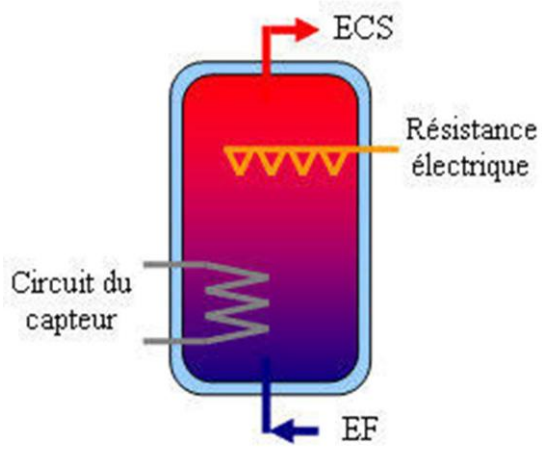


Figure 35 : Appoint électrique (Résistance).

La puissance de l'appoint électrique est déterminée en fonction de l'énergie journalière nécessaire et de l'apport solaire disponible.

Elle peut être exprimée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{P_R = \frac{E_j - G_{smin} \times S_{tot}}{\Delta t}}$$

Définition des paramètres :

$\boldsymbol{P_R}$: La puissance de la résistance électrique (en W)

$\boldsymbol{E_j}$ **:** Énergie journalière en Wh/jour

$\boldsymbol{G_{smin}}$ **:** Énergie de rayonnement solaire minimale par m² par jour (Wh/m²/jour)

$\boldsymbol{S_{tot}}$ **:** Surface de captage en m²

$\boldsymbol{\Delta t}$: Temps moyen de montée en température par la résistance (en heures)

$$P_R = \frac{1570050 - 3666.66 \times 262}{3} = \mathbf{203128\ W = 203.128\ kW}$$

La puissance obtenue permet d'assurer le chauffage de l'eau en tenant compte de l'énergie solaire disponible et du temps de montée en température.

10. Récapitulatif des résultats de dimensionnement

Caractéristiques	**Valeurs**
Localisation de l'installation	Gara Djebilet
Type d'exploitation	Base de vie (Camping permanent)
Nombre de personnes	300
Consommation journalière par personne	50 L/jour
Consommation journalière totale	15000 L/jour
Température de l'eau froide	10°
Température souhaitée de l'eau chaude	55°
Température de stockage de l'eau chaude	60°
Volume du ballon de stockage	27000 L
Énergie calorifique journalière	1570.05 kWh/jour
Irradiation solaire moyenne	6 kWh/m²/jour
Surface totale des capteurs	262 m²
Nombre de capteurs solaires	262 capteurs
Surface unitaire d'un capteur	1 m²
Orientation des capteurs	Plein sud (180°)
Inclinaison des capteurs	30°
Longueur totale de la tuyauterie	60 m
Puissance de l'échangeur thermique	261.675 kW
Conduction thermique de l'échangeur	5233.5 W/K
Puissance de l'appoint électrique	203.128 kW

Tableau 4: Récapitulatif des résultats de dimensionnement.

11. Conclusion

Les résultats obtenus à partir des calculs de dimensionnement ont permis de définir les principales caractéristiques du système de chauffe-eau solaire destiné à une base de vie. Les différents paramètres déterminés concernent notamment le volume du ballon de stockage, la surface des capteurs solaires, ainsi que les puissances de l'échangeur thermique et du système d'appoint. Ces résultats constituent une base importante pour la suite de l'étude, notamment pour l'étape de simulation qui permettra d'analyser et de vérifier le comportement global du système dans les conditions réelles de fonctionnement.

Chapitre IV :

Analyse et Simulation du chauffe-eau solaire proposé

1. Introduction

La production d'eau chaude sanitaire (ECS) par les systèmes solaires thermiques nécessite une estimation précise des besoins énergétiques ainsi qu'un choix approprié des paramètres techniques, notamment l'emplacement géographique, l'orientation et l'inclinaison des capteurs, ainsi que la surface disponible pour l'installation. Dans ce contexte, la simulation thermodynamique constitue un outil efficace pour étudier les performances d'un système solaire dans des conditions proches de son fonctionnement réel, tout en réduisant le temps et les coûts liés aux essais expérimentaux. Grâce aux capacités de calcul des ordinateurs, il est possible de simuler le comportement de l'installation sur de longues périodes afin d'obtenir des résultats fiables et représentatifs.

Dans ce chapitre, nous allons exploiter le logiciel de conception et de simulation solaire T*SOL afin de valider le dimensionnement de notre installation de chauffage d'eau sanitaire réalisé dans le chapitre précédent et d'évaluer ses performances thermiques. Le choix de ce logiciel repose sur sa facilité d'utilisation, ses nombreuses fonctionnalités et son efficacité dans l'analyse des systèmes solaires.

2. Présentation du logiciel T*SOL

2.1. Description

Le logiciel de simulation solaire T*SOL est utilisé pour calculer les performances des systèmes solaires thermiques. Il permet de simuler différents systèmes destinés au chauffage de l'eau chaude sanitaire, au chauffage d'appoint, aux piscines ainsi qu'à certaines applications industrielles. Ce logiciel aide également au dimensionnement des réservoirs de stockage et des capteurs afin d'obtenir une configuration adaptée.

T*SOL contient une base de données comprenant plusieurs types de capteurs solaires, de générateurs de chaleur et de réservoirs de stockage, ce qui facilite le choix des composants du système étudié. Il permet aussi de modifier certains paramètres, comme la surface des capteurs et le volume de stockage, afin de trouver une combinaison convenable pour le système.

Après la simulation, le logiciel fournit des résultats détaillés sous forme de graphiques et de données permettant d'évaluer les performances du système, comme les températures, les énergies produites et le rendement solaire. Il propose également plusieurs systèmes préconfigurés pouvant être adaptés selon les besoins de l'installation.

2.2. Interface du logiciel T*SOL

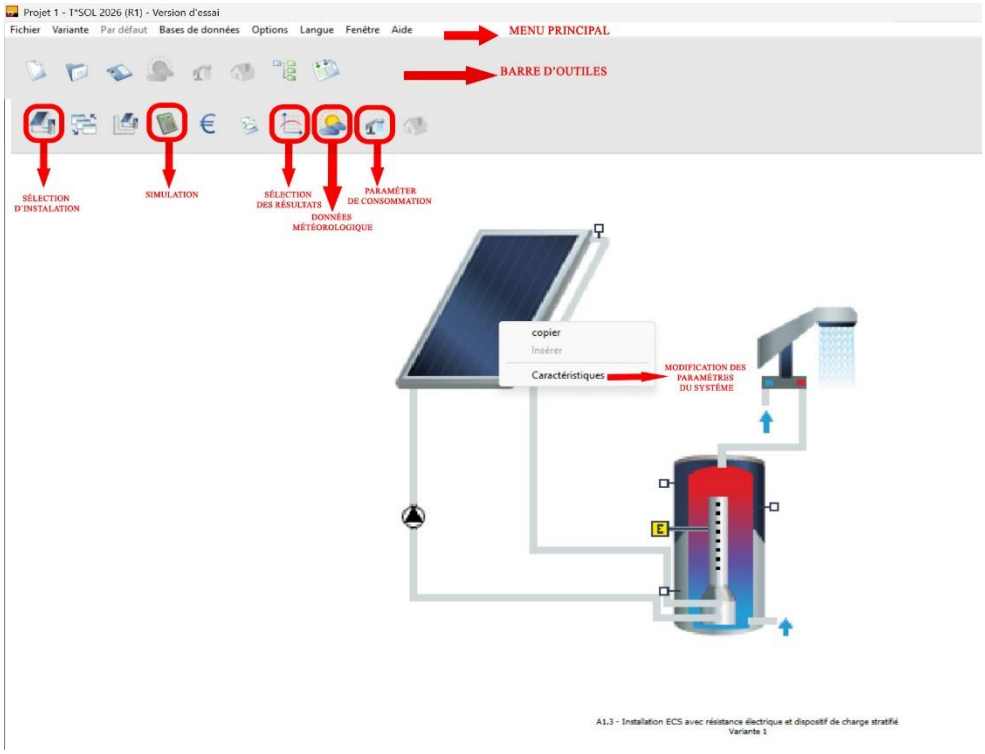


Figure 36 : Interface du logiciel T*SOL.

Le logiciel T*SOL possède une interface simple permettant d'accéder aux différentes fonctions nécessaires à la simulation du système solaire thermique. Comme illustré dans la figure précédente, le menu principal et la barre d'outils donnent accès aux différentes options du logiciel.

L'utilisateur peut sélectionner le type d'installation à étudier, choisir l'emplacement du projet à travers les données météorologiques, introduire les paramètres de consommation et lancer la simulation. Le logiciel permet également d'afficher les résultats de simulation afin d'analyser les performances du système. De plus, il est possible de modifier les paramètres du système à partir de l'option « Caractéristiques », selon les besoins de l'étude.

2.3. Avantages du logiciel

Le logiciel permet de simuler différents systèmes solaires thermiques et d'adapter les paramètres selon les besoins de l'étude. Il contient une base de données comprenant plusieurs composants, tels que les capteurs solaires, les réservoirs de stockage et les générateurs de chaleur, ce qui facilite le choix des éléments du système.

Il permet aussi d'obtenir des résultats détaillés sous forme de courbes et de données, facilitant ainsi l'analyse du comportement du système étudié. De plus, plusieurs paramètres peuvent être modifiés afin d'évaluer différentes configurations et choisir la solution la plus adaptée.

3. Sélection de notre modèle d'installation ECS solaire

Nous avons choisi ce système solaire thermique car il est adapté à la production collective d'eau chaude sanitaire et permet d'assurer un taux de couverture élevé tout en réduisant la consommation d'énergie électrique. Le système se compose principalement de capteurs solaires plans, d'un ballon de stockage équipé d'un échangeur thermique et d'un dispositif de charge stratifiée, ainsi que d'une résistance électrique d'appoint afin d'assurer la continuité de production d'eau chaude sanitaire pendant les périodes de faible ensoleillement ou de forte consommation.

Le dispositif de charge stratifiée repose sur un tube comportant plusieurs ouvertures réparties à l'intérieur du ballon, permettant de diriger l'eau chaude vers la couche correspondant à sa température. Cela permet de conserver une bonne stratification thermique à l'intérieur du ballon et de limiter le mélange entre l'eau chaude et l'eau froide, ce qui améliore le rendement du système et l'efficacité du stockage thermique.

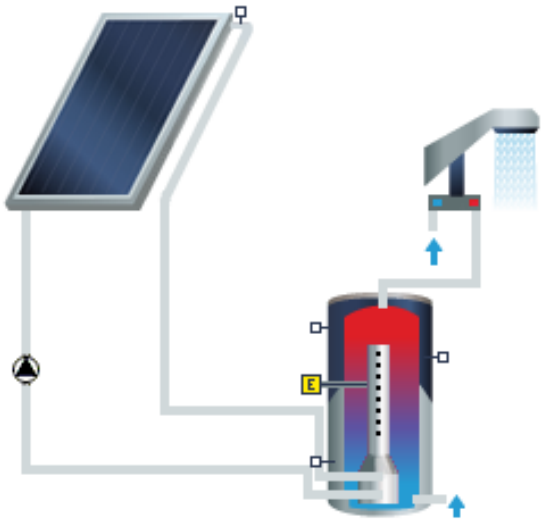


Figure 37 : Installation ECS avec résistance électrique et dispositif de charge stratifiée.

3.1 Météo

Pour la simulation du système solaire thermique à l'aide du logiciel T*SOL, la région de Tindouf a été choisie comme zone météorologique de référence. Cette région du sud de l'Algérie présente un important potentiel solaire, caractérisée par un fort rayonnement solaire et un grand nombre d'heures d'ensoleillement durant toute l'année. Les données météorologiques intégrées dans le logiciel, telles que l'irradiation solaire et la température extérieure, permettent d'évaluer avec précision les performances du système solaire thermique dans les conditions climatiques réelles de la région étudiée. Ces données permettent également de déterminer la valeur du rayonnement solaire minimal G_{smin}, qui constitue un paramètre important pour l'étude du rendement du système et l'évaluation de sa capacité à satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire durant les différentes périodes de l'année.

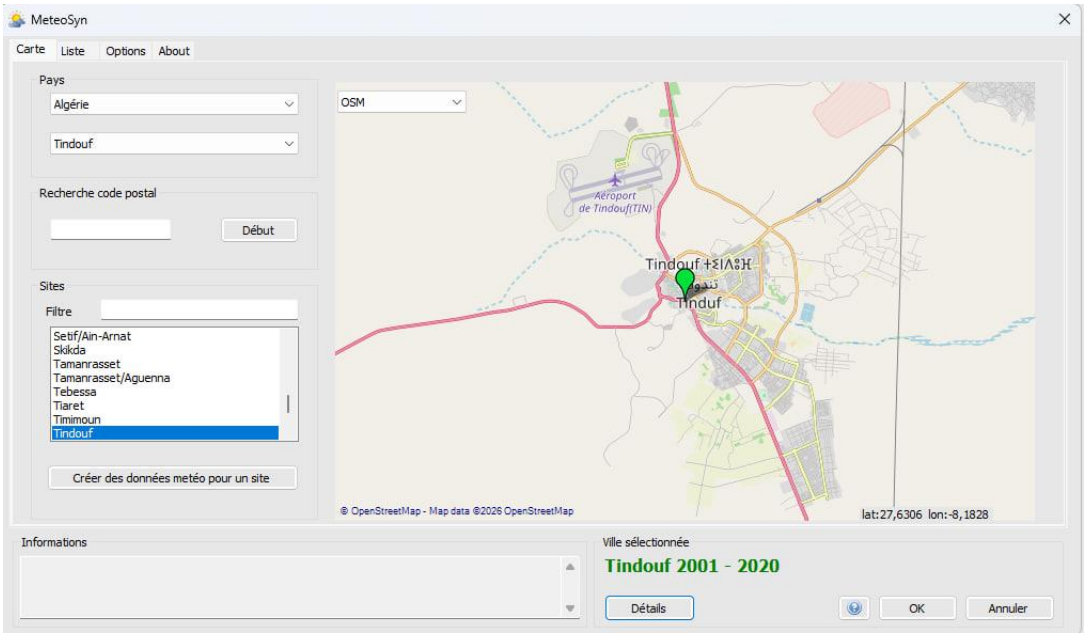


Figure 38 : Choix de la localisation du projet (Tindouf)

4. Paramétrage des composants de notre installation

4.1. Consommation ECS

Le tableau 5 suivant présente les paramètres de consommation d'eau chaude sanitaire considérés dans cette étude.

Valeurs	Par défaut ECS
Consommation journalière	15000 L
Température souhaitée	55 °C
Température de l'eau froide en Février	8
Température de l'eau froide en Août	12

Tableau 5: Les déférents paramètres de consommation ECS.

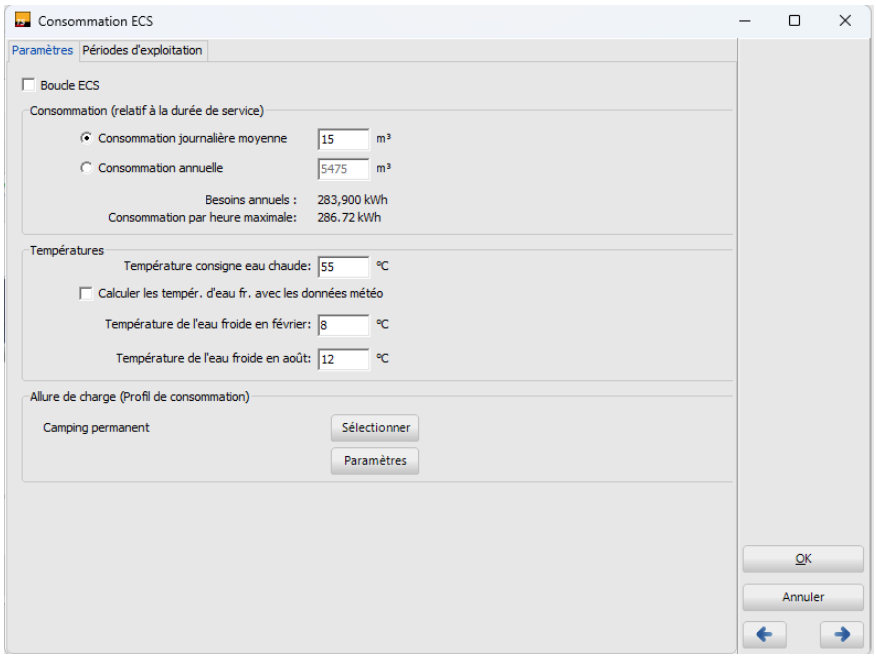


Figure 39 : Entrée des paramètres de consommation d'ECS.

4.2. Ballon d'eau chaude

Dans le tableau 6 suivant, nous décrivons les différents paramètres utilisés en ce qui concerne le ballon d'eau chaude.

Type	Ballon ECS bivalent
Fabricant	Standard
Volume	27000 L (27 m³)
Hauteur	1,8 du diamètre
Épaisseur de l'isolation	100 mm
Conduction thermique	0,065 W/(m.K)
Conduction thermique de l'échangeur	5233.5 w/k

Tableau 6: Paramètres utilisés dans le ballon d'ECS.

.

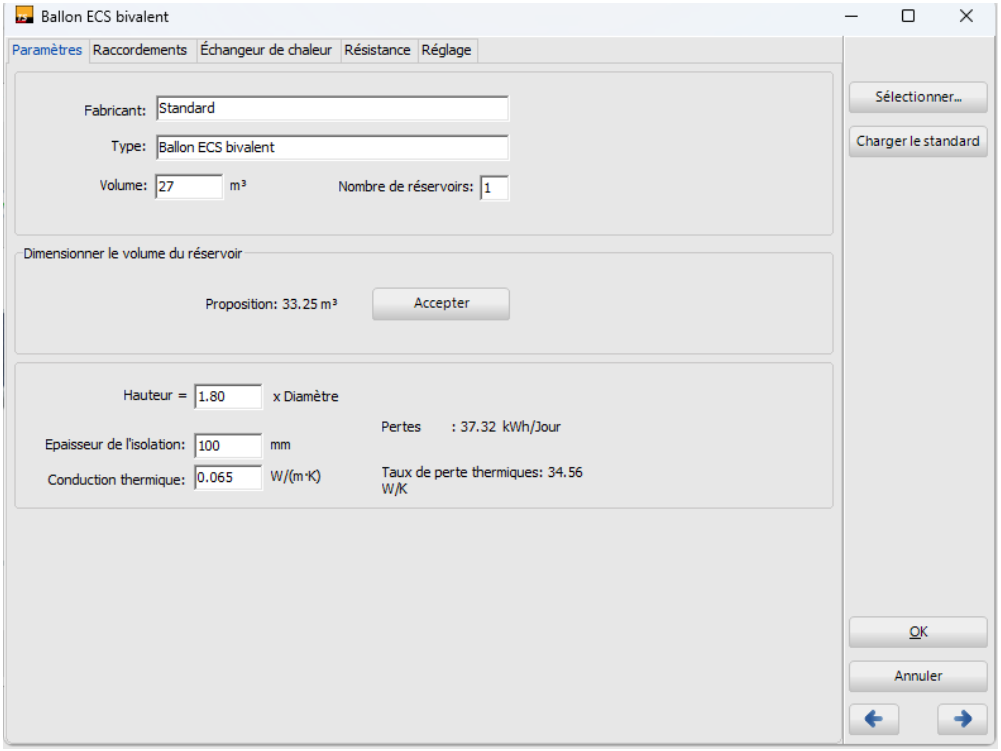


Figure 40 : Dimensionnement du volume du ballon d'ECS.

4.3. Capteur solaire

Le tableau 7 suivant présente les principales caractéristiques techniques du capteur solaire utilisées dans la simulation sous le logiciel T*SOL.

Type de capteur	Capteur plan
Produit	Capteur plan standard
Surface brute de capteur	1 m²
Longueur	1 m
Largeur	1 m
Facteur de conversion	78%
Nombre de capteurs	262
Surface totale brute	262 m²
Inclinaison d'installation	30°
Orientation	180.0 °
Irradiation sur la surface du capteur	2355.1 kWh
Capacité thermique spécifique	6000 J/(m².K)

Tableau 7: Caractéristiques techniques de notre capteur solaire.

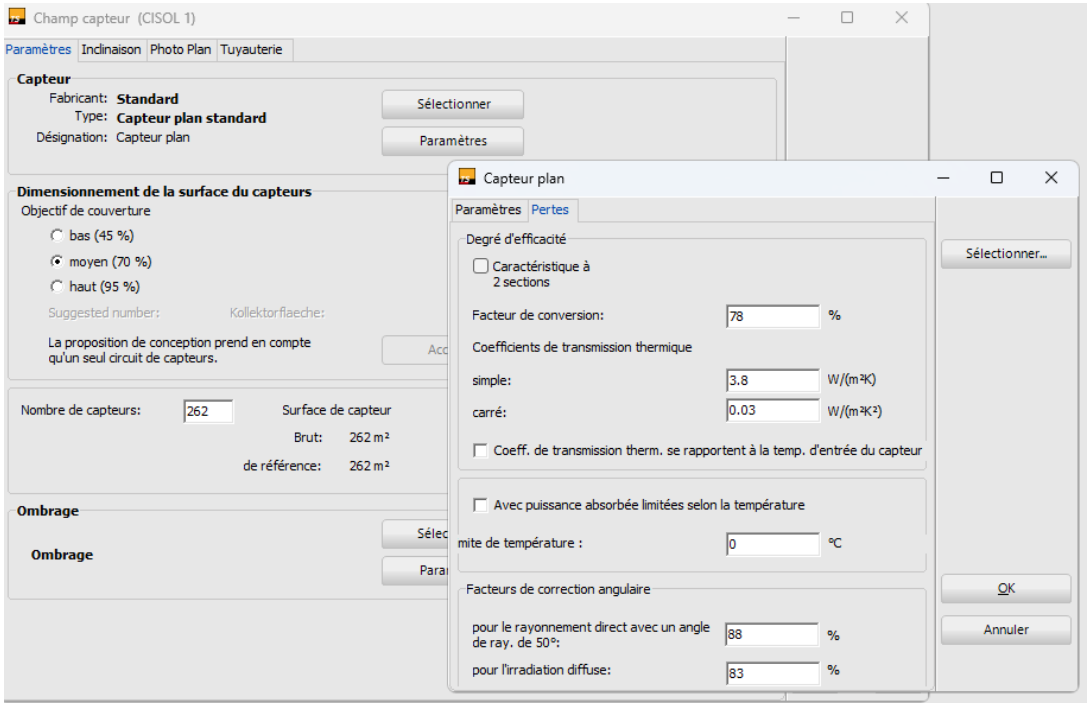


Figure 41 : Caractéristiques techniques de notre capteur solaire (TSOL).

Le tableau 8 suivant présente les caractéristiques de la tuyauterie du circuit solaire utilisée dans la simulation.

Longueur simple des tubes	
A l'intérieur	25 m
A l'extérieur	5 m
Entre les capteurs	200 mm/Capteur
Conductibilité thermique de l'isolation	
A l'intérieur	0.045 W/(m.K)
A l'extérieur	0.045 W/(m.K)
Entre les capteurs	0.045 W/(m.K)
Diamètre nominal des tubes	
Intérieur et extérieur	40 mm
Entre les capteurs	15 mm
Épaisseur d'isolation	
Intérieur	30 mm
Extérieur	30 mm
Entre les capteurs	30 mm

Tableau 8: Caractéristiques de la tuyauterie.

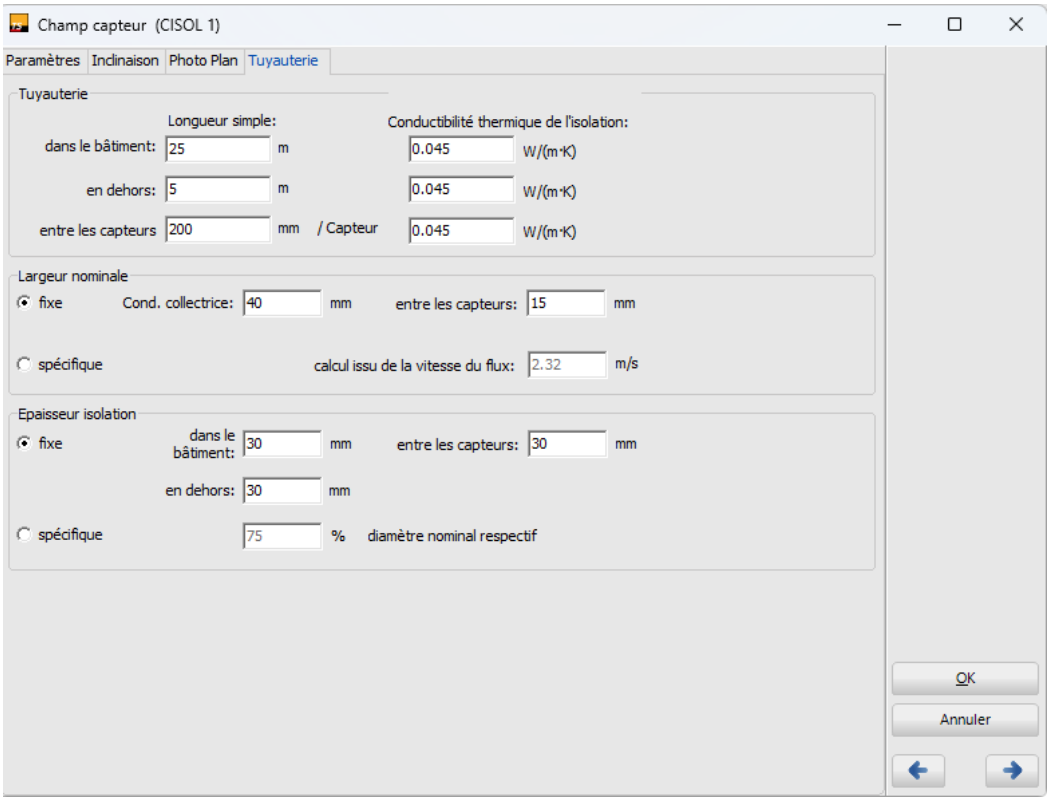


Figure 42 : Entrée des caractéristiques de la tuyauterie.

4.5. Echangeur thermique

Le tableau 9 suivant présente les paramètres de l'échangeur de chaleur et du dispositif de charge stratifiée utilisés dans le ballon de stockage.

Type d'échangeur thermique	Fixe
Coefficient d'échange thermique	5400 W/K
Hauteur de la lance	80 %

Tableau 9: Caractéristiques de l'échangeur thermique.

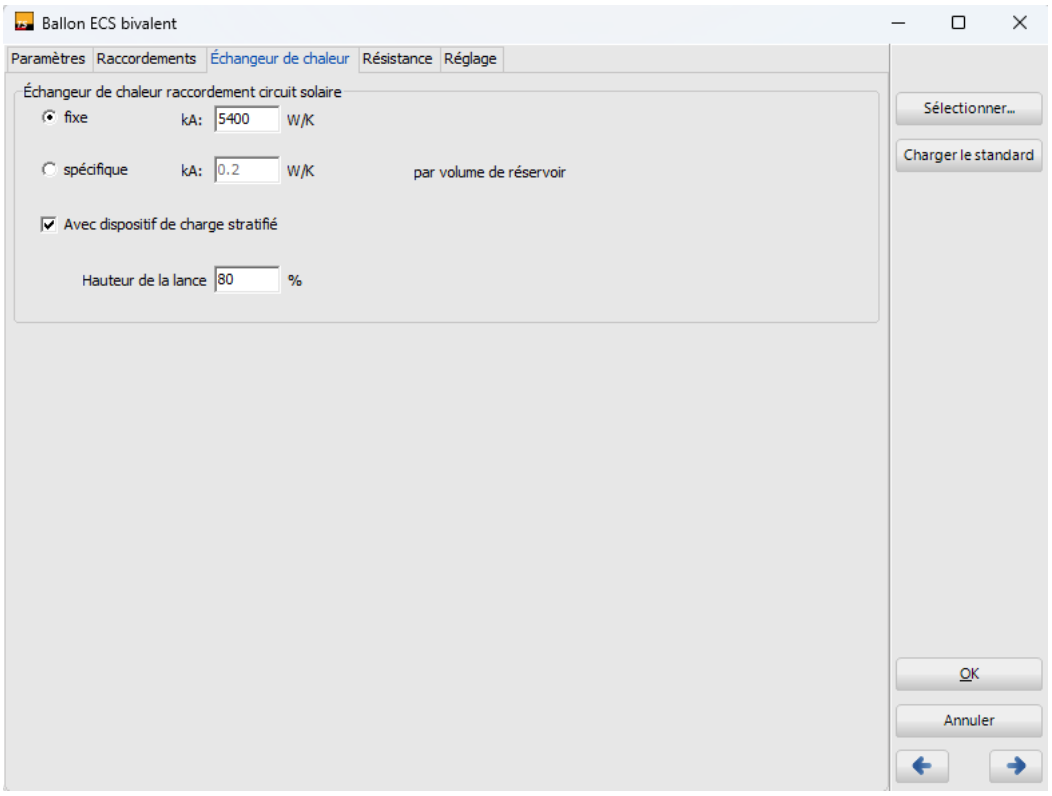


Figure 43 : Entrée des caractéristiques de l'échangeur thermique.

4.6. Circuit solaire

Le tableau 10 suivant regroupe les principaux paramètres du circuit solaire introduits dans le logiciel T*SOL pour la simulation du système.

Débit volumique	**40** L/h (par m² de capteur)
Fluide caloporteur	Eau avec 40% de polypropylenglycol
Capacité thermique spécifique résultante	3588 j/ (kg *K)
Type de tubes	Cuivre

Tableau 10: Paramètres utilisés dans le circuit solaire.

4.7. L'appoint électrique

Le tableau 11 suivant présente les paramètres de la résistance électrique d'appoint utilisés dans le ballon de stockage.

Type de puissance	Absolue
Puissance électrique	203.13 kW
Hauteur d'installation	60%
Période d'exploitation	365 jours/an

Tableau 11: Caractéristiques de l'appoint électrique.

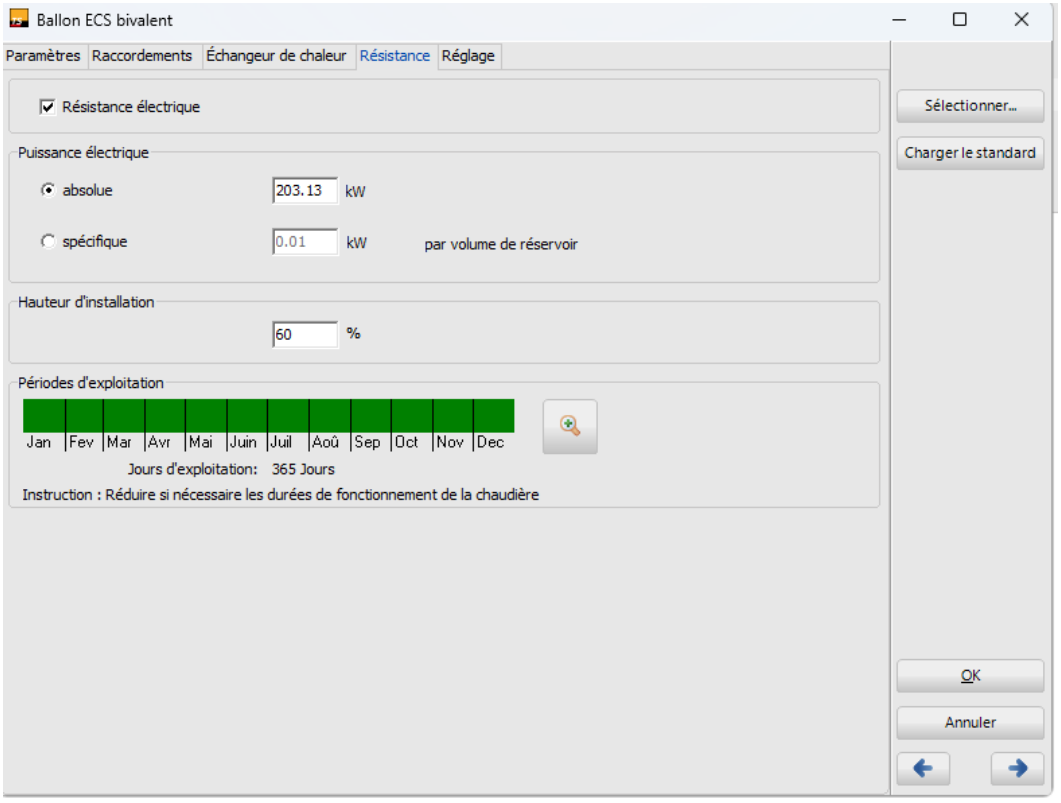


Figure 44 : Entrée des caractéristiques de l'appoint électrique.

5. Résultats et Analyse

5.1. Résultats « installation ECS avec résistance électrique »

♦ Taux de couverture en eau chaude sanitaire :

La figure suivante illustre l'évolution du taux de couverture solaire des besoins en eau chaude sanitaire durant les différents mois de l'année.

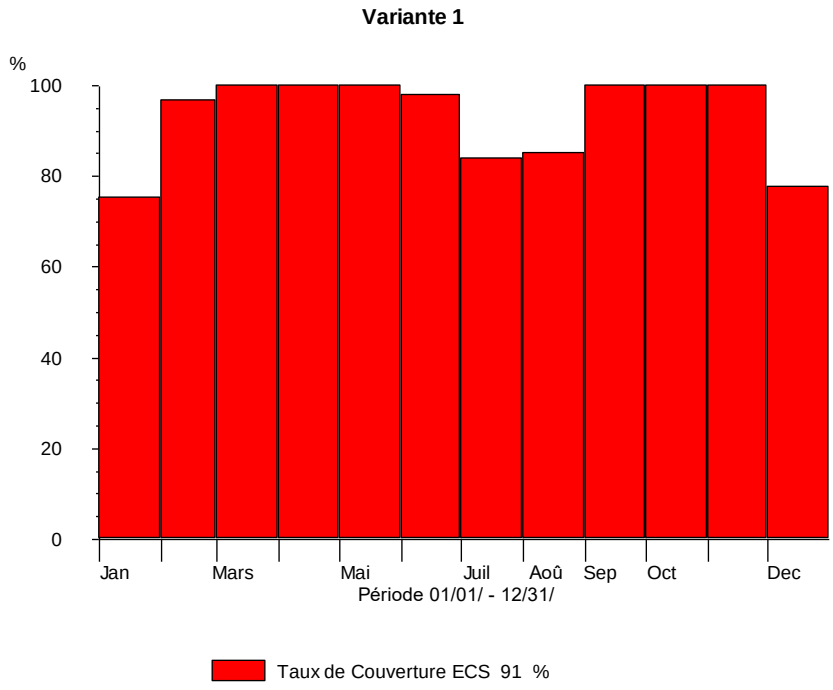


Figure 45 : Taux de couverture en eau chaude sanitaire.

Analyse :

- Le taux de couverture solaire reste élevé tout au long de l'année, dépassant 90% durant la plupart des mois.
- Il atteint son maximum de 100% en mars, avril, mai, septembre et octobre, périodes durant lesquelles le rayonnement solaire est en parfait équilibre avec la consommation.
- Il descend à environ 75% en janvier et décembre en raison de la baisse du rayonnement solaire en hiver.
- Une légère baisse est également enregistrée en juillet et août (environ 83%) due à l'augmentation de la consommation estivale.

Résultat :

Le taux de couverture solaire annuel atteint 91%, dépassant l'objectif initial fixé à 70%, ce qui confirme l'efficacité du dimensionnement retenu et l'adéquation du site de Tindouf à l'exploitation de l'énergie solaire.

♦ Rendement du système :

Ce graphique montre le rendement du système durant l'année.

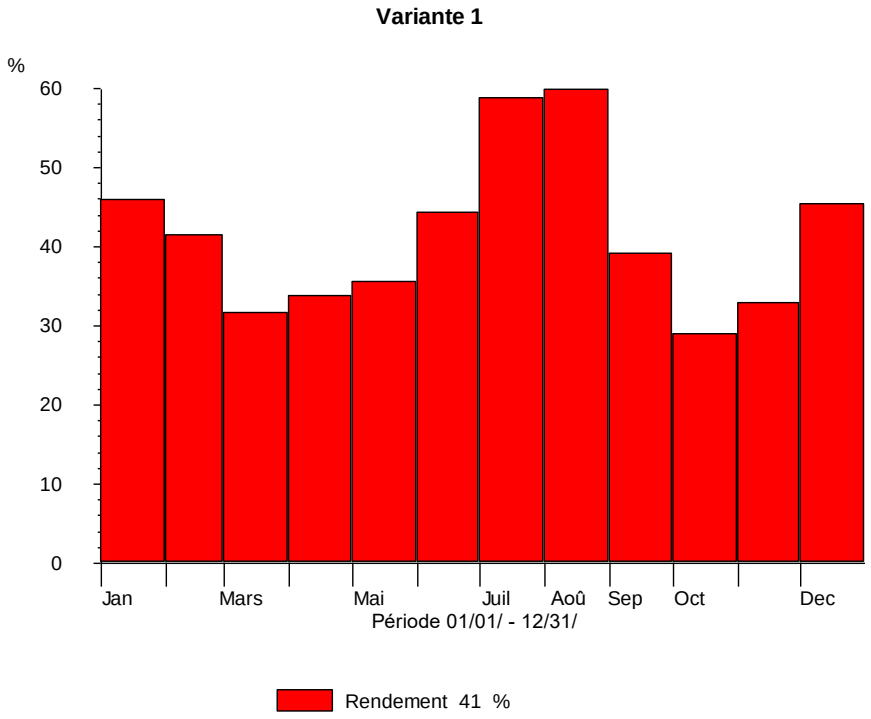


Figure 46 : Rendement du système.

Analyse :

- Le rendement du système oscille entre 30% et 60% au cours de l'année.
- Il atteint son maximum en juillet et août (environ 59-60%) en raison de la forte consommation qui maintient le fluide relativement froid dans les capteurs, réduisant ainsi les pertes thermiques.
- Il descend à ses valeurs minimales au printemps et en automne (environ 30-33%), lorsque la demande diminue, entraînant une hausse de la température du fluide et des pertes thermiques accrues.

Résultat :

Le rendement global annuel de 41 % confirme le bon fonctionnement du système solaire thermique et valide les choix techniques retenus lors du dimensionnement et de la simulation.

5.2. Résultats « Météo »

♦ Température extérieure :

Ce graphique présente la température extérieure selon les mois de l'année

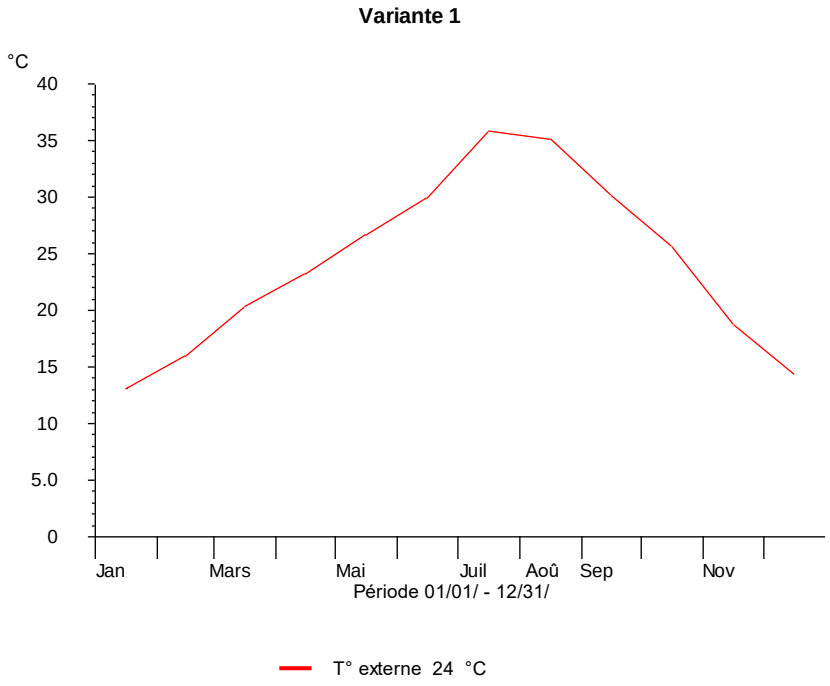


Figure 47 : L'évolution de la température extérieure en fonction du mois.

Analyse :

- La température part d'environ 13°C en janvier et augmente progressivement au printemps.
- Elle atteint son pic en juillet-août avec environ 35°C à 36°C, puis diminue progressivement en automne.
- Aucune température négative n'est enregistrée durant les mois de l'année.
- Les performances du système solaire sont influencées par cette évolution saisonnière, la production solaire étant directement liée aux conditions thermiques extérieures.

Résultat :

Cette courbe reflète le climat chaud et aride de la région de Tindouf. L'absence de gel élimine tout risque de congélation du fluide dans les capteurs, ce qui simplifie la conception et garantit un fonctionnement continu du système sans interruption tout au long de l'année.

♦ Rayonnement solaire global horizontal :

Ce graphique présente le rayonnement solaire global horizontal durant l'année.

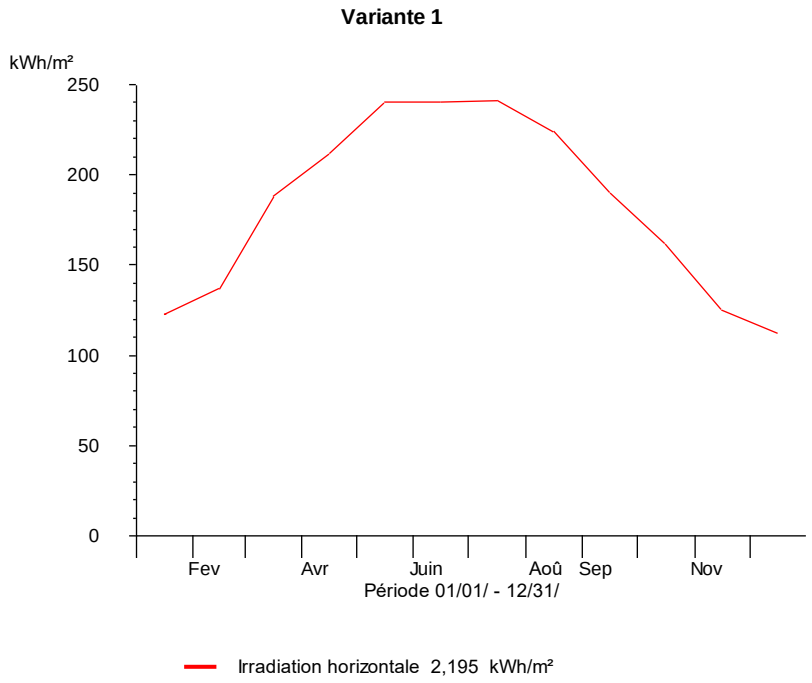


Figure 48 : La variation du rayonnement solaire global horizontal

Analyse :

- La courbe prend la forme d'une cloche régulière avec une montée progressive de janvier jusqu'en juin-juillet.
- La valeur maximale est enregistrée en juin-juillet avec environ 240 kWh/m²/mois, et la valeur minimale en décembre avec environ 110 kWh/m²/mois.
- Il est à noter qu'aucun mois n'enregistre une valeur très faible, ce qui garantit une production solaire continue tout au long de l'année.

Résultat :

L'irradiation annuelle totale atteint 2195 kWh/m², un chiffre exceptionnel qui classe Tindouf parmi les régions les plus ensoleillées au monde. À titre de comparaison, ce chiffre ne dépasse pas 1100 kWh/m²/an en Europe centrale. Cela justifie pleinement le recours à l'énergie solaire comme source principale de chauffage de l'eau dans la base de vie

.

5.3. Résultats « Consommation ECS »

♦ Températures eau chaude sanitaire et eau froide :

Ce graphique montre les températures de l'eau chaude sanitaire et de l'eau froide.

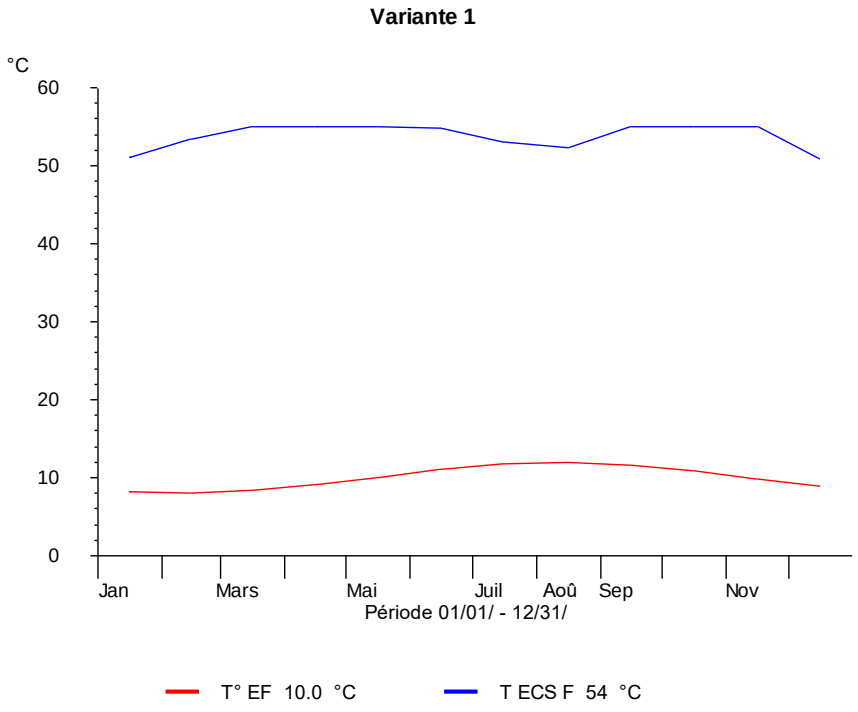


Figure 49 : Températures eau chaude sanitaire et températures eau froide.

Analyse :

- Cette figure regroupe deux courbes : la bleue (eau chaude) et la rouge (eau froide). - La courbe bleue se caractérise par une remarquable stabilité tout au long de l'année, oscillant entre 51°C et 55°C, restant donc toujours proche de la valeur cible de 55°C.
- La courbe rouge reflète la variation saisonnière de la température de l'eau froide, entre 8°C en février et 12°C en août
- Malgré cette variation saisonnière de l'eau froide, elle n'affecte pas la stabilité de la température de l'eau chaude en sortie.

Résultat :

Cette courbe démontre que le système maintient en permanence une température stable de l'eau chaude proche de l'objectif fixé tout au long de l'année, ce qui garantit le confort des utilisateurs indépendamment des variations climatiques saisonnières.

♦ Besoins énergétiques pour le réchauffement d'eau sanitaire :

Ce graphique présente les besoins énergétiques pour le réchauffement de l'eau chaude sanitaire.

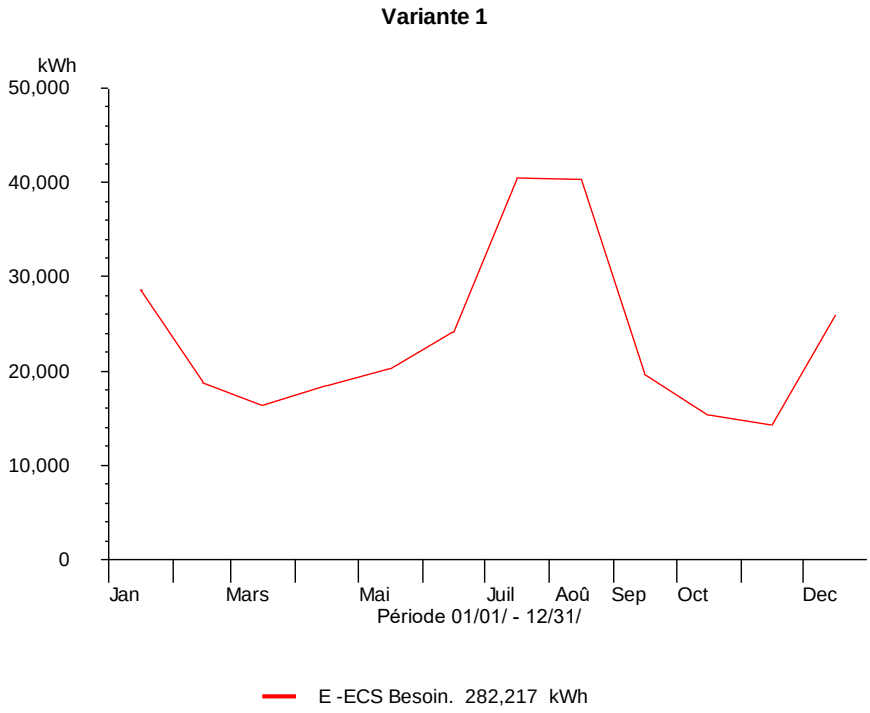


Figure 50 : Besoins énergétiques pour le réchauffement d'eau sanitaire.

- Les besoins énergétiques présentent une variation saisonnière marquée au cours de l'année.
- Ils diminuent durant la période allant de la fin de l'hiver au début du printemps pour atteindre leurs valeurs minimales.
- Ils augmentent progressivement au printemps pour culminer en juillet-août (environ 40 000 kWh/mois) en raison de la hausse de la consommation estivale.
- Ils diminuent progressivement en automne, puis remontent légèrement en décembre.

Résultat :

Le besoin énergétique annuel obtenu à l'issue de la simulation est de 282 217 kWh (Figure 50). Cette valeur est très proche du besoin annuel calculé automatiquement par le logiciel T*SOL à partir des données de consommation introduites (15 m³/jour), soit 283 900 kWh (Tableau 5). L'écart entre ces deux valeurs, inférieur à 1% (environ 1 683 kWh), s'explique par le fait que la première représente le résultat global de la simulation dynamique tenant compte des conditions climatiques réelles tout au long de l'année, tandis que la seconde correspond à une estimation théorique basée directement sur la consommation journalière moyenne introduite. Cette concordance confirme la cohérence et la fiabilité des paramètres de consommation retenus pour la simulation.

5.4. Résultats « Circuit capteurs »

♦ **Température en sortie du circuit capteurs :**

Ce graphique montre la température en sortie du circuit capteurs pendant l'année.

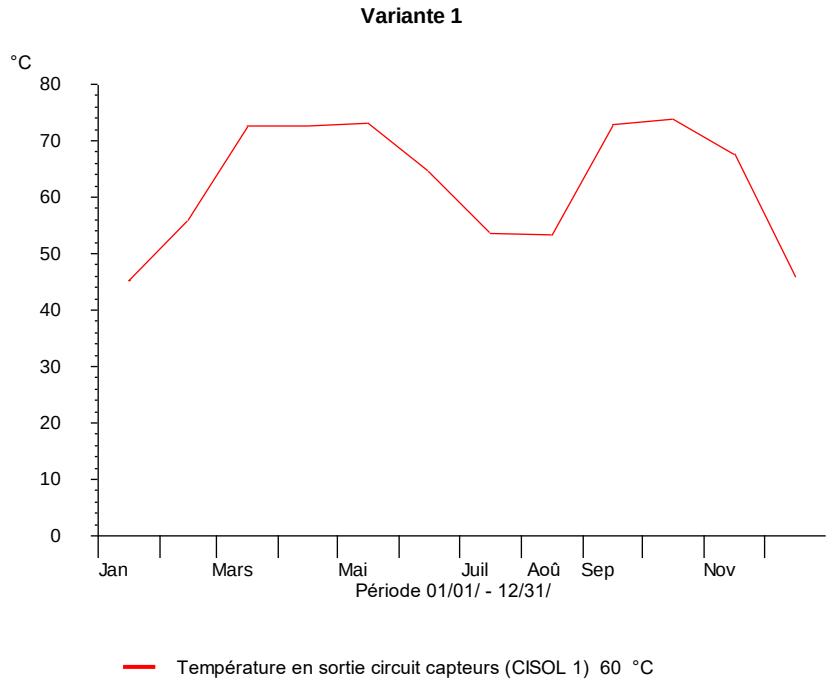


Figure 51 : Température en sortie du circuit capteurs.

Analyse :

- La température en sortie des capteurs varie entre 45°C en janvier-décembre et 75°C en mars-avril et septembre-octobre.
- Une baisse notable est observée en juillet-août, à environ 55°C, malgré l'intensité du rayonnement ; cela s'explique par la forte consommation qui contraint le fluide à céder davantage d'énergie au ballon.
- Il apparaît clairement que la température de sortie des capteurs est influencée par deux facteurs : l'intensité du rayonnement solaire et le niveau de demande en eau chaude.

Résultat :

La moyenne annuelle de 60°C correspond exactement à la température de stockage cible, ce qui confirme que les capteurs sont capables d'alimenter le ballon en chaleur nécessaire tout au long de l'année dans des conditions de fonctionnement satisfaisantes.

♦ Pertes thermiques (Circuit capteurs et Tuyauterie) :

Ce graphique présente les pertes thermiques au niveau des capteurs et des tuyauteries.

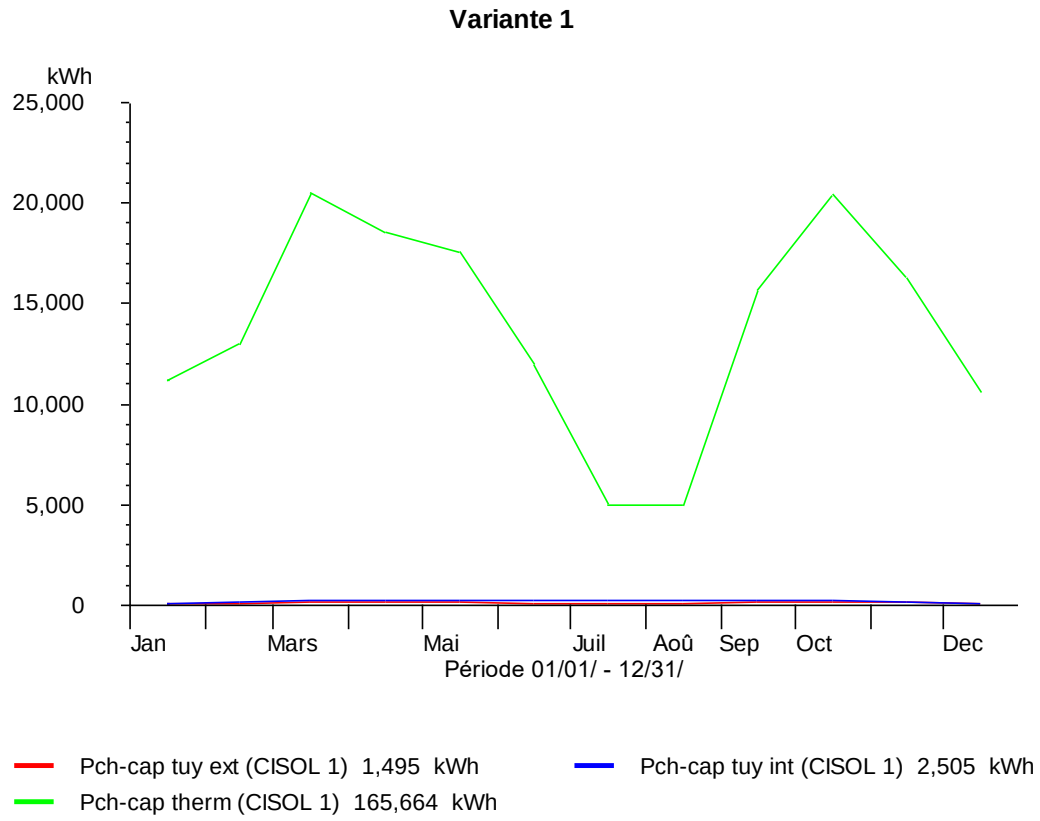


Figure 52 : Pertes thermiques (Capteurs et Tuyauterie extérieur et intérieur)

Analyse :

- Les pertes thermiques des capteurs (165 664 kWh/an) dominent la courbe avec un écart considérable par rapport aux pertes des conduites.
- Les pertes des capteurs prennent la forme d'un W inversé : elles augmentent au printemps et en automne (environ 20 000 kWh/mois) et diminuent en juillet-août (environ 5 000 kWh/mois).
- Les pertes des conduites intérieures (2 505 kWh/an) et extérieures (1 495 kWh/an) restent très faibles tout au long de l'année.

Résultat :

Les faibles pertes des conduites confirment la qualité de l'isolation thermique choisie pour les tuyauteries. Quant à la diminution des pertes des capteurs en été malgré un rayonnement élevé, elle s'explique par la baisse de la température du fluide due à la forte demande, ce qui réduit les échanges thermiques avec l'environnement extérieur.

♦ Rendement du circuit capteurs :

Ce graphique montre le rendement du circuit capteurs durant l'année.

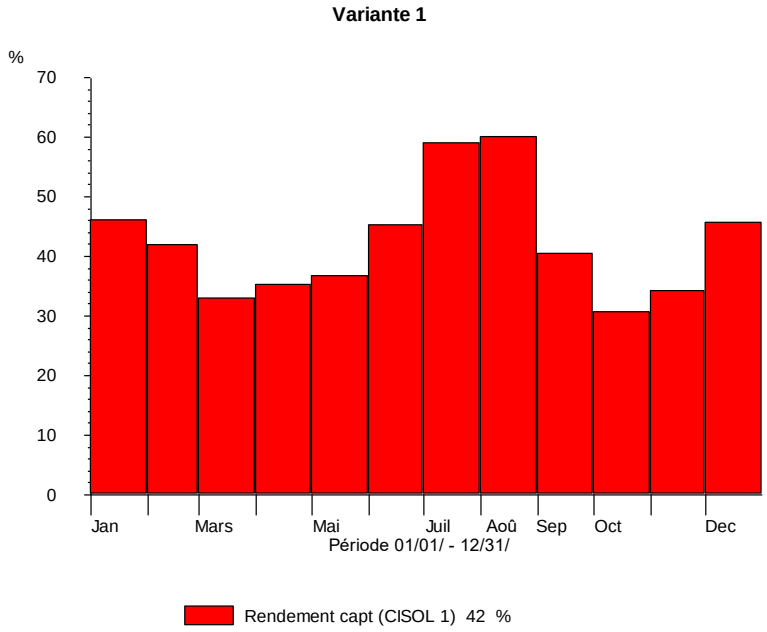


Figure 53 : Rendement moyen du circuit capteurs.

Analyse :

- Le rendement mensuel varie entre 30% en octobre et 60% en juillet-août.
- Il augmente en été car la forte consommation maintient la température du fluide basse dans les capteurs, améliorant ainsi les échanges thermiques.
- Il diminue au printemps et en automne lorsque la demande baisse, entraînant une hausse de la température du fluide et des pertes thermiques accrues.
- Une relation inverse claire est observée entre les pertes thermiques et le rendement des capteurs.

Résultat :

Le rendement annuel moyen du circuit des capteurs atteint 42 %, ce qui traduit la bonne capacité des capteurs solaires à convertir le rayonnement solaire incident en énergie thermique utile. Cette performance confirme l'efficacité du champ solaire retenu ainsi que son adaptation aux conditions climatiques de la région de Tindouf. Les résultats obtenus montrent également que les capteurs assurent une production thermique satisfaisante tout au long de l'année, contribuant ainsi à la couverture d'une grande partie des besoins en eau chaude sanitaire.

♦ Energie solaire et énergie d'appoint nécessaires pour l'ECS

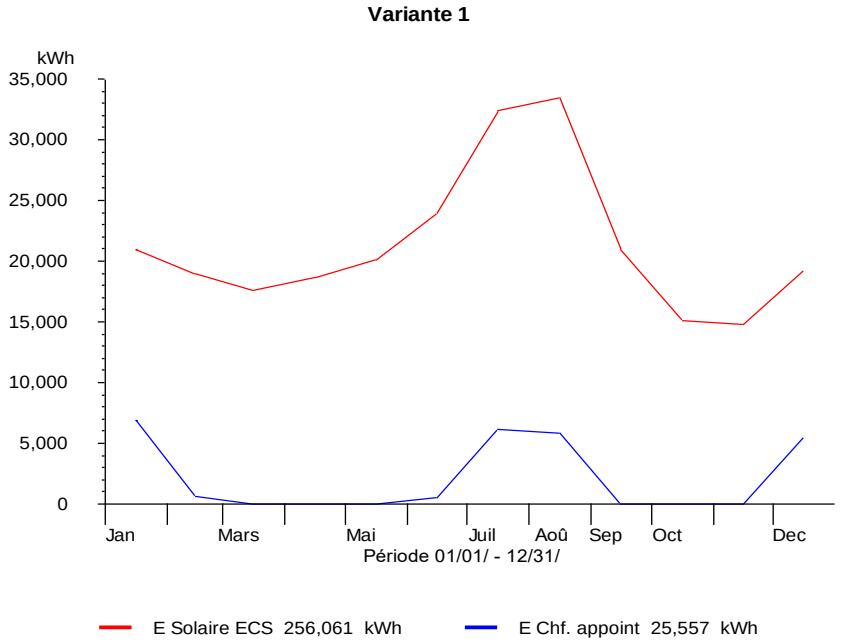


Figure 54 : Energie solaire et énergie d'appoint nécessaires.

Analyse :

- L'énergie solaire (courbe rouge) reste élevée tout au long de l'année, entre 17 000 et 33 000 kWh/mois, et ne s'annule jamais.
- Elle atteint son maximum en juillet-août (environ 33 000 kWh/mois) et son minimum en mars-avril (environ 17 000 kWh/mois).
- L'énergie d'appoint (courbe bleue) n'intervient que durant des périodes limitées : décembre-février et juillet-août.
- L'énergie d'appoint est strictement nulle de mars à juin et de septembre à novembre, soit 7 mois sur 12.

Résultat :

L'énergie solaire couvre 256 061 kWh sur les 282 217 kWh des besoins annuels, tandis que l'énergie d'appoint ne représente que 25 557 kWh, soit 9% du bilan énergétique global. Cela démontre que le système fonctionne de manière quasi autonome par rapport à l'énergie électrique d'appoint, ce qui confirme le succès du dimensionnement et sa viabilité économique à long terme.

5.6. Synthèse des résultats

Le tableau suivant résume les principaux résultats obtenus par la simulation, qui montrent clairement que le système dimensionné atteint des performances énergétiques élevées conformes aux objectifs fixés, confirmant ainsi la validité du dimensionnement adopté et son adéquation aux conditions climatiques de la région de Tindouf.

Paramètre	Valeur moyenne annuelle
Taux de couverture ECS	91 %
Rendement global du système	41 %
Irradiation horizontale annuelle	2195 kWh/m²
Température extérieure moyenne	24 °C
Température moyenne de l'eau froide	10 °C
Température moyenne de l'ECS	54 °C
Besoin énergétique ECS	282 217 kWh
Température moyenne en sortie des capteurs	60 °C
Pertes thermiques des capteurs	165 664 kWh
Pertes tuyauterie intérieure	2 505 kWh
Pertes tuyauterie extérieure	1 495 kWh
Rendement moyen des capteurs	42 %
Énergie solaire produite pour l'ECS	256 061 kWh
Énergie d'appoint électrique	25 557 kWh

Tableau 12: Résultats de la simulation.

6. Conclusion

La simulation réalisée à l'aide du logiciel T*SOL a permis de valider le dimensionnement du système solaire thermique proposé pour la production d'eau chaude sanitaire au niveau de la base de vie à Gara Djebilet (Tindouf). Les résultats obtenus montrent que le taux de couverture solaire annuel atteint 91%, le rendement global du système est de 41%, et l'énergie d'appoint électrique ne représente que 9% du bilan énergétique annuel. De plus, l'écart entre les besoins énergétiques simulés et calculés reste inférieur à 1%, ce qui confirme la fiabilité des hypothèses retenues. Ces performances s'expliquent notamment par le potentiel solaire exceptionnel de la région de Tindouf, avec une irradiation annuelle de 2 195 kWh/m², qui en fait un site particulièrement favorable à l'exploitation de l'énergie solaire thermique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Il ne fait aucun doute que l'énergie solaire est aujourd'hui un véritable enjeu que l'Algérie cherche à concrétiser, surtout au vu des immenses potentiels solaires dont regorgent ses régions du sud, qui demeurent pour la plupart inexploités. C'est de cette réalité qu'est parti ce travail, pour proposer une solution pratique et concrète consistant en la conception d'un système de chauffe-eau solaire pour une base de vie dans la région de Tindouf, dans le contexte des grands projets miniers que connaît la région, en premier lieu le projet de Gara Djebilet.

Nous avons progressé dans ce travail du théorique vers le pratique, en commençant par la compréhension de la nature du rayonnement solaire et des mécanismes de son exploitation, puis en approfondissant l'étude des composants des chauffe-eaux solaires, pour aboutir finalement à la conception d'un système intégré répondant aux besoins énergétiques réels de la base de vie. La simulation réalisée avec le logiciel T*SOL nous a révélé que le système est capable de couvrir plus des neuf dixièmes du besoin total en eau chaude tout au long de l'année, ce qui signifie concrètement une quasi-indépendance vis-à-vis de l'énergie électrique pour cet usage.

Ce que l'on peut retenir de ce travail, c'est que l'investissement dans l'énergie solaire thermique dans les régions désertiques algériennes n'est pas simplement un choix environnemental noble, mais une décision économique judicieuse permettant d'économiser des coûts considérables sur le long terme, notamment dans les grands projets industriels qui consomment quotidiennement d'importantes quantités d'énergie.

Nous espérons que ce travail aura apporté une modeste contribution à l'édification du système des énergies renouvelables en Algérie, et que ses résultats ouvriront la voie à des études plus approfondies et plus complètes dans ce domaine prometteur.

Bibliographie

Bibliographie

[1] CABIROL, Thierry ; PELISSOU, Albert ; ROUX, Daniel. Le chauffe-eau solaire. Aix-en-Provence : Edisud, 1980.

[2] Böhm-Vitense, E. – Introduction to Stellar Astrophysics, Cambridge University Press , 1989.

[3] Stix, M. – The Sun: An Introduction, Springer,2012.

[4] NAVARRO, José Miguel. Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible. Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, Toulouse, France, 2008.

[5] Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Le gisement solaire, Polycopié de cours (Chapitre II : Rayonnement solaire).

[6] HADEF L., HANK F., MERROUCHE K. (2017). L'énergie solaire dans l'habitat bioclimatique : cas de l'habitat individuel à Jijel. Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Benyahia, Jijel.

[7] Moussaoui Moulay, Z., & Moussaoui Moulay, H. (2014).Etude et simulation d'un système solaire thermique cylindro-parabolique. Mémoire de Master, Université d'Adrar, Algérie.

[8] Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. – Atmospheric Science: An Introductory Survey, Academic Press, 2006.

[9] A D E M E, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie « Eau chaude solaire, Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives », France, Avril 2002.

[10] CHABANE, Foued.Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire.Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, option Énergétique, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2015.

[11] MENHOUDJ S., Infrastructure qualité dans le secteur de l'énergie solaire thermique, Polycopié de cours, Master II Équipements et Habitat, Université USTO-MB, Oran, Algérie.

[12] Kalla, Fayçal. Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Étude et modélisation d'un capteur solaire. Mémoire de Magistère en Mécanique, option Énergétique, Faculté de Technologie, Département de Mécanique, Université de Batna, Algérie, 2014.

[13] Kreith, F., & Kreider, J. F. (1978). Principles of Solar Engineering. New York, NY: McGraw-Hill.

[14] NACER, T. (2017). Étude de l'impact des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau BT sur le bilan électrique des fermes agricoles. Thèse de doctorat, Université de Blida 1, Algérie

[15] A. Khelif, "potentiel et marche photovoltaique algérien", New Energy Algeria NEA

[16] BELAID, S. Cours Énergie Solaire Photovoltaïque. Université A. Mira de Béjaïa, Faculté de Technologie, 2014/2015.

[17] H. Reitschell et W. Raiss, Traité de chauffage et de climatisation, Dunod, 1974.

[18] ECOinfos – Énergies renouvelables. Fonctionnement du chauffe-eau solaire. Disponible sur : https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffe-eau-solaire/fonctionnement-chauffe-eau-solaire/ Consulté le : 2026.

[19] Solaire Diffusion, Les types de chauffe-eau solaire, https://www.solaire-diffusion.eu/chauffe-eau-solaire/type-chauffe-eau-solaire/consulté le 10/04/2026.

[20] Types de chauffe-eau solaire, www.outilsolaires.com, Consulté le 06 Mars 2025.

[21]https://www.solaire-diffusion.eu/chauffe-eau-solaire/dimensionner-son-chauffe-eau solaire.html. Consulté le 10 février 2020.

[22] DRAME SAGNA, Madeleine. Dimensionnement et étude de performance d'un chauffe-eau solaire à capteur plan vitré pour un usage domestique. Mémoire de Master, Université Assane Seck de Ziguinchor, 2020**.**

[23] Brahimi, A. (2016). Etude de performance d'un capteur solaire plan à eau. Mémoire de master. Université de Lorraine, Lorraine, 190p.

[24] Bernard, J., Energie Solaire; Génie Electrique-Calculs et Optimisation. Technosup, Edition Ellipses, 2004.

[25] Veynandt, V. et Moschick, R. (2017). Dimensionnement d'un chauffe-eau solaire et autres composants d'un système solaire thermique. AEE-Institute for Sustainable Technologies, Autriche.

[26] MASSOUD, Gassmi. *Étude de l'effet des capteurs solaires sur le fluide liquide dans le site d'Ouargla*. Mémoire de Master en Sciences et Techniques, spécialité Énergies Renouvelables. Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Energies Renouvelables et des Sciences de la Terre, Département des Énergies Renouvelables, 2019. Dirigé par M. Ferhat Ali.

[27] N, Bellel. Étude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).

[28] L'échangeur thermique, lenergie-solaire.net/energie-solaire-thermique/composants, Consulté le 10 février 2020.

[29] CEREEC. (2017). Utilisation Thermique de l'Energie Solaire. AEE, Autriche.

[30] ECO Infos, Les avantages du chauffe-eau solaire, disponible sur : https://www.eco-renouvelables.eu/les-avantages-du-chauffe-eau-solaire, consulté le 21 janvier 2026.

[31] Ministère de l'Énergie et des Mines, Algérie (2026). Site officiel. Disponible sur : https://www.energy.gov.dz.

[32] Rocheron, C., 2012. Domestic Hot Water – an Energy Approach. Chalmers, University of Technology.

[33] Cruickshank, H. (2012). A review of strategies for the control of high temperature stagnation in solar collectors and systems. Solar Energy, 86(2), 749–761. Elsevier.