

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Energies renouvelables en mécanique

Par :

Mme ZIANI Feriel

Mme MEZIANE TANI Meriem

Sujet

Simulation de l'intégration des capteurs solaires pour le chauffage d'un bâtiment et la production d'eau chaude sanitaire

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M. ALIANE Khaled	PR.	Université de Tlemcen	Président
Mme BENAHMED Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M. ROSTANE Brahim	PR.	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2024 /2025

المخلص

في ظل السياق العالمي الذي يتسم بالحاجة الملحة لاتخاذ الاجراءات و التحول الطاقوي يركز هذا المشروع النهائي على استثمار حلول الطاقة المتجددة في القطاع الصناعي الجزائري . الهدف الاساسي هو تقييم مدى جدوى و كفاءة دمج انظمة الطاقة الشمسية الحرارية للتدفئة و انتاج الماء الساخن الصحي من خلال دراسة مقارنة دقيقة بين نوعين من التركيبات انظمة تعتمد على الماء و انظمة تعتمد على الهواء .

بدأت الدراسة بتحليل فني للاه متقنات الطاقة الشمسية الحرارية المخصصة للتدفئة و الماء الساخن الصحي مع التركيز على مبادئ التشغيل الاداء و العوامل المؤثرة على كفاءتها . هاذ الاساس مكن من تصميم مناسب يلبي الاحتياجات الفعلية للمبنى الصناعي . تم اجراء محاكاة باستخدام برنامج في T*SOL 2021 R3 علمى مبنى ذو هيكل ثقيل و عزل عالي يمثل مركز التحكم الاقليمي (CCR) في مجمع تكرير البترول RA1K سكيدة و هو موقع استراتيجي تديره شركة سونا طراك .

هذا الاطار الواقعي اخذ بعين الاعتبار الظروف المناخية المحلية و المتطلبات الوظيفية و القيود الصناعية .

من خلال هذا النموذج قمنا بمقارنة الاداء الطاقوي و البيئي للنظامين المدروسين حيث ابرز التحليل الظروف التي يصبح فيها كل نظام هو الامثل اعتمادا على الطلب الحراري مستوى العزل الاشعاع الشمسي و التكوين الفني .

تؤكد النتائج الجدوى التقنية و الاقتصادية لدمج الطاقة الشمسية الحرارية في السياق الصناعي شريطة التصميم الدقيق و اختيار التكنولوجيا الملائمة يوضح هذا العمل الدور الاساسي الذي يمكن ان تلعبه الطاقات المتجددة في الاستراتيجية الطاقوية للشركات الوطنية الكبرى مثل سونا طراك .

كلمات مفتاحية :

التحول الطاقوي، الطاقة المتجددة، الطاقة الشمسية الحرارية، التدفئة، الماء الساخن الصحي، الأنظمة الشمسية (نظام مائي، نظام هوائي)، الجدوى التقنية والاقتصادية، القطاع RA1K ، سونا طراك، مجمع T*SOL التحليل التقني، الكفاءة، العزل الحراري، الإشعاع الشمسي، المحاكاة، الصناعي الجزائري

Résumé

Dans un contexte mondial marqué par l'urgence climatique et la nécessité de repenser les modèles énergétiques, ce projet de fin d'études s'inscrit dans une démarche de valorisation des énergies renouvelables appliquées au secteur industriel algérien. L'objectif principal a été d'évaluer la pertinence et l'efficacité de l'intégration de systèmes solaires thermiques pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS), à travers une étude comparative rigoureuse entre deux types d'installations : à eau et à air.

Notre approche a débuté par une analyse technique des principales technologies solaires thermiques dédiées au chauffage et à l'ECS, en s'intéressant à leurs principes de fonctionnement, leurs performances, ainsi qu'aux paramètres influençant leur rendement. Cette phase a permis de poser les bases d'un dimensionnement cohérent, adapté aux besoins réels d'un bâtiment industriel.

La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel **T*SOL 2021 R3**, sur un bâtiment à structure lourde et fortement isolée, représentatif du **Centre de Contrôle Régional (CCR)** de la **raffinerie RA1K de Skikda**, site stratégique du groupe **SONATRACH**. Cette implantation concrète a offert un cadre de travail réaliste, tenant compte des spécificités climatiques locales, des exigences fonctionnelles et des contraintes d'exploitation du milieu industriel.

À travers cette modélisation, nous avons pu comparer les performances énergétiques et environnementales des deux systèmes envisagés. L'analyse a mis en évidence les conditions dans lesquelles l'un ou l'autre des dispositifs devient optimal, en fonction de la demande thermique, du niveau d'isolation, de l'ensoleillement et de la configuration technique.

Les résultats confirment la faisabilité et l'intérêt de l'intégration du solaire thermique dans un contexte industriel, à condition d'un dimensionnement précis et d'un choix technologique adapté. Ce travail contribue ainsi à illustrer la place essentielle que peuvent occuper les énergies renouvelables dans la stratégie énergétique de grandes entreprises nationales comme **SONATRACH**.

Mots clés :

Transition énergétique, Énergies renouvelables, Solaire thermique, Chauffage, Eau chaude sanitaire (ECS), Systèmes à eau / à air, Analyse technique, Performance énergétique, Simulation T*SOL, Isolation thermique, Irradiation solaire, Dimensionnement, Contexte industriel, SONATRACH, Raffinerie RA1K, Faisabilité technique et économique.

Abstract

In a global context marked by the urgent need for climate action and energy transition, this final year project focuses on the valorization of renewable energy solutions within the Algerian industrial sector. The primary objective was to evaluate the relevance and efficiency of integrating solar thermal systems for heating and domestic hot water (DHW) production, through a rigorous comparative study between two types of installations: water-based and air-based systems.

Our approach began with a technical analysis of the main solar thermal technologies dedicated to heating and DHW, examining their operating principles, performance, and key factors influencing their efficiency. This foundation allowed for a coherent dimensioning adapted to the actual needs of an industrial building.

Simulations were performed using **T*SOL 2021 R3** software, applied to a heavy-structure, highly insulated building representative of the **Regional Control Center (CCR)** at the **RA1K refinery in Skikda**, a strategic site operated by **SONATRACH**. This realistic framework incorporated local climatic conditions, functional requirements, and industrial constraints.

Through this modeling, we compared the energy and environmental performance of the two systems studied. The analysis highlighted the conditions under which each system becomes optimal, depending on thermal demand, insulation level, solar irradiation, and technical configuration.

Results confirm the technical and economic feasibility of integrating solar thermal energy in an industrial context, provided precise dimensioning and appropriate technology choices. This work thus illustrates the essential role that renewable energies can play in the energy strategy of major national companies such as **SONATRACH**.

Keywords:

Energy transition, Renewable energy, Solar thermal systems, Heating, Domestic hot water (DHW), Water-based and air-based systems, Technical analysis, Energy performance, Simulation, T*SOL 2021 R3, Thermal insulation, Solar irradiation, Industrial building, SONATRACH, RA1K refinery, Technical and economic feasibility.

Remerciement

Avant toute chose, nous rendons grâce à Dieu, source infinie de sagesse et de force, qui nous a prodigué la santé, la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à **Monsieur Brahim ROSTANE**, professeur à l'Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen et encadrant de ce mémoire. Son engagement sans faille, sa rigueur scientifique, ainsi que sa pédagogie exemplaire ont fait de lui bien plus qu'un simple encadrant : un véritable mentor dont les conseils avisés et le soutien constant ont été déterminants dans la réussite de ce projet. Sa bienveillance et son exigence nous ont continuellement poussés à donner le meilleur de nous-mêmes.

Nous remercions avec respect et gratitude les membres du jury, **Madame Lamia Benahmed**, et **Monsieur Khaled Aliane**, qui ont honoré ce travail de leur temps et de leur regard critique, apportant des observations précieuses qui contribueront à son amélioration.

Nous souhaitons également témoigner notre reconnaissance à l'ensemble des professeurs du département de Génie Mécanique, ainsi qu'au personnel administratif, pour leur accompagnement constant, leur professionnalisme et leur dévouement tout au long de notre cursus.

Enfin, nous dédions une pensée toute particulière à nos familles, dont le soutien indéfectible, l'amour et les encouragements ont été une source constante de motivation et de réconfort. Nous remercions également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

À toutes et à tous, nous témoignons notre plus sincère gratitude.

Dédicace

À mes parents bien-aimés, **Djenat** et **Kamel**,

Mes piliers, mes repères, mes plus grands amour et soutiens. Merci pour vos sacrifices silencieux, votre amour infini et votre confiance constante. Rien de tout cela n'aurait eu de sens sans vous. Ce travail est le fruit de votre patience, de votre présence, et de tout ce que vous êtes pour moi.

À ma petite sœur **Nourhane**,

Mon rayon de lumière, ma douceur au quotidien. Ton innocence, ton sourire et ton affection m'ont toujours donné la force d'avancer, même dans les moments les plus difficiles.

À mes chers grands-parents,

Pour leur sagesse et leur tendresse. Et une pensée toute particulière, remplie d'amour et d'émotion, pour ma grand-mère **Zahra** que Dieu l'accueille dans son vaste paradis. Sa bienveillance et sa mémoire m'accompagnent à chaque pas.

À mes grandes familles **ZIANI** et **OUICI**,

Vous êtes la richesse de mon histoire, mes racines et ma fierté.

À **Hamid, Hbibba, Nabil** et **Amina** et leurs enfants : **Zahra, Iyed, Djinen**, et le petit ange **Amjad**.

À **Hadjira, Nabila, Asma, Fatima, Sarah**, et leurs adorables enfants : **Meriem, Adam, Anes, Djihane, Ilef, Romaïssa, Roufaïda** et le petit **Khalil**.

Merci pour tout l'amour, les prières, et les moments de joie partagés.

À ma binôme et amie précieuse, **Meriem**,

Merci pour ton soutien, ta complicité, et ta bienveillance tout au long de ce parcours. Ta présence a rendu ce chemin plus doux et plus porteur d'espoir.

À tous mes collègues de Master,

Merci pour les échanges, les rires, les efforts partagés et la solidarité dans les moments de doute comme de réussite. Cette aventure n'aurait pas eu la même saveur sans vous.

ZIANI Ferial

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, avec tout mon amour, ma reconnaissance et mon profond respect :

À mes chers parents,

Mon père, le modèle de force et de sagesse, source inépuisable de soutien et de motivation. Que Dieu te protège et te comble de santé et de sérénité, Merci d'être dans ma vie.

Ma mère, la lumière de ma vie, pilier de mon courage et de ma persévérance. Merci pour ton amour inconditionnel, tes prières, et ton dévouement sans limites.

À mes frères Mehdi et Islam, Pour votre soutien , Votre affection, votre humour et votre présence, Merci d'avoir toujours été là, chacun à votre manière.

À mon fiancé Islam, Pour ton amour, ta bienveillance et ton soutien indéfectible et ta confiance en moi. Ta présence m'a permis d'aller au bout. Merci d'être la.

À mes proches Nassima , Farida et Rania,

«À chacun d'entre vous, merci pour l'amour et les encouragements qui ont été ma lumière et ma force à chaque étape de ce chemin »

À ma binôme Ferial,

Merci pour ta collaboration, ta patience et ton amitié tout au long de ce travail. Cette réussite est aussi la tienne. Je te souhaite le meilleur pour l'avenir.

À mes grands-parents,

Pour leurs prières, leur amour et leur sagesse, qui ont bercé mon enfance et nourri mes ambitions

À toute La famille, Meziane Tani et Zerrouki.

À tous mes enseignants, mes amies de promotion et collègues de travail, Merci pour les échanges enrichissants et l'expérience humaine partagée durant ces années.

Meziane Tani Meriem

Table des matières

الملخص.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Remerciement.....	iv
Dédicace.....	v
Dédicace.....	vi
Table des matières.....	vii
Table des figures.....	xi
Table des tableaux.....	xii
Nomenclature.....	xiii
Introduction générale	1
I. Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Solaires Thermiques Intégrés	
I.1 Introduction	3
I.2. Le solaire : l'énergie des étoiles.....	3
I.3 Ensoleillement et lumière.....	4
I.3.1 Qu'est ce que la lumière.....	4
a. Un peu de physique.....	4
b. Couleur et longueur d'onde.....	4
I.3.2 Rayonnement solaire et atmosphère.....	5
I.3.3 Masse d'air.....	6
I.3.4. Les différents rayonnements solaires.....	6
I.3.5 Spectre solaire.....	7

I.3.6 L'absorption de la lumière.....	9
I.4 Réseau météorologique Algérien.....	10
I.4.1 Gisement solaire en Algérie.....	11
I.5 La position du soleil.....	12
I.5.1 Les coordonnées équatoriales.....	12
a. La déclinaison du soleil (d).....	12
b. L'angle horaire du soleil (H).....	13
I.5.2 Les coordonnées horizontales.....	13
I.6 L'exploitation de l'énergie solaire.....	13
I.6.1 L'énergie.....	13
I.6.2. Énergie solaire.....	14
I.6.3 La typologie de l'énergie solaire.....	14
a. Un système solaire photovoltaïque.....	15
b. Un système solaire thermique.....	15
I.7 L'architecture solaire.....	24
I.7.1 L'architecture climatique traditionnelle en Algérie.....	24
a. Les matériaux de construction traditionnels.....	24
b. Conception thermique et organisation spatiale.....	25
c. Rafraîchissement naturel et ventilation passive.....	26
I.7.2 L'architecture solaire moderne en Algérie.....	26
a. Chauffage passif.....	26
b. Rafraîchissement et confort d'été.....	26
I.7.3 Différences entre architecture ancienne et moderne.....	27
I.7.4 Typologies régionales et réponses architecturales.....	27

I.7.5 L'intégration végétale et paysagère dans l'architecture solaire.....	28
I.8 Situation et perspectives des énergies renouvelables en Algérie.....	28
I.8.1 Intérêt stratégique du solaire thermique en Algérie.....	29
I.8.2 Intégration dans la planification énergétique.....	29
I.9. Conclusion.....	30

II. Chapitre 02 : Recherche Bibliographique

II.1 Introduction.....	31
II.2 Les Études bibliographiques.....	31
II.3 Conclusion.....	43

III. Chapitre 03 : simulation d'une installation SSC sur T*sol

III.1 Introduction.....	44
III.2. Captage de l'énergie solaire.....	44
III .3. Récupération de la chaleur du soleil.....	44
III .4. Structure fondamentale d'une installation solaire thermique.....	45
III .5. Principe de fonctionnement des différents composants d'une installation solaire thermique....	45
III .5.1. Le capteur solaire.....	45
a. vitrage.....	46
b. Absorbeur.....	47
c. Le fluide caloporteur.....	48
d. L'isolation thermique arrière et latérale.....	48
e. Le coffre du capteur.....	49
III .5.2. La tuyauterie.....	49
III .5.3. Echangeur de chaleur.....	49

III .5.4. Système de stockage.....	51
III .5.5. Un système d’appoint (chaudière).....	53
III.6. Le Chauffe-eau solaire.....	54
III .6.1. Le fonctionnement d’un chauffe-eau solaire.....	55
III .6.2. Les différents types de chauffe-eau solaires.....	56
a. Les chauffe-eau monobloc.....	57
b. Les chauffe-eau à thermosiphon.....	57
c. Les chauffe-eau à circulation forcée.....	58
d. Les chauffe-eau à auto vidange.....	58
III .7. Le chauffage solaire.....	60
a. Le plancher solaire.....	61
b. Le chauffage central solaire.....	62
c. Le chauffage solaire de l’air.....	62
III .8. Transition vers un système solaire combiné (SSC).....	63
III .8.1 Le système solaire combiné avec stockage de l’eau de chauffage en ballon.....	64
III .8.2 Le plancher solaire direct (PSD)	64
III .9. Les installations solaires thermiques	65
III .9.1 Le chauffe-eau solaire individuel(CESI)	65
a. Le principe de fonctionnement.....	65
b. Dimensionnement de l’installation solaire en Algérie.....	67
c. L’installation.....	67
d. entretien et la maintenance, quelques points clés.....	67
III.9.2. Système solaire combiné (SSC).....	69
a. Le principe de fonctionnement.....	69

b. Les autres systèmes.....	70
c. Le dimensionnement de l'installation.....	70
d. L'installation.....	71
III.9.3 L'eau chaude sanitaire (ECS) solaire collective.....	72
III.10. Dimensionnement général d'une installation solaire thermique combinée (SSC)	75
III.10.1 Analyse des besoins énergétiques.....	75
III.11. Logiciel T*Sol.....	77
III.11.1.Présentation du logiciel T*SOL.....	77
III.11.2 Avantages du logiciel T*SOL.....	78
III.11.3 Fonctionnalités Principales.....	78
III.11.4 Les étapes de simulation d'un projet dans T-SOL.....	79
III.12. Conclusion.....	102

IV. Chapitre 04 : Étude Comparative et Interprétation des Résultats

IV.1 Introduction.....	103
IV.2 Présentation descriptive du CCR au sein du complexe de raffinage RA1K.....	103
IV.3 Données du site et évaluation énergétique du CCR.....	105
IV.3.1 Données géographiques et météorologiques du site.....	105
IV.3.2 Données d'occupation et caractéristiques thermiques du bâtiment.....	105
IV.4 Dimensionnement thermique du CCR.....	108
IV.4.1 Eau chaude sanitaire (ECS).....	108
IV.4.2 Besoins en chauffage.....	108

IV.4.3 Configurations des systèmes solaires simulés pour le CCR.....	109
a. Système à capteurs à air avec ballon bivalent.....	109
b. Système à capteurs plans a eau avec ballon tampon et station d'eau douce	109
IV.5 Analyse et interprétation détaillée des performances simulées des installations solaires.....	110
IV.5.1 Part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie d'appoint.....	111
IV.5.2 La Température maximale mensuelle dans le capteur.....	112
IV.5.3 Taux de couverture solaire	113
IV.5.4 Rendement global du système.....	114
IV.5.5 Économie de gaz naturel	115
IV.5.6 Émissions de CO ₂ évitées.....	116
IV.5.7 Coût d'investissement.....	118
IV.6 Conclusion.....	119
Conclusion générale.....	120
Références bibliographiques.....	122

Table des figures

Figure I.1 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme	5
Figure I.2 : définition de l’Air Mass	6
Figure I.3 : Composantes du rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi (albédo) – Interaction avec l’atmosphère et la surface terrestre	7
Figure I.4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	9
Figure I.5: Réflexion, transmission et absorption	9
Figure I.6 : Réseau pyranométrique (ONM et CDER).....	11
Figure I.7 : Gisement solaire en Algérie	11
Figure I.8 : Repère équatorial.....	12
Figure I.9 : Repère horizontale.....	13
Figure I.10 : système solaire photovoltaïque	15
Figure I.11 : Filières de conversion de l’énergie solaire.....	16
Figure I.12 : détails d’un capteur solaire photovoltaïque.....	19
Figure I.13 : Capteurs solaires plans vitrés.....	21
Figure I.14 : Capteurs solaires plans non vitrés.....	22
Figure I.15 : capteur solaire plan a air.....	22
Figure I.16: Capteur solaire à tubes sous vide.....	23

Figure. I.17: les courbes des rendements en fonction des températures.....	23
Figure I.18 : système solaire thermique combiner	24
Figure I.19 : Schéma de l'architecture solaire du Palais El Mechouar de Tlemcen.....	25
Figure I.20 : Schéma de fonctionnement d'une maison bioclimatique – rôle de l'orientation, de la végétation et de la ventilation naturelle selon les saisons.....	28
Figure II.1 : Schémas descriptif montrant le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur.....	32
Figure II.2 : eau chaude sanitaire individuel.....	34
Figure II.3 : Principe de fonctionnement (capteurs solaires thermiques).....	38
Figure II.4 : Système de production d'ECS avec Solaire bilan énergétique.....	40
Figure III. 1 : fonctionnement d'un capteur solaire thermique.....	46
Figure III. 2: La couverture transparente d'un capteur solaire.....	47
Figure III. 3: Les différents modèles, types et matériaux des absorbeurs.....	47
Figure III. 4: Schéma d'un absorbeur plan.....	48
Figure III. 5: schéma d'un élément du tube absorbeur.....	48
Figure III. 6: Composants d'un capteur plan vitré	49
Figure III.7 : échangeur chaleur thermique.....	50
Figure III. 8: échangeur serpentin dans un ballon de stockage.....	51
Figure. III. 9: ballon de stockage.....	52
Figure III. 10: Ballon solaire sans échangeur.....	52
Figure III. 11: Ballon solaire avec échangeur.....	53
Figure III.12: Schéma d'un ballon de stockage pour un chauffe-eau solaire couplé avec appoint.....	55
Figure III. 13 : schéma d'un chauffe-eau monobloc.....	57

Figure III .14 : schéma d'un chauffe-eau thermosiphon	58
Figure III. 15 : schéma d'un chauffe-eau à auto vidange.....	59
Figure III. 16 : les différents types de chauffe-eau solaire.....	59
Figure III. 17 : schéma d'une installation d'un chauffage solaire.....	60
Figure III. 18 : schéma d'une installation d'un plancher solaire direct.....	61
Figure III.19 : schéma d'une installation d'un chauffage solaire centrale combiné.....	62
Figure III. 20 : schéma d'une installation d'un système solaire combiné SSC.....	64
Figure III. 21 : schéma de principe d'un CESI à appoint séparé par préparateur d'eau chaude sanitaire+chaudière.....	65
Figure III. 22 : schéma de principe d'un CESI à appoint intégré.....	66
Figure III. 23: installation solaire thermique d'un système solaire combiné.....	70
Figure III. 24 : schéma pour des installations de faibles importances (surface des capteurs 20 m2).....	72
Figure III. 25 : schéma conseillé au-delà de 20m2 de capteurs.....	73
Figure III. 26: Schéma retenu lorsque le volume du chauffe-eau solaire augmente.....	73
Figure III. 27 : schéma de couplage avec un appoint chaudières : le cas d'une télé contrôle de l'installation solaire.....	74
Figure III. 28 : présentation générale du projet.....	79
Figure III. 29 : données du site et du référent.....	80
Figure III. 30 : information de l'utilisateur.....	81
Figure III. 31 : formulation de la variante.....	82
Figure III.32 : données climatique du site.....	83
Figure III. 33 : sélection du schéma hydraulique.....	84
Figure III. 34 : enregistrement des informations du projet.....	85
Figure III. 35 : paramétrage des besoins du ECS	86

Figure III. 36 : courbe de charge stable.....	87
Figure III. 37 : Réglages du circuit d'eau chaude sanitaire.....	88
Figure III.38 : Durée de fonctionnement de la production d'eau chaude sanitaire.....	89
Figure III. 39 : Consommation thermique nécessaire.....	90
Figure III. 40 : Apport de chaleur externe.....	91
Figure III. 41 : Profil de fonctionnement du chauffage.....	92
Figure III. 42: Configuration du circuit de chauffage dans T*SOL	93
Figure III. 43: Interface de T*SOL dédiée à la configuration des composants	94
Figure III. 44: Paramétrage des composants	95
Figure III. 45 : Choix et dimensionnement des capteurs solaires pour l'installation	96
Figure III. 46: Configuration d'un circuit liquide intégrant un ballon tampon.....	97
Figure III. 47: Système à capteur à air.....	98
Figure III. 48 : Réglages de la simulation RAIK ainsi que des filtres.....	99
Figure III. 49: Caractéristiques géométriques et techniques du bâtiment.....	100
Figure III. 50 : Circuit de chauffage utilisant des capteurs à air	101
Figure III. 51: Fin du processus de simulation.....	102
Figure IV.1 : illustration du centre de contrôle régional.....	103
Figure IV.2 : Exemple d'affichage temps réel sur Yokogawa DSC – Photo mobile.....	104
Figure IV.3 : installation à capteur à air avec chauffage et ECS (Simulation <i>LKTWW_SSC_CCR_Skikda_2025</i>).....	109
Figure IV.4 : installation avec ballon tampon avec échangeur de chaleur externe et station d'eau douce (Simulation : <i>A17.1 – SSC_CCR_Skikda_2025</i>).....	110
Figure IV.5 : Part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie d'appoint.....	111
Figure IV.6 : Profil mensuel des températures maximales dans le capteur solaire.....	112

Figure IV.7: Taux de couverture des installations pour capteur à air.....	113
Figure IV.8 : Rendement global mensuelle des installations solaire.....	114
Figure IV.9 : économie de gaz naturel pour chaque installation.....	115
Figure IV.10 : Émissions de CO ₂ évitées pour les deux installations.....	116
Figure IV.11 : Coût d'investissement pour chaque installation.....	118

Table des tableaux

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie.....	12
Tableau I.2 : comparaison entre l'ancienne et le moderne architecture.....	27
Tableau IV.1 : Caractéristiques des couches de la toiture modélisée dans T*SOL.....	106
Tableau IV.2 : Caractéristiques des couches de la mure modélisée dans T* SOL.....	106
Tableau IV.3 : Répartition de la charge thermique par zone dans le CCR.....	107
Tableau IV.4 : Puissances thermiques internes par source dans le CCR.....	107
Tableau IV.5 : Apports solaires calculés pour les surfaces vitrées du CCR.....	107
Tableau IV.6 : Répartition des apports thermiques internes et solaires dans le CCR.....	108
Tableau IV.7 : Production thermique spécifique par unité de surface du CCR.....	108
Tableau IV.8 : Caractéristiques techniques et paramètres opérationnels des deux installations solaires thermiques.....	110
Tableau IV.9 : Évaluation économique des systèmes solaires à capteurs à eau et à capteurs à air....	118

Nomenclature

- E = énergie du photon (en joules.)
- h = constante de Planck ($\text{J}\cdot\text{s}$).
- c = célérité de la lumière ($3\times 10^8 \text{ m/s}$).
- λ = longueur d'onde (en mètres).
- Q : La quantité de chaleur captée (W).
- m : masse d'eau consommée kg/jour.
- C_p : capacité calorifique massique de l'eau = $4185 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$.
- ΔT : température de consigne – température froid.
- U : coefficient global de transmission thermique ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$).
- A : surface déprédative (m^2).
- N : le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

- η_0 : rendement optique.
- a_1 : coefficient de perte linéaire ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).
- T_m : température moyenne du fluide.
- T_a : température ambiante.
- G : rayonnement incident (W/m^2).
- Q_{vent} : pertes thermiques (W)
- η : taux de renouvellement d'air (h^{-1}) — $0,3 \text{ h}^{-1}$ pour une isolation lourde
- V : volume chauffé (m^3)
- ΔT : différence de température intérieure/extérieure ($^{\circ}\text{C}$)
- Q_{sol} : apport solaire (W)
- S : surface vitrée (m^2)
- g : facteur solaire du vitrage
- P_i = puissance unitaire d'un équipement ou occupant
- N_i = nombre d'équipements ou d'occupants .

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial où les défis énergétiques et environnementaux se font chaque jour plus pressant, la transition vers des solutions énergétiques durables n'est plus une option, mais une nécessité impérative. La raréfaction des ressources fossiles, la volatilité des marchés énergétiques, ainsi que l'urgence climatique imposent une révision profonde des modes de production et de consommation d'énergie. Dans cette perspective, l'énergie solaire thermique se positionne comme une réponse stratégique majeure, offrant une source inépuisable, propre et accessible, particulièrement dans les régions à fort ensoleillement telles que l'Algérie.

Ce travail de recherche s'inscrit dans cette dynamique de transition énergétique, en s'attachant à l'étude et à la simulation de l'intégration des capteurs solaires thermiques destinés au chauffage des bâtiments et à la production d'eau chaude sanitaire. Le Centre de Contrôle Régional (CCR) de la raffinerie RA1K à Skikda a été choisi comme cas d'étude, non pas pour son contexte industriel, mais comme exemple concret permettant de modéliser et d'évaluer les performances des différentes configurations solaires grâce à l'outil de simulation avancé T*SOL 2021 R3.

Le premier chapitre pose les fondations scientifiques en offrant une analyse détaillée de l'énergie thermique et des technologies de capteurs solaires, éclairant ainsi les mécanismes fondamentaux à l'origine de la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique exploitable.

Le deuxième chapitre propose une synthèse exhaustive des recherches bibliographiques sur les systèmes solaires thermiques appliqués au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire, mettant en exergue les avancées technologiques et les défis techniques rencontrés.

Le troisième chapitre explore avec précision les composants des systèmes solaires combinés, détaille les différentes typologies d'installation et expose leur mode de fonctionnement. Ce chapitre inclut également une présentation méthodique de la simulation à travers T*SOL, illustrée par deux modèles distincts, l'un à circulation d'eau et l'autre à circulation d'air.

Enfin, le quatrième chapitre consacre une attention particulière à la modélisation du CCR, présentant les données clés utilisées pour la simulation, l'analyse rigoureuse des résultats obtenus, ainsi que leur interprétation critique. Cette démarche comparative éclaire la performance et l'efficacité énergétique des systèmes simulés, permettant de dégager des recommandations pertinentes quant à la meilleure configuration pour répondre aux besoins thermiques étudiés.

Par cette approche rigoureuse, ce mémoire ambitionne non seulement d'enrichir la connaissance scientifique sur l'intégration des capteurs solaires thermiques, mais aussi de démontrer, par la puissance des outils numériques et la pertinence de l'analyse, la viabilité et le potentiel considérable de cette technologie renouvelable dans l'optimisation énergétique des bâtiments.

I. Chapitre 1 : Fondements Théoriques des Systèmes Solaires Thermiques Intégrés

I.1 Introduction

Les systèmes solaires thermiques intégrés sont des dispositifs capables de capter et d'utiliser le rayonnement solaire afin de produire de la chaleur sous des formes multiples, au service de diverses applications, notamment pour le chauffage des espaces et pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS). La combinaison de nombreuses technologies au maximisation du potentiel énergétique du soleil vise une transdisciplinarité au service de solutions énergétiques durables et respectueuses de l'environnement.

Ils s'intègrent dans des applications domestiques et industrielles capitalisant sur de nombreux fondements scientifiques, sur des connaissances des paramètres astronomiques, ainsi que sur des technologies éprouvées comme les capteurs solaires thermiques notamment. Cependant ces systèmes sont confrontés à des enjeux non négligeables comme l'optimisation des performances en fonction de l'irradiation solaire, la réduction des pertes thermiques, le respect des normes architecturales et réglementaires.

Ce chapitre introduit les concepts fondamentaux des systèmes solaires thermiques combinés. Il couvre leur définition, leurs applications, ainsi que leurs avantages et limitations technologiques. L'étude des paramètres liés à l'énergie solaire, des technologies disponibles, et des composants essentiels des systèmes intégrés permettra d'établir les bases théoriques nécessaires à une compréhension approfondie de ces solutions énergétiques innovantes. Ce socle conceptuel facilitera également leur simulation et leur modélisation dans les chapitres ultérieurs.

I.2. Le soleil : l'énergie des étoiles

Le soleil a été dans de nombreuses civilisations anciennes, adoré comme un dieu, source de toute vie. De fait, la lumière du soleil, transformée par les plantes, est l'énergie qui nous nourrit et qui circule dans l'ensemble de l'écosystème terrestre.

Dans la galaxie, notre soleil est une étoile bien banale, de taille modeste comme il en existe des millions. À l'échelle humaine, cette fournaise thermonucléaire est pourtant gigantesque : un millions de fois le volume de la terre, une température de 15 millions de degrés en son centre. D'où vient cette énergie ?

L'hydrogène était alors le principal constituant de notre étoile en formation. Progressivement écrasé par la gigantesque pression régnant au centre de cette énorme boule de gaz, l'hydrogène s'est échauffé, jusqu'à des températures où les réactions des fusions nucléaires sont possibles. En

fusionnant, quatre atomes d'hydrogène se transforment en un nouvel élément : l'hélium. Les atomes d'hélium.

sont une fraction de fois plus légères que l'hydrogène dont ils proviennent. Cette masse manquante a été transformée en énergie suivant la célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$. Le soleil s'est allumé.

Depuis, à chaque seconde, le soleil convertit 6 millions de tonnes d'hydrogène en hélium, produisant un flux d'énergie qui pourrait convertir les besoins de l'humanité pour plusieurs milliers d'années. Le rayonnement produit est d'une telle puissance qu'il serait mortel pour toute vie qui s'y exposerait directement.

Heureusement, à 150 millions de kilomètres de là, la terre ne reçoit qu'une fraction infime de ce rayonnement. Placée à une distance idéale du soleil et protégé par son atmosphère, notre planète peut maintenir son climat dans des limites compatibles avec la vie. [1]

I.3 Ensoleillement et lumière

I.3.1 Qu'est ce que la lumière

a. Un peu de physique

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme la décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photovoltaïque. Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquence. Tous est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde. [2]

b. Couleur et longueur d'onde

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sûr, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leurs longueurs d'onde, qui dépend de leurs fréquences : fréquence radio, micro-ondes. Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement, d'une façon la plus écologique qu'elle soit, donc propres au développement de la vie. Regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre : l'infrarouge procure de la chaleur, le visible est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux (dont nous faisons partie, s'il est besoin de le préciser), et l'ultraviolet brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3 μm

(≈ 3000 nm). Quoi de plus naturel pour les physiciens du siècle dernier que de nommer « ultraviolette » la lumière plus bleue que le bleu-violet perceptible par l'œil, et « infrarouge » la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte ?

En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu (longueur d'onde 380nm) au rouge (longueur d'onde 780nm), en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche. On réalise la même décomposition avec un prisme (figure I-1). On appelle spectre, ou répartition spectrale, d'une source de lumière l'ensemble des couleurs, ou longueurs d'onde, qui la constituent. [2]

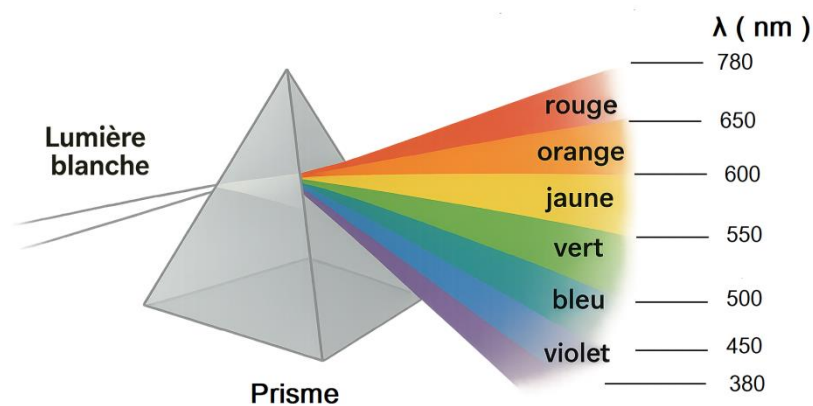


Figure I.1 : Décomposition de la lumière blanche par un prisme

I.3.2 Rayonnement solaire et atmosphère

Le Soleil se situe à une distance moyenne de 150 millions de kilomètres de la Terre. Compte tenu de la célérité de la lumière (environ 300 000 km/s), le rayonnement solaire parcourt cette distance en approximativement 8 minutes avant d'atteindre notre planète. [3]

Le rayonnement solaire extraterrestre, mesuré précisément par la NASA, présente une irradiance de 1367 W/m². Cette valeur, communément appelée "constante solaire", correspond au flux énergétique instantané reçu sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires, hors atmosphère terrestre. Notons toutefois que cette constante subit des variations mineures dues aux fluctuations de la distance Terre-Soleil.

Lorsque ce rayonnement pénètre l'atmosphère terrestre, son intensité subit une atténuation significative par deux phénomènes physiques principaux : l'absorption et la diffusion. Cette atténuation résulte de l'interaction avec les différents composants atmosphériques :

- Gaz majoritaires : N₂ (78%) et O₂ (21%).
- Gaz traces : Argon, CO₂, vapeur d'eau.
- Couche d'ozone stratosphérique (filtre essentiel contre les UV nocifs).
- Aérosols : poussières et nuages (composés de microgouttelettes d'eau liquide). (4)

I.3.3 Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais, le rapport entre l'épaisseur atmosphérique traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure I-2). (3)

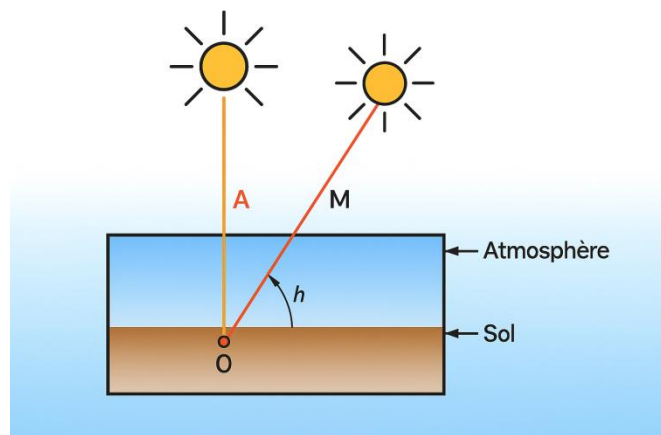


Figure I.2 : définition de l'Air Mass

Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil. A l'aide des points O , A , M et de l'angle h représentés sur la figure I-2, la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère est :

$$OM = \frac{OA}{\sin(h)} \quad (\text{I.1})$$

Donc, l'Air Mass :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin(h)} \quad (\text{I.2})$$

I.3.4. Les différents rayonnements solaires

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- **Le rayonnement direct :**

Il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre

eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

- **Le rayonnement diffus :**

Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire que l'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circum solaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

- **L'albédo (le rayonnement réfléchi) :**

Il est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément des rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure I-3 (4)

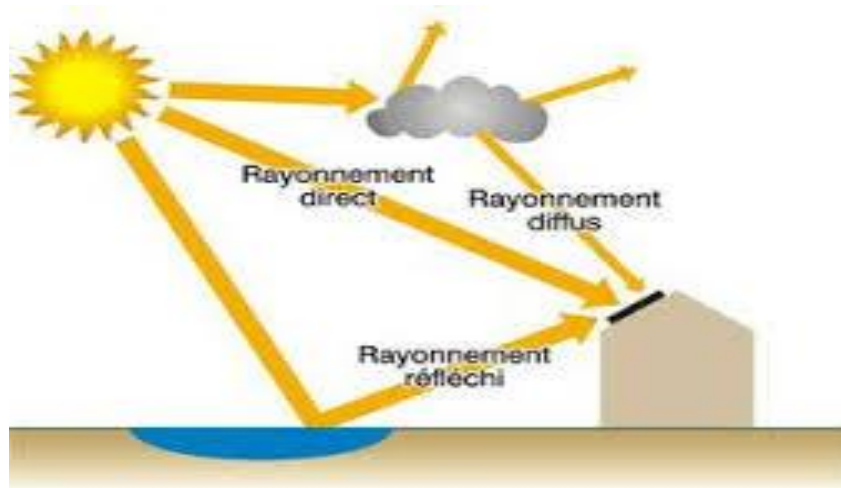


Figure I.3 : Composantes du rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi (albédo) – Interaction avec l'atmosphère et la surface terrestre

I.3.5 Spectre solaire

Le spectre solaire correspond à la décomposition du rayonnement électromagnétique émis par le Soleil en différentes longueurs d'onde. Chaque composante spectrale (visible, infrarouge, ultraviolet) est définie par une plage de longueurs d'onde spécifique. Les photons, particules

élémentaires de lumière, transportent une énergie quantifiée par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.3})$$

Où :

- E = énergie du photon (en joules)
- h = constante de Planck
- c = célérité de la lumière (3×10^8 m/s 3×10^8 m/s)
- λ = longueur d'onde (en mètres) [3]

Le spectre solaire extraterrestre AM0, représenté sur la figure I.4, correspond à la distribution énergétique standard du rayonnement solaire hors atmosphère. Cette courbe de référence, élaborée à partir de mesures satellitaires, se décompose énergétiquement comme suit :

- Ultraviolet UV $0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$ 6,4%
- Visible $0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ 48,0%
- Infrarouge IR $0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45,6%

Elle montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de $41,8^\circ$ au niveau de la mer. L'irradiance spectrale est le flux solaire pour une longueur d'onde donnée (donc une couleur donnée, en ce qui concerne la lumière visible).

Le spectre du ciel clair, noté AM1,5, sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Les simulateurs servant à mesurer les modules tentent de la reproduire aussi fidèlement que possible. On peut également remarquer le spectre de diffusion par beau temps, nettement renforcé vers les bleus du fait de la diffusion de Rayleigh. [3]

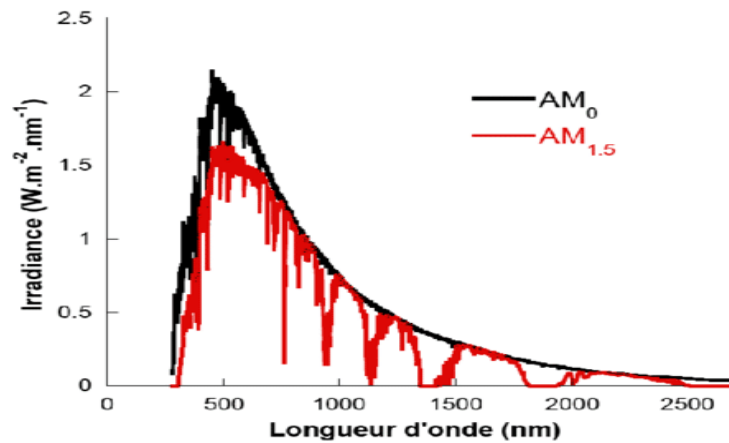


Figure I.4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire. (3)

I.3.6 L'absorption de la lumière

Comme indiqué précédemment, la lumière est constituée de photons – ces particules élémentaires dont l'énergie varie selon leur longueur d'onde (liée à leur couleur). Ces photons peuvent interagir avec la matière de différentes manières : certains matériaux les laissent les traverser intégralement, comme c'est le cas pour les substances transparentes qui ne filtrent pas la lumière visible.

De façon générale, lorsqu'un rayon lumineux rencontre un matériau solide, il peut être soumis à trois types de phénomènes optiques distincts (voir figure I.5).

- La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet
- La transmission : la lumière traverse l'objet
- L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

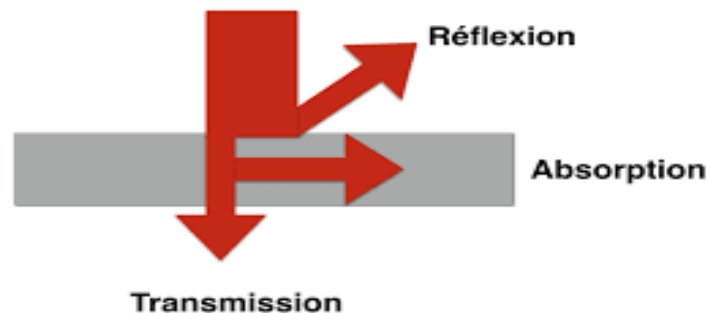


Figure I.5: Réflexion, transmission et absorption

La répartition de ces interactions lumineuses dépend directement des propriétés optiques du matériau. Prenons l'exemple d'un verre teinté en rouge : celui-ci laisse passer la lumière rouge, perceptible par notre vision, tandis qu'il réfléchit environ 8 % du flux lumineux total, quelle que soit la couleur. Cette réflexion est due à son indice de réfraction. Les longueurs d'onde associées au bleu, au jaune ou à d'autres couleurs sont, quant à elles, majoritairement absorbées par le matériau.

Cette absorption se manifeste physiquement : sous un éclairage intense, le verre chauffe, car l'énergie absorbée est convertie en chaleur. Ce phénomène correspond à une émission de rayonnement infrarouge (longueurs d'onde de $1\ \mu\text{m}$ – frontière du spectre visible – à $1\ \text{mm}$ – début du domaine radio). [3]

I.4 Réseau météorologique Algérien

En Algérie, le suivi du rayonnement solaire est assuré par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) grâce à un réseau de quatre-vingt-une (81) stations météorologiques dédiées à l'enregistrement de la durée d'ensoleillement. Toutefois, seules sept (07) stations ont mesuré de manière continue, entre 1970 et 1989, les composantes diffuse et globale du rayonnement solaire sur une surface horizontale. Ces relevés historiques présentent toutefois des lacunes, liées à des interruptions prolongées du fonctionnement des instruments.

En 2011, les données disponibles montraient un recul significatif : seules trois (03) stations (Oran, Tamanrasset et Ksar Chellala) effectuaient alors des mesures régulières du rayonnement horizontal. Parallèlement, huit (08) stations automatiques ont été mises en service à partir de 2009 pour renforcer ce dispositif : Alger (aéroport), Oran (Sénia), In Amenas, Ghardaïa, Annaba, Tamanrasset, Tlemcen et Constantine. [5]

La répartition géographique de l'ensemble des stations équipées de pyranomètres est donnée par la figure.

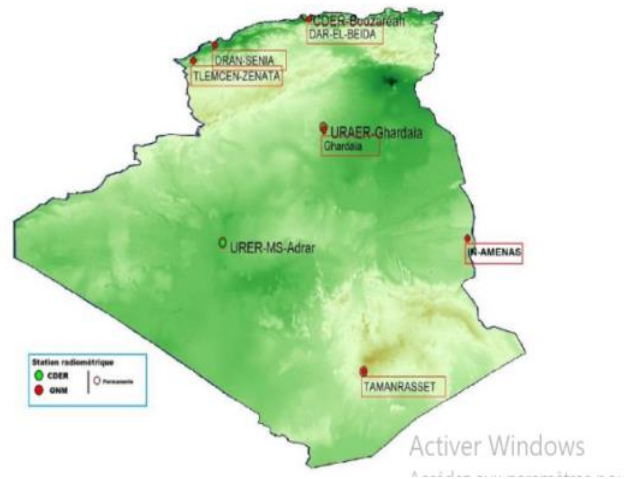


Figure I.6 : Réseau pyranométrique (ONM et CDER).

I.4.1 Gisement solaire en Algérie

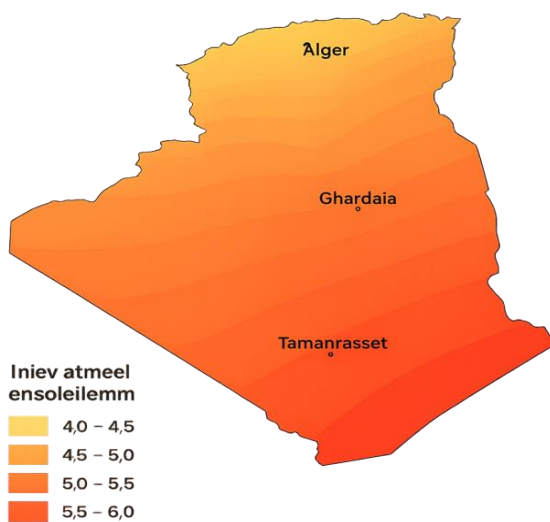


Figure I.7 : Gisement solaire en Algérie.

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. [6]

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. [7]

Grâce à sa position géographique privilégiée, l'Algérie possède l'un des plus importants gisements solaires au monde, comme l'illustre la figure II. Le territoire national bénéficie d'un ensoleillement annuel supérieur à 2000 heures sur presque toute sa superficie, avec des records atteignant 3900 heures dans les régions des Hauts Plateaux et du Sahara.

Sur le plan énergétique, l'apport solaire quotidien sur une surface horizontale de 1 m² avoisine 5 kWh pour la majorité du pays. Ces valeurs correspondent à un apport annuel d'environ 1 700 kWh/m² dans le Nord et 2 263 kWh/m² dans le Sud. Au total, ce potentiel énergétique dépasse 5 milliards de GWh, confirmant la place de l'Algérie parmi les leaders mondiaux en matière de ressource solaire. [8]

Une étude réalisée par l'Agence Spatiale Allemande (ASA) via des données satellitaires a révélé que l'Algérie détient le plus grand potentiel solaire du bassin méditerranéen. Les estimations chiffrent ce potentiel à 169 000 TWh/an pour l'énergie solaire thermique et 13,9 TWh/an pour le photovoltaïque. À titre de comparaison, cette ressource équivaut à la découverte de 10 gisements majeurs de gaz naturel similaires à ceux de Hassi R'Mel, le plus grand champ gazier du pays.

La répartition géographique de ce potentiel, classée par zones climatiques en fonction de l'ensoleillement annuel, est détaillée dans le Tableau (I.1). [9]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie

I.5 La position du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents. [10]

I.5.1 Les coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux, angles : d et H .

a. La déclinaison du soleil (d)

On désigne par déclinaison, notée d , l'angle formé entre la direction du soleil et sa projection sur le plan équatorial. Au cours de l'année, d oscille entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle s'annule lors des équinoxes de printemps et d'automne (21 mars et 21 septembre), atteint sa valeur maximale au solstice d'été (21 juin) et sa valeur minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La déclinaison peut être déterminée à l'aide de la formule suivante :

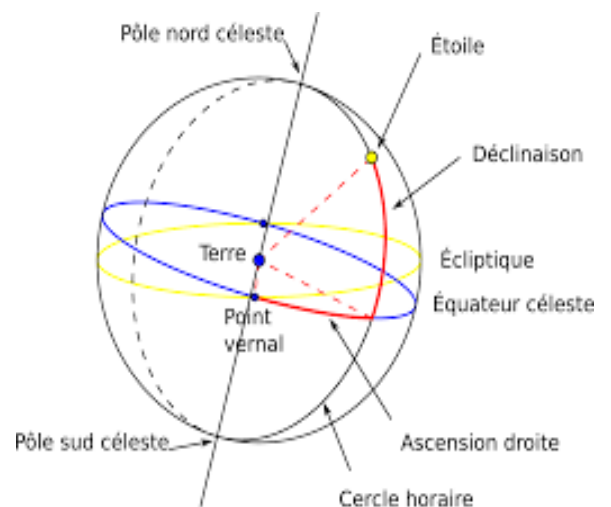


Figure I.8 : Repère équatorial [11]

$$d = 23,45 \left(\frac{360}{365} \frac{N}{365} + 284 \right) \quad (\text{I.4})$$

Où :

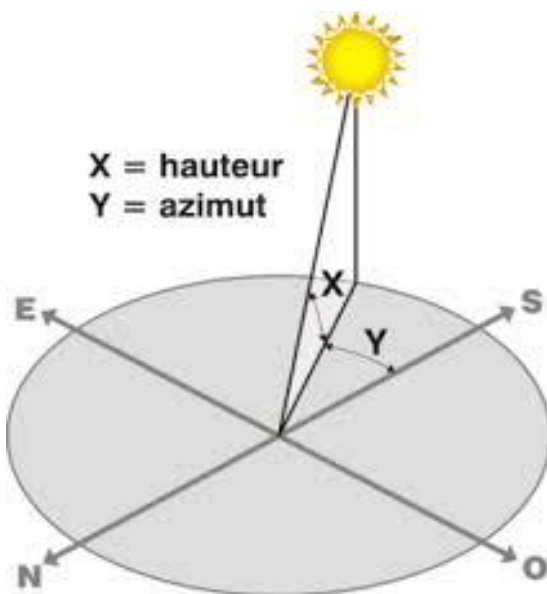
- N est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

b. L'angle horaire du soleil (H)

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial. Il permet d'estimer la course du soleil dans le ciel.

I.5.2 Les coordonnées horizontales

La hauteur et l'azimut du Soleil déterminent la position du Soleil dans le ciel. Ainsi est connue la direction du rayonnement solaire et peuvent être calculées les surfaces ensoleillées du bâtiment. Ces calculs tiendront compte des effets d'ombrage dus au relief, au cadre bâti, à la végétation ou au bâtiment lui-même.



En un lieu,

La hauteur "x" du Soleil est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal. Elle se compte de 0° à 90° à partir de l'horizon vers la voûte céleste.

L'azimut "Y" du Soleil est l'angle créé entre le plan vertical passant à la fois par le soleil et par le lieu considéré, et le plan vertical N-S. Cet angle vaut 0° au sud et est conventionnellement positif vers l'ouest et négatif vers l'est.

Figure I.9 : Repère horizontale

I.6 L'exploitation de l'énergie solaire

I.6.1 L'énergie

Depuis l'aube des temps, l'énergie a été au cœur de l'action humaine, structurant chacune de ses activités quotidiennes. Elle constitue un pilier indispensable au progrès, influençant directement l'essor des domaines technologiques, industriels, économiques et sociaux d'une nation. [12]

I.6.2. Énergie solaire

L'énergie solaire constitue le fondement de la vie terrestre en fournissant chaleur et lumière, conditions essentielles à l'existence d'eau liquide, à la photosynthèse végétale et à l'évolution biologique.

Cette énergie, intrinsèquement liée au rayonnement solaire, appartient aux énergies renouvelables car sa source – le soleil – est considérée comme inépuisable. Classée 100 % verte, sa production génère très peu de CO₂.

L'humanité exploite cette ressource depuis ses origines, majoritairement de manière indirect (combustion de bois, utilisation de combustible fossile), et ponctuellement de façon direct (chauffage solaire, séchage naturel). Aujourd'hui, des technologies sophistiquées captent directement cette énergie sous deux formes principales :

- **Le solaire photovoltaïque** (transformation de la lumière en électricité).
- **Le solaire thermique** (conversion du rayonnement en chaleur).

Ces systèmes répondent efficacement à des besoins énergétiques diversifiés, marquant une transition vers une utilisation optimisée de cette ressource abondante. [13]

I.6.3 La typologie de l'énergie solaire

L'énergie solaire, source inépuisable à l'échelle humaine, provient du rayonnement lumineux et thermique du soleil. Abondante, renouvelable et non polluante, elle peut être convertie directement en énergie thermique (chaleur), électrique (électricité) ou mécanique (mouvement).

Les technologies solaires, en plein essor, se démocratisent pour alimenter logements, industries et infrastructures. Elles se classent en cinq typologies principales, chacune adaptée à des besoins spécifiques :

- **Énergie solaire passive** : Utilisation naturelle de la lumière/chaleur (ex : architecture bioclimatique).
- **Énergie solaire active** : Systèmes mécaniques ou électriques pour capter/stocker l'énergie.
- **Photovoltaïque** : Conversion directe de la lumière en électricité via des panneaux.
- **Thermique** : Captage de la chaleur pour eau chaude ou chauffage.

- **Thermodynamique** : Centrales à concentration pour production électrique à grande échelle.

Avantages et limites : Si le photovoltaïque est modulable mais intermittent, la thermodynamique offre une production stable mais nécessite de vaste infrastructure.

a. Un système solaire photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » (souvent abrégé en « PV ») tire son origine du grec « *photo* » (lumière) et du nom du physicien italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque désigne la transformation directe de l'énergie solaire en électricité. Cette énergie est produite grâce au rayonnement solaire, capté par des modules photovoltaïques constitués de cellules à base de silicium. Ces cellules ont la particularité de convertir les photons (particules lumineuses) en électrons, générant ainsi un courant continu. Ce processus de conversion s'effectue au sein de matériaux semi-conducteurs, permettant une utilisation immédiate de l'électricité produite. [14]

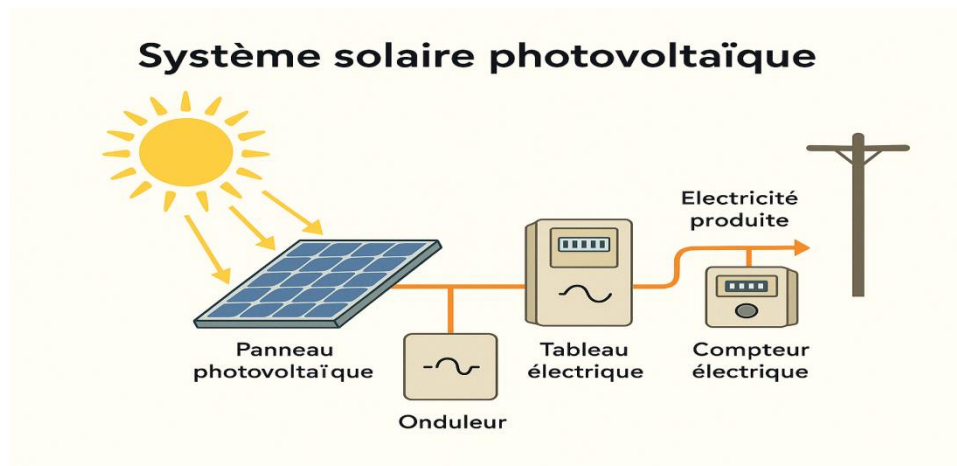


Figure I.10 : système solaire photovoltaïque

b. Un système solaire thermique

b.1 Histoire et progrès de l'énergie solaire thermique à travers les siècles

L'utilisation de l'énergie solaire thermique remonte à l'Antiquité. Dès 776 av. J.-C., les Grecs allumaient la flamme olympique à l'aide d'un miroir. Archimède aurait utilisé des miroirs pour concentrer le soleil et brûler des navires ennemis. Chez les Incas, le feu sacré était allumé grâce à un bracelet en or lors de cérémonies solaires.

Pendant la Renaissance, Léonard de Vinci (1515) et Salomon de Caus (1615) imaginent les premiers concentrateurs et pompes solaires. Au XVIIIe siècle, des savants comme Buffon,

Lavoisier et Saussure conçoivent des appareils utilisant l'énergie solaire pour fondre des métaux, cuire des aliments ou mesurer la chaleur.

Au XIXe et début du XXe siècle, des projets concrets voient le jour : distillateur solaire au Chili (1874) et capteur cylindro-parabolique en Égypte (1912).

Après la Seconde Guerre mondiale, les recherches reprennent avec Félix Trombe (four solaire de Mont-Louis en 1949) et la centrale Thémis en 1983 (2,5 MW), arrêtée peu après à cause du développement du nucléaire.

Aujourd'hui, avec les défis climatiques, l'énergie solaire thermique redevient une solution prometteuse pour la production de chaleur durable.

b.2 Définition de l'énergie thermique

L'énergie solaire thermique, une forme d'énergie renouvelable, repose sur la transformation du rayonnement solaire en chaleur. Cette chaleur est ensuite exploitée pour chauffer des logements, produire de l'eau chaude sanitaire ou même alimenter des centrales électriques. Les installations utilisent des capteurs solaires thermiques (composés de panneaux, de tuyaux et d'un système de circulation), généralement placés sur les toits, pour absorber l'énergie solaire. Celle-ci est transférée vers un fluide caloporteur qui circule dans le réseau, permettant de réchauffer l'eau ou l'air intérieur des bâtiments. [15]

b.3 Technologie de la conversion thermique de l'énergie solaire

Les technologies permettant de convertir l'énergie solaire sont de deux formes : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité.

Selon les besoins énergétiques plusieurs filières d'exploitation de l'énergie solaire sont disponibles.

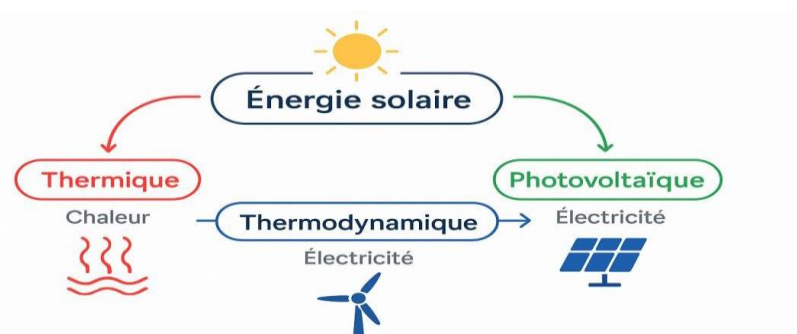


Figure I.11 : Filières de conversion de l'énergie solaire

Nous nous intéressons dans ce qui suit à la conversion thermique de l'énergie solaire. On peut classer les systèmes solaires selon la température fournie:

- **Basse et moyenne température ($\leq 100^{\circ}\text{C}$)**

- Chauffage des bâtiments (chauffage central).
- Production d'eau chaude sanitaire.
- Refroidissement (applications de réfrigération).
- Dessalinisation de l'eau de mer.
- Séchage de produits agricoles (fruits, légumes, etc.).

- **Haute température ($> 200^{\circ}\text{C}$)**

- Procédés thermiques industriels, stérilisation.

➤ **La technologie du solaire passif**

Le rayonnement solaire est d'une utilisation dite passive lorsque ce rayonnement réchauffe directement les locaux du bâtiment, soit en pénétrant par les fenêtres ou soit en s'accumulant dans des masses calorifiques.

- **Dans le secteur du Bâtiment :**

Utilisé pour le chauffage, la réfrigération ou l'éclairage naturel d'une habitation, dans ce domaine la conception de bâtiments et l'appropriation des composants de construction adaptés afin d'utiliser le rayonnement solaire pour l'éclairage naturel, le chauffage des locaux et la climatisation des locaux.

Les fenêtres d'un bâtiment sont le lieu de chauffage solaire passif des locaux. Choisir des fenêtres avec un plus haut taux d'énergie pour économiser plus d'énergie, ou pour une meilleure utilisation de celle-ci. Les fenêtres devraient être principalement situés du côté sud, et moins possible des côtés ouest et est du bâtiment afin d'éviter un excès de chaleur. Au cours d'une année, la perte d'énergie, pour la plupart des fenêtres, est plus importante que le gain en énergie. Les fenêtres à haut rendement thermique peuvent réellement fournir de l'énergie utile, elles ont un meilleur rendement en terme d'énergie utile annuelle que les parois isothermes les mieux isolées. Concevoir le bâtiment de façon appropriée, ses composants comprennent une grande masse thermique afin de conserver la chaleur. Enfin concevoir une architecture qui profite du principe du mur Trombe. [16]

- **Rafrâichissement passif des locaux (climats chauds)**

Pour rafraîchir les bâtiments en zone chaude, plusieurs stratégies naturelles sont mobilisées :

1. Apport d'air frais par le sol :

- L'air extérieur, plus frais, est dirigé vers le bâtiment via des conduits enterrés. Ceux-ci exploitent la fraîcheur du sol (rafrâichissement géothermique) pour abaisser davantage la température de l'air avant son entrée.

2. Gestion des ouvertures :

- Ouvrir les fenêtres basses pour favoriser l'entrée d'air frais.
- Fermer les autres ouvertures afin de canaliser le flux d'air vers les zones à refroidir.
- Placer des fenêtres hautes (étages supérieurs) : exposées au soleil, elles créent une zone chaude en hauteur, déclenchant l'effet cheminée. L'air chaud s'échappe naturellement par ces ouvertures, tandis que l'air frais entre par le bas, assurant une ventilation naturelle.

- **Éclairage naturel : Confort et efficacité**

Les fenêtres à haut rendement thermique offrent un double avantage :

- Elles diffusent une lumière naturelle, préférée pour le confort visuel.
- Leur isolation optimisée réduit les déperditions de chaleur, limitant les coûts énergétiques annuels.

- **Application agricole : Serres solaires**

Dans les serres agricoles, souvent mal isolées, l'énergie solaire est exploitée via :

- Une enveloppe transparente : elle laisse passer le rayonnement nécessaire à la photosynthèse.
- Une isolation améliorée : pour minimiser les pertes de chaleur nocturnes, tout en maintenant un ensoleillement optimal pour la croissance des plantes.

➤ **La technologie du solaire actif**

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour chauffer un fluide, on parle de chauffage solaire actif. L'élément de base du chauffage solaire actif est le capteur solaire. [16]

b.4 Les différentes technologies des capteurs existantes

➤ Le capteur solaire

Un capteur solaire est un dispositif destiné à convertir l'énergie solaire en énergie exploitable, sous forme de chaleur ou d'électricité. Les principaux types comprennent les capteurs solaires thermiques, qui utilisent le rayonnement solaire pour chauffer un fluide, et les capteurs solaires photovoltaïques, qui transforment la lumière solaire en électricité. Reconnus pour leur efficacité et leur durabilité, ces systèmes jouent un rôle essentiel dans la transition vers des solutions énergétiques renouvelables.

• Capteur solaire photovoltaïque :

Qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. [17]

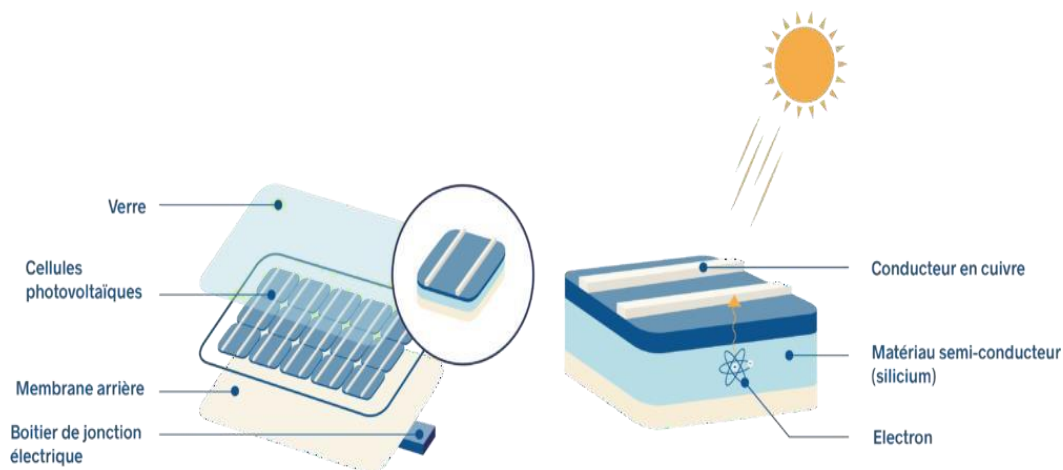


Figure I.12 : détails d'un capteur solaire photovoltaïque

• Capteur solaire thermique :

Le capteur est la source de chaleur de l'installation solaire. C'est la que le rayonnement du soleil chauffe le fluide caloporteur. La chaleur produite est transférée par le circuit capteur et la plupart du temps, stockée dans un ballon de stockage intermédiaire. De là, elle est distribuée aux consommateurs connecter au système. [18]

1. Principe de fonctionnement

Les capteurs thermo-solaires visent à optimiser la conversion de l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en chaleur, à une température adaptée aux besoins de l'utilisateur, puis à transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Pour cela, l'absorbeur constitue l'élément central qui capte l'énergie solaire et dans lequel circule le fluide. Autour de cet absorbeur, différents dispositifs

sont installés afin de réduire au minimum les déperditions thermiques et d'élever la température du caloporteur. On distingue plusieurs grandes familles de capteurs solaires :

- **D'après le fluide caloporteur** : capteurs à eau, à air, à huile ou à ébullition.
- **Selon la géométrie du capteur** : capteurs plans ou capteurs à concentration.

Les capteurs plans captent l'ensemble du flux solaire (direct et diffus) et permettent d'atteindre des températures moyennes, tandis que les capteurs à concentration ne traitent que le rayonnement direct mais permettent d'atteindre des températures élevées. [19]

2. Les différents types des capteurs solaires thermiques

Tous les capteurs visent à convertir le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement élevé et à fournir cette chaleur aux consommateurs aussi efficacement que possible. Les divers types de capteurs différents considérablement en qualité, en rendement, en conceptions et en coûts.

a. Les capteurs solaires plans

Un capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du rayonnement solaire et la transmettre à un fluide caloporteur, en complément de panneaux solaires photovoltaïques, qui transforment le photon en électricité.

Il existe différents types de capteurs solaires plans classés selon :

- Le type d'application considérée.
- La nature du fluide caloporteur utilisé.
- Le niveau de la température à atteindre.

Ils sont principalement utilisés pour la production d'eau sanitaire, le chauffage d'habitation ou des piscines, l'éclairage.

On distingue généralement les capteurs à air, les capteurs à eau et les capteurs solaires sous vide. [20]

➤ Capteur solaire plan à eau

Le capteur solaire thermique à eau constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, et d'un isolant.

• Capteurs solaires plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et

de capteurs à air.

Ils sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant des températures modérées, généralement comprises entre 30 °C et 70 °C. Les capteurs à eau sont notamment privilégiés pour la production d'eau chaude sanitaire, que ce soit à usage individuel ou collectif, pour des procédés industriels ou encore pour le chauffage des piscines intérieures.

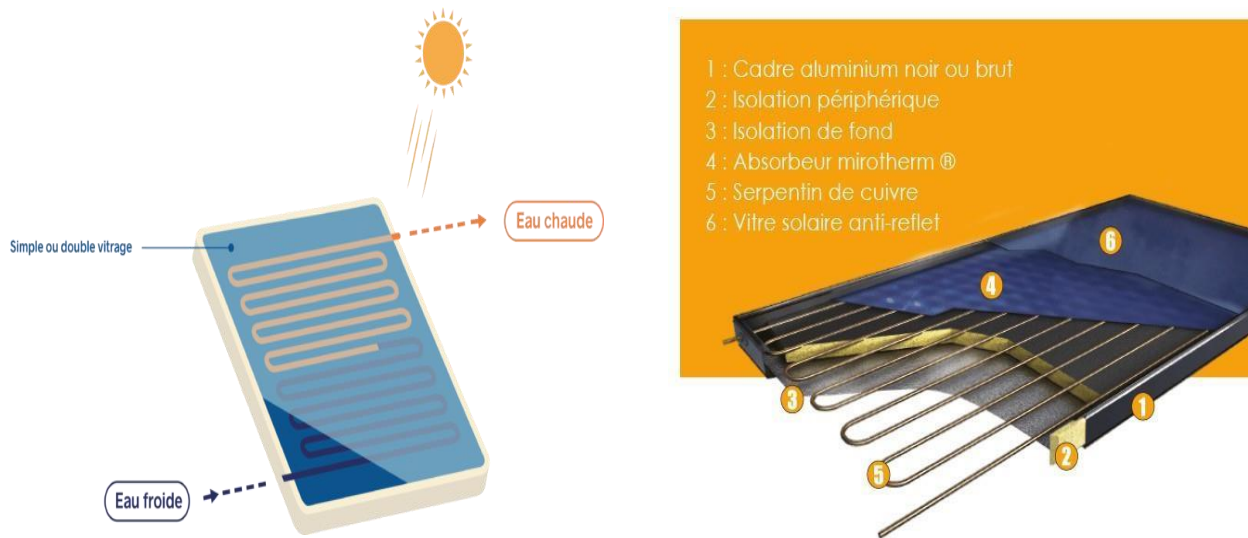


Figure I.13 : Capteurs solaires plans vitrés.

- **Capteurs solaires plans non vitrés**

Les capteurs plans non vitrés représentent la configuration la plus élémentaire et économique, bien que leur performance soit limitée. Ils sont constitués d'une simple plaque métallique ou en matériau plastique servant d'absorbeur, sur laquelle sont fixés des tubes véhiculant le fluide caloporteur. En l'absence de vitrage et d'isolation frontale, ces capteurs sont particulièrement adaptés aux applications basses température (inférieure à 30 °C). Leur emploi principal concerne le chauffage des piscines extérieures : sans couverture vitrée, ils captent une part importante du rayonnement solaire, mais subissent d'importantes pertes thermiques dès qu'un vent souffle ou que la température ambiante est faible. De plus, lorsqu'ils sont parcourus par de l'air chaud, ils peuvent capter la chaleur présente dans l'atmosphère, notamment lors des nuits relativement douces, en présence de vent.

Enfin, leur simplicité de conception facilite leur intégration architecturale, parfois même avec un vitrage protecteur installé pendant la période hivernale afin de limiter les déperditions.

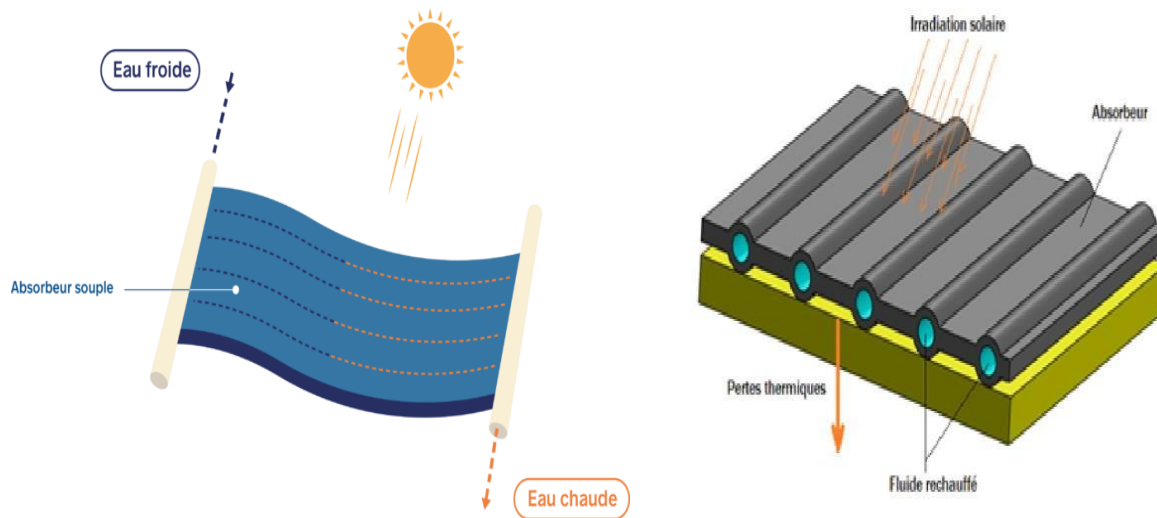


Figure I.14 : Capteurs solaires plans non vitrés.

➤ Capteur solaire plan à air

Contrairement au capteur à eau ou le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en générale formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur. De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeurs plus faible que celui de l'eau.

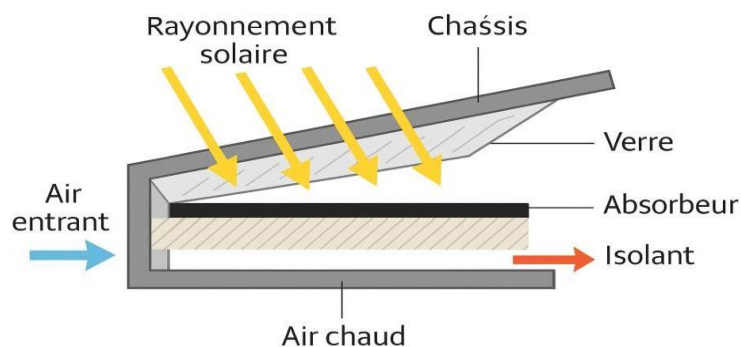


Figure I.15 : capteur solaire plan a air

➤ Capteur solaire à tubes sous vide

Les capteurs solaires sous vide se composent d'une série de tubes en verre transparent. À l'intérieur de chaque tube se trouve une plaque absorbante, chargée de capter le rayonnement solaire, ainsi qu'un échangeur facilitant le transfert de la chaleur vers le fluide caloporteur. Les tubes sont mis sous vide afin d'éliminer les pertes thermiques par convection autour de la plaque absorbante. De plus, cette plaque bénéficie d'un revêtement sélectif qui limite les émissions infrarouges,

réduisant ainsi les déperditions par rayonnement. Grâce à ce double principe (vide et traitement sélectif), ces capteurs atteignent des performances élevées sans nécessiter une isolation supplémentaire ou un caisson de protection.

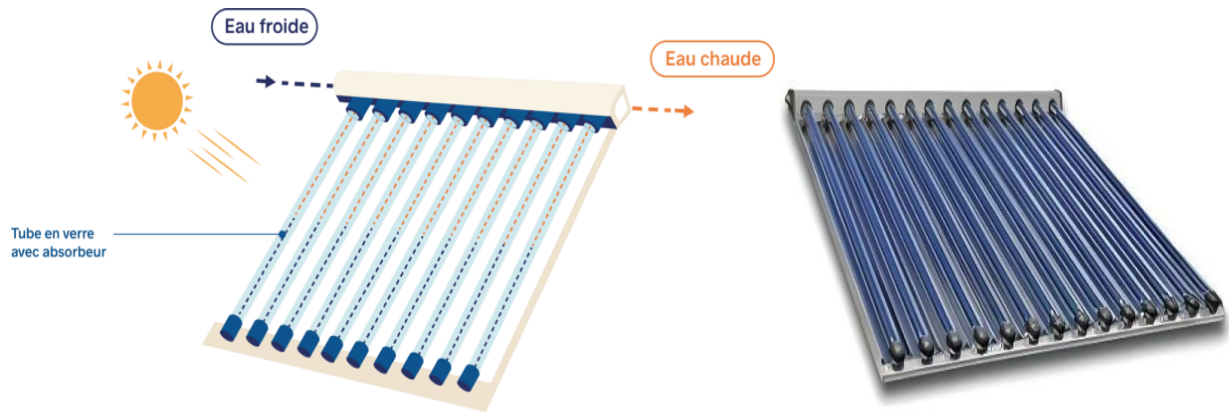


Figure I.16: Capteur solaire à tubes sous vide

3. Rendement des différents types de capteurs

Les différents capteurs thermiques ont des rendements très différents suivant les températures utilisées. Voici les courbes des rendements en fonction des températures pour chaque type de capteur.

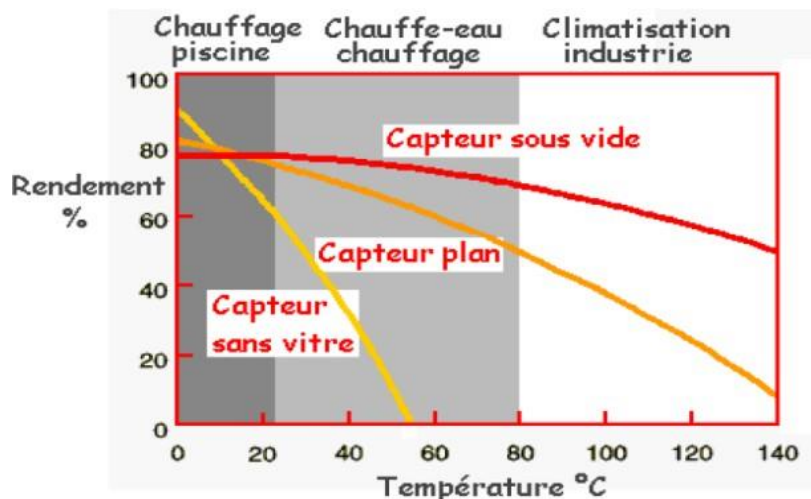


Figure. I.17: les courbes des rendements en fonction des températures.

b. Système solaire thermique combiné (SSC) :

Le système solaire thermique offre une double fonctionnalité : produire de l'eau chaude sanitaire et chauffer un logement ou des espaces bâtis. Cette solution se distingue par son aspect économique

et écologique, l'énergie solaire étant à la fois gratuite et accessible depuis les toitures. Toutefois, la production énergétique des panneaux peut présenter un décalage temporel par rapport aux besoins instantanés (eau chaude ou chauffage). Pour pallier cette intermittence, une unité de stockage (ballon solaire) est généralement intégrée au système.

En cas d'insuffisance de l'apport solaire, un système d'appoint devient indispensable. Celui-ci peut reposer sur :

- Une source électrique (*ex.* chauffe-eau mixte solaire-électrique).
- Une chaudière à combustible (gaz, bois, etc.).
- Une pompe à chaleur (hybridation énergétique).



Figure I.18 : système solaire thermique combiné

I.7 L'architecture solaire

Située dans une zone géographique à fort potentiel solaire, l'Algérie bénéficie d'un ensoleillement remarquable, dépassant les 3 000 heures par an dans la majorité du territoire. Dans ce contexte, l'architecture solaire, soit passive ou active, représente une solution pertinente et durable face aux enjeux énergétiques actuels.

I.7.1 L'architecture climatique traditionnelle en Algérie

Bien avant l'introduction des systèmes de climatisation ou de chauffage artificiels, les habitants des différentes régions algériennes ont su adapter leur habitat aux contraintes climatiques locales. Cette architecture climatique repose sur une intelligence thermique passive, utilisant les ressources naturelles pour garantir un confort optimal tout au long de l'année.

a. Les matériaux de construction traditionnels

Les matériaux anciens jouaient un rôle essentiel dans l'isolation thermique :

- **La pierre (dans les régions montagneuses comme Kabylie ou Aurès) :** matériau à forte inertie thermique, gardant la fraîcheur en été et restituant la chaleur en hiver.
- **Le pisé (terre crue compactée) :** utilisé dans les hauts plateaux et le Sahara, excellent isolant, peu coûteux et écologique.
- **L'adobe (briques de terre séchées) :** courant dans le M'zab.
- **Le bois :** utilisé en toiture pour son rôle d'isolant léger.

Ces matériaux conféraient aux bâtis une forte inertie thermique, réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit.

b. Conception thermique et organisation spatiale

Les constructions anciennes sont pensées pour réduire les apports solaires excessifs tout en optimisant le confort d'hiver:

- **Orientation réfléchie** : les façades principales sont souvent orientées sud ou sud-est, pour capter les rayons solaires matinaux en hiver et éviter les surchauffes estivales.
- **Murs épais** : accumulent la chaleur pendant la journée et la restituent la nuit.
- **Petites ouvertures** : limitent les pertes thermiques et les surchauffes.
- **Patios intérieurs** : améliorent la ventilation naturelle et créent un microclimat frais.
- **Toitures plates blanches** : réfléchissent la lumière et réduisent l'absorption thermique.

➤ Exemple : Palais El Mechouar à Tlemcen

Le Palais du Mechouar, situé au cœur de Tlemcen, est un exemple remarquable de l'architecture climatique algérienne du moyen âge. Construit au XIIIe siècle, ce palais intègre plusieurs éléments de régulation thermique passive :



- **Murs en pierre épais et enduits à la chaux** : assurant inertie et réflexion du rayonnement solaire.
- **Organisation autour de cours intérieures végétalisées** : qui favorisent la ventilation naturelle.
- **Orientation Est-Ouest** : des pièces de vie pour éviter la surchauffe de l'après-midi.
- **Fontaines et bassins** : pour humidifier et rafraîchir l'air ambiant.
- **Petites ouvertures** : protégées par des moucharabieh.

Figure I.19 : Schéma de l'architecture solaire du Palais

El Mechouar de Tlemcen

Ce type de construction est la preuve que les anciens savaient tirer parti des ressources locales pour créer des bâtiments énergétiquement efficaces et adaptés au climat, bien avant l'ère industrielle.

c. Rafraîchissement naturel et ventilation passive

- Patios et fontaines abaissent la température de l'air par évaporation.
- Ouvertures traversantes favorisent la ventilation croisée.
- Moucharabiehs et jalousies en bois régulent l'air et filtrent la lumière.
- Implantation autour de végétation dense (arbres, vignes) pour créer de l'ombrage et réguler l'humidité.

✓ Cas des arbres caducs

Dans de nombreuses habitations traditionnelles, des arbres comme le figuier ou le mûrier sont placés près des fenêtres :

- En été, leur feuillage dense bloque le soleil et réduit l'échauffement
- En hiver, ils perdent leurs feuilles, laissant entrer la lumière et réchauffer les pièces.

I.7.2 L'architecture solaire moderne en Algérie

L'architecture solaire contemporaine vise à réintégrer les principes bioclimatiques dans des constructions modernes, tout en tirant profit des technologies actuelles : isolation renforcée, vitrage performant, systèmes solaires actifs, domotique, etc.

a. Chauffage passif

- **Orientation sud** : des façades vitrées pour capter l'énergie solaire hivernale.
- **Serres solaires** : volumes vitrés agissant comme tampon thermique entre l'extérieur et l'intérieur.
- **Murs Trombe** : paroi sombre derrière une vitre, chauffée par le soleil et transmettant la chaleur à l'intérieur.
- **Planchers massifs** : pour accumuler et redistribuer la chaleur.

b. Rafraîchissement et confort d'été

- Casquettes fixes ou orientables au-dessus des fenêtres sud.
- Brise-soleils verticaux sur les façades est et ouest.
- Puits provençaux ou canadiens (tuyaux enterrés rafraîchissant l'air avant son entrée).
- Toitures végétalisées ou peintures réfléchissantes.
- Ventilation nocturne naturelle, avec ouverture en hauteur pour favoriser le tirage thermique.

I.7.3 Différences entre architecture ancienne et moderne

Critère	Architecture traditionnelle	Architecture solaire moderne
Matériaux	Locaux, naturels (terre, pierre)	Industriels, performants (isolation, vitrage)
Chauffage	Solaire passif, inertie thermique	Systèmes solaires + appoint
Rafrâichissement	Ventilation, végétation, patios	Isolation, brise-soleil, VMC
Intégration au climat	Optimale, contextuelle	Variable selon le design
Autonomie énergétique	Élevée	Moyenne à élevée selon conception

Tableau I.2 : comparaison entre l'ancienne et le moderne architecture.

I.7.4 Typologies régionales et réponses architecturales

L'Algérie se compose de trois grandes zones climatiques, chacune nécessitant une architecture adaptée.

a. Zone Nord (Tell) – Climat méditerranéen doux (Alger, Oran, Tizi-Ouzou)

- Grandes ouvertures au sud.
- Murs isolés, mais avec inertie suffisante.
- Casquettes horizontales pour éviter la surchauffe estivale.
- Toits inclinés avec ventilation sous toiture.

b. Hauts Plateaux – Climat continental (Sétif, Batna, Tiaret)

- Isolation renforcée des murs et toitures.
- Baies vitrées orientées au sud avec vitrage performant.
- Masses thermiques pour inertie.
- Protection solaire latérale.

c. Zone Sud (Sahara) – Climat hyper-aride (Ghardaïa, Adrar, Tamanrasset)

- Murs très épais en adobe ou pisé.
- Très petites ouvertures, parfois à hauteur réduite.
- Patio central avec végétation et fontaines.
- Couleurs claires, toits plats réfléchissants.

I.7.5 L'intégration végétale et paysagère dans l'architecture solaire

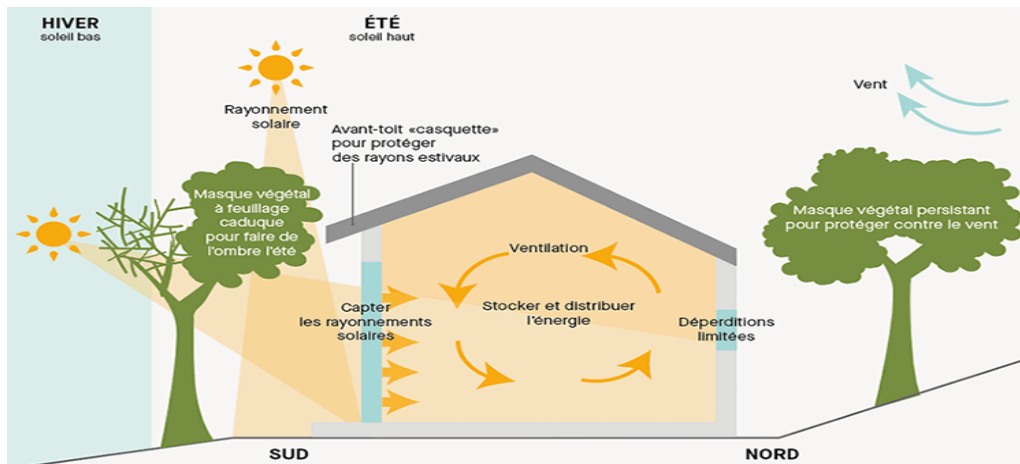


Figure I.20 : Schéma de fonctionnement d'une maison bioclimatique – rôle de l'orientation, de la végétation et de la ventilation naturelle selon les saisons

L'environnement végétal joue un rôle fondamental dans la régulation thermique :

- Arbres caducs au sud (figuiers, mûriers) : chaleur en hiver, ombre en été.
- Arbres persistants au nord : brise-vent naturel.
- Vignes et plantes grimpantes sur treilles : filtrage solaire.
- Jardins intérieurs avec bassins d'eau : évaporation rafraîchissante.
- Harmonie avec le relief et orientation selon la topographie.

I.8 Situation et perspectives des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie, dotée de vastes ressources fossiles, a historiquement basé son modèle énergétique sur l'exploitation et l'exportation des hydrocarbures. Toutefois, cette dépendance constitue aujourd'hui une vulnérabilité structurelle face à la croissance continue de la demande intérieure, à la volatilité des marchés internationaux et aux impératifs de la transition énergétique mondiale.

Dans ce contexte, la diversification du mix énergétique à travers l'intégration des énergies renouvelables est devenue une priorité stratégique nationale.

Le Programme national de développement des énergies renouvelables (PNDER), révisé en 2020, fixe un objectif de 15 000 MW de puissance installée en énergies renouvelables d'ici 2035, avec une prédominance du solaire, en raison du gisement exceptionnel dont bénéficie le pays. L'irradiation solaire globale moyenne varie entre 5 et 7 kWh/m²/jour, avec un ensoleillement dépassant les 3 500 heures par an dans certaines régions du Sud, ce qui confère à l'Algérie l'un des meilleurs

potentiels solaires au monde.

Jusqu'à présent, les efforts se sont concentrés essentiellement sur le solaire photovoltaïque, dont la puissance installée est estimée à environ 460 MW à l'échelle nationale. Cependant, le solaire thermique, bien que techniquement mature, reste sous-exploité malgré son potentiel important dans la couverture des besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire (ECS), en particulier dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel.

I.8.1 Intérêt stratégique du solaire thermique en Algérie

Le recours à l'énergie solaire thermique pour le chauffage des locaux et la production d'ECS constitue une solution pertinente à plusieurs niveaux :

- **Techniquement** : les systèmes solaires combinés (SSC) permettent de répondre efficacement à une part significative des besoins thermiques des bâtiments, avec des rendements supérieurs à ceux du photovoltaïque dans ces applications.
- **Économiquement** : la substitution du gaz naturel par l'énergie solaire thermique dans les usages thermiques permettrait de libérer des quantités importantes de gaz pour l'exportation, générant ainsi des revenus additionnels pour l'État.
- **Environnementalement** : ces systèmes contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en conformité avec les engagements climatiques de l'Algérie.

Des projets pilotes ont été réalisés dans des bâtiments publics (écoles, hôpitaux, logements collectifs), démontrant la faisabilité technico-économique de cette technologie. Toutefois, son déploiement à grande échelle demeure limité par plusieurs obstacles : manque de structuration du secteur, absence de réglementation thermique obligatoire pour les bâtiments, faible sensibilisation des acteurs, et coûts d'investissement initiaux perçus comme élevés.

I.8.2 Intégration dans la planification énergétique

L'énergie solaire thermique doit désormais être considérée comme un vecteur clé de l'efficacité énergétique, complémentaire aux autres sources renouvelables. Elle s'intègre parfaitement dans une logique de bâtiments à haute performance énergétique, en assurant une couverture significative des besoins thermiques tout en réduisant l'empreinte carbone.

I.9. Conclusion

À travers ce premier chapitre, nous avons établi les fondements essentiels relatifs à l'énergie solaire thermique, en mettant en lumière ses principes, son potentiel énergétique et les technologies associées, notamment les capteurs solaires. L'étude de ces généralités permet de mieux comprendre l'importance croissante de cette ressource dans le contexte énergétique actuel, marqué par la recherche de solutions durables et respectueuses de l'environnement.

Cette introduction constitue une étape indispensable pour aborder, dans les chapitres suivants, des aspects plus techniques liés à la conception, au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes de production d'eau chaude sanitaire utilisant l'énergie solaire.

II. Chapitre 02 : Recherche Bibliographique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une recherche bibliographique axée sur la simulation et l'intégration des capteurs solaires dans les systèmes de chauffage des bâtiments ainsi que pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Cette étude vise à rassembler, analyser et synthétiser des informations issues de diverses sources telles que les articles scientifiques, les mémoires, les thèses, les rapports techniques. L'objectif est d'acquérir une compréhension approfondie des technologies solaires thermiques, de leurs principes de fonctionnement, des outils de simulation utilisés, ainsi que leur efficacité et intégration dans les bâtiments.

II.2 Les Études bibliographiques

A la suite de notre revue de littérature, nous avons sélectionné un ensemble de travaux de recherche en lien avec la simulation et l'intégration des capteurs solaires pour le chauffage des bâtiments et la production d'eau chaude sanitaire. Ces études portent sur les différentes configurations de système solaires thermique, les performances énergétiques selon les conditions climatiques, ainsi que sur les outils numériques et logiciels utilisés pour la modélisation et l'optimisation de ces systèmes.

- **JOHANNES Kéryn, 2005**

Ce travail vise à optimiser les systèmes solaires collectifs de production d'eau chaude. Pour cela, un modèle a été développé sous TRNSYS, un logiciel capable de simuler tous les éléments impliqués dans la production d'eau chaude sanitaire par énergie solaire. Le modèle de référence a été validé à l'aide de données expérimentales recueillies sur l'installation solaire de la maison de retraite « Les Berges de l'Hyères » à Chambéry (73), qui a été équipée pour mesurer les bilans énergétiques de chaque composant. Les résultats numériques et expérimentaux montrent une bonne cohérence du modèle, malgré quelques écarts qui restent explicables. [21]

- **BERCHIDE Abdeslam ,2011**

Durant ce stage, nous avons mené une étude expérimentale sur un chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur, conçu et fabriqué dans l'atelier de l'URER/MS (Adrar) pour s'adapter aux conditions climatiques difficiles du Sahara. Ce prototype permet de produire de l'eau chaude sanitaire uniquement grâce à l'énergie solaire. Dans un premier temps, nous avons réalisé une revue bibliographique sur le potentiel solaire et les différents types de chauffe-eau solaires. Ensuite, nous avons décrit notre système ainsi que son coût total, estimé à environ 16 000 DA pour une surface de captation de 0,76 m². Enfin, nous avons évalué ses performances thermiques : le rendement

journalier moyen, dans les deux configurations testées (hivernale et annuelle), atteint ou dépasse les 50 %. De plus, avec un débit fixe de 1,5 l/min, le système produit 63 litres d'eau chaude à plus de 50°C en fin de journée, et maintient un volume similaire à une température supérieure à 35°C après une nuit entière. [22]

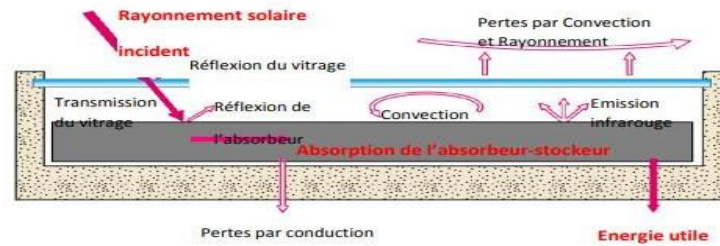


Figure II.1 : Schémas descriptif montrant le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

- **SAMET samir ,2012**

Aujourd'hui, l'énergie solaire a atteint un niveau de développement où son exploitation est plus accessible que jamais, tout en restant une ressource inépuisable. Parmi les énergies renouvelables, elle se distingue en permettant aux utilisateurs de couvrir directement une partie de leurs besoins énergétiques. L'une des applications les plus avantageuses et les plus simples à mettre en œuvre est le chauffage de l'eau domestique, une solution largement répandue. Divers systèmes ont été conçus dans ce domaine, dont les pompes à chaleur à capteur aérosolaire.

Ce mémoire porte sur l'analyse d'un chauffe-eau thermodynamique utilisant une pompe à chaleur aérosolaire, étudié sous les conditions climatiques de Tizi-Ouzou. Pour modéliser théoriquement ce système, il est essentiel de connaître le potentiel d'irradiation solaire local. Ainsi, nous avons d'abord déterminé l'angle d'inclinaison optimal du capteur solaire, puis estimé l'irradiation incidente à l'aide du modèle statistique de Lieu et Jordan (1960), en nous basant sur les données météorologiques et astronomiques de la région.

Afin de dimensionner le système, nous avons évalué les besoins en eau chaude sanitaire d'un foyer algérien moyen (4 personnes), puis calculé la puissance thermique nécessaire pour chauffer et stocker cette quantité d'eau. Les simulations réalisées pour le mois le moins ensoleillé (décembre) ont révélé qu'une surface minimale de 6 m² de capteurs est requise pour répondre à la demande.

L'étude des performances du système a mis en évidence leur dépendance à deux paramètres clés : le rayonnement solaire et la température ambiante. Les résultats montrent un coefficient de performance (COP) moyen annuel de 8 pour la pompe à chaleur et un rendement du capteur atteignant 63,6 %, des valeurs bien supérieures à celles des systèmes traditionnels. Ces performances prometteuses ouvrent des perspectives intéressantes pour la diffusion de cette technologie, y compris en Algérie, où les énergies fossiles restent encore très compétitives et où ce type d'équipement n'est pas encore produit localement. [23]

- **BENAKLI Said Aouli, ADDAD Massinissa, 2013**

Cette étude de simulation d'un système solaire thermique destiné à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage s'intègre parfaitement dans la dynamique actuelle de maîtrise énergétique, de recours aux énergies renouvelables et de développement durable. Le secteur du bâtiment, qui présente un important potentiel d'économies d'énergie, connaît une évolution marquée vers l'émergence d'un marché dédié à ce type d'habitat écologique. Par ailleurs, de multiples initiatives nationales voient le jour dans ce domaine, favorisant des avancées technologiques rapides.

La modélisation du bâtiment sous TRNSYS a offert une évaluation exhaustive et pertinente de l'enveloppe thermique, tout en quantifiant les besoins énergétiques mensuels et annuels pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. L'analyse de ces systèmes énergétiques renouvelables est grandement facilitée par l'utilisation de tels outils numériques, permettant une vision globale du projet avec ses atouts et ses axes d'amélioration.

Nos travaux ont particulièrement souligné l'impact significatif du taux de couverture solaire sur les besoins énergétiques, aussi bien dans le Sud algérien que dans les autres régions du pays. Ces résultats mettent en lumière l'opportunité de développer massivement ces installations en Algérie et d'en généraliser l'intégration dans les constructions, qu'elles soient individuelles ou collectives.[24]

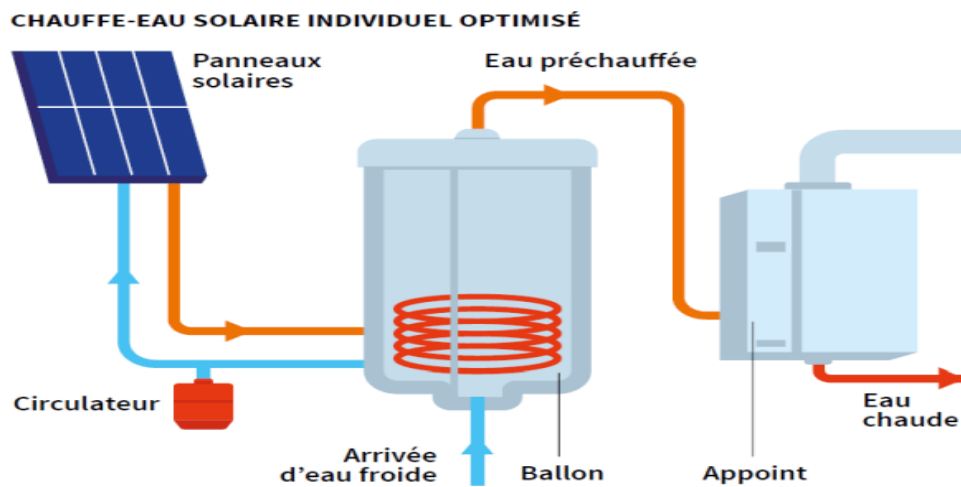


Figure II.2 : eau chaude sanitaire individuel

- **DOUHA Asma, 2016**

Cette recherche s'inscrit dans une démarche scientifique combinant une approche théorique des concepts liés au sujet d'étude et une analyse pratique de la qualité environnementale architecturale dans nos bâtiments contemporains. La problématique de la performance énergétique des constructions, particulièrement la réduction des besoins énergétiques, constitue aujourd'hui une préoccupation majeure pour les professionnels de l'architecture.

Notre pays bénéficiant d'un important potentiel solaire tout au long de l'année, les énergies renouvelables représentent une solution prometteuse. L'énergie solaire peut en effet être exploitée de deux manières : pour la production d'électricité (via des cellules photovoltaïques ou des centrales thermo-solaires) ou pour générer de la chaleur et de l'eau chaude sanitaire (grâce à des capteurs thermiques).

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer la faisabilité d'assurer le confort thermique dans un immeuble multifonctionnel situé sur le boulevard Arbi Tebessi à Blida. Cette étude se base sur deux critères fondamentaux : l'intégration d'un système de chauffage solaire et la production d'eau chaude sanitaire, permettant ainsi de couvrir une partie des besoins énergétiques de la zone résidentielle. [25]

- **TALBi Fouzia BECHEKOUR Rima, 2017**

Les bâtiments à haute performance énergétique représentent aujourd'hui la solution optimale pour réduire significativement la consommation d'énergie et limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, les systèmes solaires combinés, qui assurent simultanément la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage, offrent une alternative particulièrement intéressante.

Notre étude s'est concentrée sur l'évaluation des besoins énergétiques d'un tel système appliqué à une habitation type F3 située dans la région de Bouira. Pour déterminer les exigences en matière de chauffage, nous nous sommes appuyés sur le Document Technique Réglementaire (DTR C3.2), qui permet également de vérifier la conformité du bâtiment avec les normes thermiques en vigueur. Concernant les besoins en eau chaude sanitaire, ceux-ci ont été calculés selon une approche analytique.

Pour confirmer et affiner ces résultats, nous avons réalisé une simulation thermique détaillée de la production d'eau chaude sanitaire à l'aide du logiciel TRNSYS 16. Cette modélisation informatique vient compléter et valider les données obtenues par la méthode analytique traditionnelle. [26]

- **BRAHITI Mehdi, MOUSSAOUI Amar,2018**

Notre projet de fin d'études vise principalement à dimensionner et analyser les performances thermiques d'un système intégré de chauffage, climatisation et production d'eau chaude sanitaire, utilisant l'énergie solaire comme source principale. Cette installation est conçue pour le nouveau bâtiment de recherche de l'École Nationale Polytechnique.

Dans un premier temps, en nous appuyant sur les principes fondamentaux du transfert thermique, nous avons évalué les besoins énergétiques du bâtiment pour ces trois fonctions. Cette analyse nous a permis de concevoir un système de climatisation solaire fonctionnant sur le principe du cycle à absorption.

Les résultats obtenus démontrent la faisabilité technique de cette solution :

- Puissance frigorifique atteinte : 300 kW
- Surface requise de capteurs solaires sous vide : 1240 m²
- Coefficient de performance (COP) du système : 0,66

Cette étude prouve la pertinence d'une solution énergétique durable pour les infrastructures universitaires, combinant efficacité énergétique et utilisation des ressources renouvelables. [27]

- **OUDRANE Abdellatif, 2018**

Cette thèse explore la modélisation numérique du comportement thermique d'un habitat situé en zone désertique, dans le but d'optimiser le confort thermique. Pour y parvenir, nous avons d'abord modélisé les transferts de chaleur liés à l'écoulement d'eau chaude dans une conduite rectangulaire, en résolvant numériquement les équations de Navier-Stokes et de l'énergie thermique. Ces équations ont été discrétisées via une méthode implicite aux différences finies, puis résolues à l'aide des algorithmes de Gauss et Thomas.

Dans un second temps, nous avons appliqué la même approche pour simuler la conduction thermique dans une dalle en béton. Par ailleurs, les échanges thermiques au sein d'un modèle d'habitat, représenté comme une cavité parallélépipédique, ont été analysés en établissant des bilans énergétiques pour chaque paroi, intégrant les phénomènes de convection, conduction et rayonnement.

Les modèles développés ont été validés à partir de données climatiques récentes, collectées par l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar. Une étude approfondie des paramètres géométriques et thermiques influençant le confort intérieur a été menée, révélant que les matériaux de construction locaux contribuent à une surchauffe excessive. En conclusion, des pistes d'amélioration sont proposées pour renforcer le confort thermique dans cette région. [28]

- **YETTOU Fatiha, 2019**

Dans le cadre de ses recherches, cette scientifique a développé un programme informatique permettant le dimensionnement des chauffe-eau solaires. L'outil conçu offre une solution polyvalente, adaptée aussi bien aux installations individuelles que collectives, tout en intégrant une fonctionnalité d'estimation des coûts et du temps de retour sur investissement.

La démarche méthodologique a comporté deux phases principales :

1. Une revue approfondie de la littérature scientifique sur le sujet.
2. Le développement algorithmique basé sur des données de rayonnement solaire spécifiques à l'Algérie, couplé à un module d'analyse économique adapté au contexte local.

L'originalité de ce travail réside dans sa double contribution :

- Technique : par la création d'un outil fiable et performant.
- Économique : en favorisant des solutions énergétiques à coût maîtrisé.

Les tests de validation ont confirmé la robustesse du logiciel et le respect intégral des objectifs initiaux. Bien que les résultats obtenus s'avèrent concluants, ils ne représentent qu'une première étape dans un champ de recherche beaucoup plus vaste, ouvrant des perspectives intéressantes pour le développement des énergies renouvelables en Algérie. [29]

- **ZIANI Rahima , MOUEDDEN Maroua, 2020**

Le chauffage solaire offre de nombreux avantages, notamment l'utilisation d'une énergie gratuite et inépuisable pour couvrir divers besoins domestiques : chauffage de l'habitat, production d'eau chaude sanitaire et même chauffage de piscine.

L'objectif de cette étude est de réaliser une analyse bibliographique approfondie sur l'exploitation de l'énergie solaire pour le chauffage de l'eau et l'intégration de capteurs solaires thermiques dans différents systèmes de chauffage. Ensuite, une simulation sera menée pour évaluer plusieurs configurations de systèmes solaires combinés, notamment :

- Systèmes à stockage
- Systèmes à circulation forcée
- Couplage avec des énergies conventionnelles
- Chauffage solaire direct

Pour cette étude, deux types de bilans seront analysés à l'aide du logiciel GET SOLAR :

1. **Bilan énergétique** : évaluation de la performance et de l'efficacité du système.
2. **Bilan écologique** : analyse de l'impact environnemental et des économies en émissions de CO₂.

Cette approche permettra de comparer les différentes solutions et d'identifier les configurations les plus performantes sur les plans énergétique et écologique. [30]

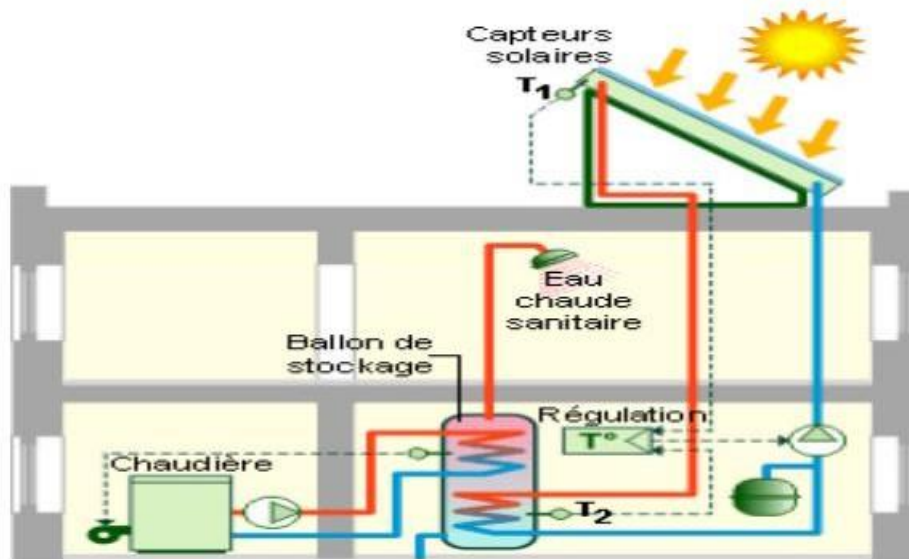


Figure II.3 : Principe de fonctionnement (capteurs solaires thermiques)

- **SLYEMI Amina ,2020**

Les bâtiments à haute performance énergétique constituent aujourd'hui la solution optimale pour minimiser la consommation d'énergie et réduire l'empreinte carbone. Parmi les solutions disponibles, les systèmes solaires combinés se distinguent par leur capacité à assurer simultanément la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des espaces.

Notre étude s'est focalisée sur l'évaluation des besoins énergétiques d'un tel système appliqué à un habitat innovant situé à Souidania. Pour ce faire, nous avons adopté une méthodologie rigoureuse combinant :

1. L'utilisation du Document Technique Réglementaire (DTR C3.2/4) pour :
 - Déterminer les besoins en chauffage.
 - Vérifier la conformité aux normes thermiques en vigueur.
2. L'application de la méthode analytique pour quantifier les besoins en eau chaude sanitaire
3. La validation des résultats par simulation thermique sous TRNSYS, permettant ainsi de confirmer et d'affiner les données obtenues par approche analytique.

Cette approche multidimensionnelle garantit une évaluation précise des performances énergétiques tout en respectant les exigences réglementaires actuelles. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité technique et économique de ces solutions durables pour le secteur résidentiel. [31]

- **CHERIEF Siham ,2021**

Ce travail porte sur l'étude du comportement thermique du deuxième étage du nouvel hôpital de TOUGGOURT 240 lits dans le but de minimiser les déperditions thermiques de l'état et procurer un confort thermique aux patients .Ainsi l'intégration du solaire thermique qui est un système écologique propre afin de répondre aux besoins en eau chaude sanitaires de 40 personnes au deuxième étage (comporte l'administration et une unité d'hospitalisation) pour réduire la consommation énergétique totale de l'hôpital ainsi que sa facture énergétique. En premier lieu on a calculé les déperditions thermiques et effectuer un bilan thermique pour vérifier la conformité de l'étage à la réglementation thermique du bâtiment, puis on a apporté des modifications au niveau de l'isolation des parois (plancher haut intermédiaire) afin d'optimiser le confort thermique. Ensuite on a modélisé le comportement de ce bâtiment à l'aide du logiciel pléiade confi 2.3 et discuter les résultats obtenus de la simulation numérique. Enfin, on a intégré des capteurs thermiques plans pour la production d'eau chaude sanitaire pour réduire la facture énergétique de l'hôpital et minimiser la consommation énergétique dans le cadre de la transition énergétique. [32]

- **BOUMEDIENE Ahlem et BOUALEM Abdelali, 2021**

L'objectif de cette étude est de dimensionner l'installation en optimisant les paramètres liés à la demande, afin d'obtenir un système de chauffe-eau solaire correctement calibré. Le dimensionnement est réalisé à l'aide du logiciel T*SOL, et les résultats sont présentés sous forme de graphiques illustrant les variations des différents paramètres. Enfin, nous avons utilisé le modèle du capteur pour analyser l'impact des paramètres opérationnels sur son rendement. [33]

- **BENZAZA Zohir , AHMED BENCHAID Abdel sami, 2021**

Cette étude s'est intéressée à l'efficacité énergétique en Algérie et à l'intégration des énergies solaires photovoltaïque et thermique dans les bâtiments, dans une perspective de ville durable (*green city*). Pour concrétiser cet objectif, une étude de cas a été menée à l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, avec la conception d'un système photovoltaïque autonome et d'une installation solaire thermique destinés à couvrir les besoins en éclairage et en eau chaude sanitaire de l'établissement. Les performances de l'installation photovoltaïque ont été simulées à

l'aide du logiciel PVSYSSTM, tandis que celles du système thermique ont été évaluées avec RETSCREEN. [34]

- **COULIDIATI Fabrice, 2022**

Dans l'objectif de limiter le recours aux énergies fossiles, cette étude présente un système hybride combinant énergie solaire et biomasse pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) destinée à une communauté isolée. Les résultats montrent que les méthodes de production d'ECS utilisant le solaire et la biomasse sont bien maîtrisées et qu'un tel système hybride est réalisable. Une méthodologie détaillée pour concevoir ce type d'installation a également été exposée.

Le logiciel DH-calc_2-02b a permis d'estimer précisément la demande en ECS en intégrant les habitudes de consommation. Ensuite, TRNSYS a été utilisé pour la modélisation, laquelle repose sur un système de production d'ECS alimenté par l'énergie solaire thermique, avec une chaudière à biomasse en appoint pour le chauffage de l'eau. Les résultats ont été analysés à l'aide de Pyscripter.

Par ailleurs, une comparaison avec trois études portant sur la production d'ECS solaire a été réalisée, en se basant notamment sur la fraction solaire. Ces comparaisons ont validé l'efficacité du système proposé. Toutefois, certaines pistes restent à explorer, comme une analyse économique pour déterminer le temps de retour sur investissement, ainsi qu'une étude expérimentale permettant de confronter les simulations TRNSYS aux données réelles. [35]

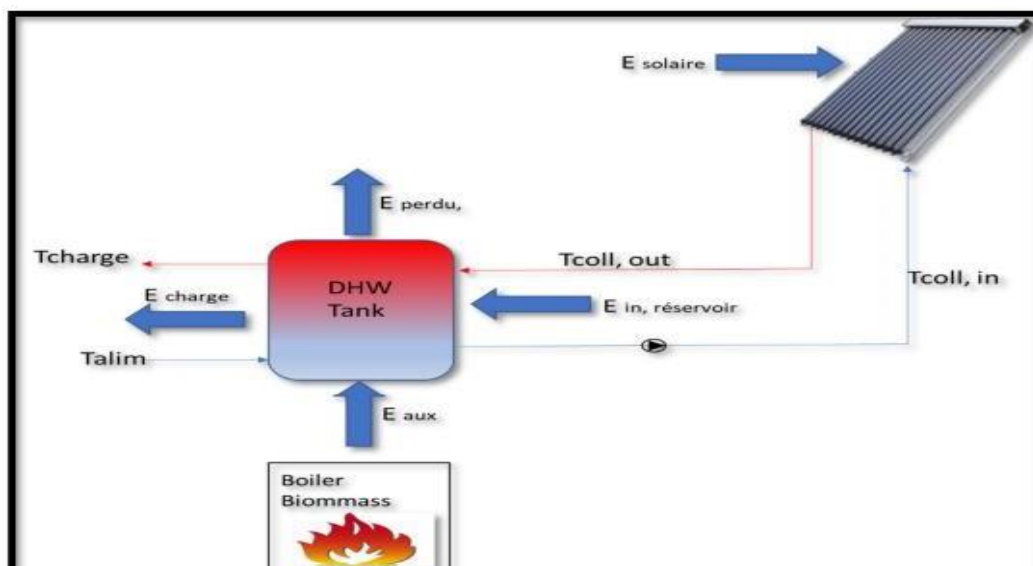


Figure II.4 : Système de production d'ECS avec Solaire bilan énergétique

- **BADA mohammad Ouahid_ TOUATI Ahmed Aineddine ,2023**

Ce travail vise à optimiser une installation solaire collective de production d'eau chaude en développant un modèle sous Ansys Fluent, puis en le validant par une étude expérimentale en laboratoire, offrant ainsi une méthodologie rigoureuse. Son application concrète est illustrée par son implantation future dans une ferme aquacole à Touggourt. L'établissement d'un bilan énergétique complet et la confrontation des résultats numériques avec les données expérimentales renforcent la fiabilité du modèle proposé. La conception d'un système solaire efficace, combinant performance énergétique et réduction des émissions de gaz à effet de serre, constitue une avancée pertinente. Pour toute question ou discussion complémentaire sur ce projet, je reste à votre disposition. [36]

- **ABBASSI Fatima, 2023**

Cette thèse explore la modélisation numérique du comportement thermique d'un habitat situé en zone désertique, dans le but d'optimiser le confort thermique. Pour y parvenir, nous avons d'abord modélisé les transferts de chaleur liés à l'écoulement d'eau chaude dans une conduite rectangulaire, en résolvant numériquement les équations de Navier-Stokes et de l'énergie thermique. Ces équations ont été discrétisées via une méthode implicite aux différences finies, puis résolues à l'aide des algorithmes de Gauss et Thomas.

Dans un second temps, nous avons appliqué la même approche pour simuler la conduction thermique dans une dalle en béton. Par ailleurs, les échanges thermiques au sein d'un modèle d'habitat, représenté comme une cavité parallélépipédique, ont été analysés en établissant des bilans énergétiques pour chaque paroi, intégrant les phénomènes de convection, conduction et rayonnement.

Les modèles développés ont été validés à partir de données climatiques récentes, collectées par l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar. Une étude approfondie des paramètres géométriques et thermiques influençant le confort intérieur a été menée, révélant que les matériaux de construction locaux contribuent à une surchauffe excessive. En conclusion, des pistes d'amélioration sont proposées pour renforcer le confort thermique dans cette région. [37]

- **MAXENCE Piron, 2024**

Cette étude se concentre sur l'établissement d'un modèle de consommation énergétique pour un bâtiment résidentiel typique en Wallonie, sélectionné parmi ceux examinés par le projet COZEB ayant recensé le parc immobilier wallon. L'analyse distingue trois types de consommation : chauffage, électricité et eau chaude sanitaire. Les besoins en chauffage sont évalués à l'aide

du logiciel TRNSYS, permettant de calculer la demande énergétique en intégrant tous les paramètres techniques et d'usage du bâtiment. Les consommations électriques et en eau chaude sanitaire, quant à elles, sont déterminées à partir de données issues de littérature blanche et grise, afin d'établir un profil hebdomadaire extrapolé sur l'année. Par ailleurs, la production photovoltaïque est simulée via TRNSYS. Ces données de consommation et de production sont ensuite analysées et optimisées pour évaluer l'utilité d'un système de gestion énergétique domestique. L'ajout de panneaux solaires permet notamment de décaler l'utilisation de certains appareils vers des périodes plus favorables. Les bénéfices de ces optimisations se concrétisent par une augmentation de l'autoconsommation. L'hypothèse de départ est qu'un système de gestion de l'énergie présenterait un avantage significatif pour les ménages. [38]

- **ZAYED Djalil , DIF Mohamed Nadir, 2024**

Ce travail vise à produire de l'eau chaude sanitaire grâce à l'énergie solaire. Un système classique se compose de quatre éléments clés : la collecte, le stockage, l'appoint et la distribution. La surface des capteurs solaires doit être adaptée à la demande en eau chaude des utilisateurs, tandis que la conception du système doit limiter les déperditions thermiques et réduire la dépendance à une source d'appoint.

Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire repose sur plusieurs phases. Les capteurs convertissent le rayonnement solaire en chaleur au moyen d'un absorbeur, généralement recouvert d'une couche sombre. Cette énergie thermique est transmise à un fluide caloporteur, souvent un mélange eau-glycol, qui circule dans les capteurs. Dès que l'écart de température entre la sonde du capteur (T_1) et celle du ballon de stockage (T_2) atteint quelques degrés, la pompe se met en marche. Le fluide transporte alors la chaleur vers un ou plusieurs réservoirs via un échangeur thermique. Ces ballons accumulent l'énergie thermique captée. Si la température souhaitée n'est pas atteinte, un système d'appoint prend le relais pour chauffer l'eau préchauffée avant sa distribution aux points d'usage. Une unité de contrôle électronique pilote l'ensemble du système, déclenchant la circulation du fluide et l'appoint en fonction de l'ensoleillement et de la demande. [39]

II.3 Conclusion

La revue bibliographique de la simulation de l'intégration des capteurs solaires à l'alimentation en chaleur des bâtiments et à la production d'eau chaude sanitaire met en évidence le rôle de la modélisation dans l'optimisation des performances des systèmes. Les études consultées donnent en avant le rôle des simulations dans le choix des configurations l'adaptation aux conditions climatiques et l'amélioration de l'efficacité énergétique.ces apports constituent une base pertinente pour la suite du travail de mémoire.

III. Chapitre 03 : simulation d'une installation SSC sur T*sol

III.1 Introduction

L'énergie solaire thermique représente aujourd'hui une solution efficace et durable pour couvrir les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire des bâtiments.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les principes de base du chauffage solaire, les différents types d'installations existantes ainsi que leurs composants essentiels.

Nous abordons ensuite la méthode de dimensionnement, les lois utilisées, et l'utilisation du logiciel T*SOL comme outil d'aide à la conception et à l'optimisation. Cette approche vise à garantir une conception cohérente, performante et adaptée aux besoins énergétiques spécifiques.

III.2 Captage de l'énergie solaire

La récupération de l'énergie solaire repose sur des principes distincts selon que l'objectif soit la production de chaleur ou d'électricité. Les toits dits « bleus » (photovoltaïques) et « noirs » (thermiques) illustrent parfaitement ces deux approches, qui diffèrent non seulement par leurs technologies, mais aussi par les savoir-faire et les matériaux qu'elles mobilisent. En effet, l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque constituent deux filières renouvelables indépendantes, chacune requérant des compétences spécifiques et des composants adaptés à leur fonctionnement. [40]

III.3 Récupération de la chaleur du soleil

En été, chacun l'a constaté : un simple tuyau d'arrosage exposé au soleil peut restituer quelques litres d'eau tiède une fois vidé. Pour optimiser ce dispositif, on commence par peindre le tuyau en noir : contrairement à une surface colorée qui réfléchit une partie du rayonnement incident, un revêtement noir absorbe presque toute la lumière et convertit cette énergie en chaleur. Toutefois, une fois accumulée, cette chaleur tend à se dissiper sous forme d'ondes infrarouges vers l'extérieur. C'est là qu'intervient le vitrage : un vitrage classique bloque le rayonnement infrarouge tout en laissant passer le spectre visible, piégeant ainsi la chaleur à l'intérieur du capteur.

À l'arrière, où la transparence n'est pas requise, on applique un isolant (laine minérale, mousse haute performance, etc.) afin de limiter les pertes thermiques. Enfin, le fluide caloporteur assure l'extraction et le transport de la chaleur : froid à l'entrée du circuit, il circule dans le panneau, se réchauffe progressivement, puis évacue cette énergie vers le système de stockage ou de consommation une fois sorti du capteur. [40]

III.4 Structure fondamentale d'une installation solaire thermique

L'élément principal d'une installation thermique solaire est le capteur ou l'absorbeur qui transforme l'énergie solaire en chaleur et l'achemine vers un ballon à travers des conduites et un échangeur de chaleur avec un fluide caloporteur. Lorsqu'il s'agit d'installations de préparation d'eau chaude et le chauffage, le ballon compense les variations journalières entre l'offre d'énergie et le besoin en énergie.

Dans le cas des installations solaires de grande taille qui doivent également contribuer dans une grande proportion à la fourniture d'énergie de chauffage, on utilise généralement dans le cadre d'un système de chaleur de proximité un ballon saisonnier souterrain qui est capable de compenser les variations constatées au cours de l'année entre le rayonnement disponible et la demande d'énergie. Ces systèmes d'alimentation saisonniers sont en cours d'expérimentation et ne seront pas considérés ici. Lorsque l'énergie solaire disponible n'est pas suffisante, la quantité d'énergie manquante pour couvrir les besoins est obtenue à l'aide d'un système de chauffage d'appoint.

Un dispositif de commande ou de régulation surveille l'état de fonctionnement de l'installation solaire et veille à une utilisation la plus efficace possible du rayonnement disponible. En cas de différence de température entre le ballon et le capteur, ce dispositif active la pompe de circulation dans le circuit du capteur et assure ainsi l'acheminement de la chaleur vers le ballon. [41]

III.5 Principe de fonctionnement des différents composants d'une installation solaire thermique

III .5.1 Le capteur solaire

Un capteur solaire est un dispositif conçu pour récupérer le rayonnement solaire et le transformer en chaleur, qu'il transmet ensuite à un fluide caloporteur. Son fonctionnement repose sur l'effet de serre : le rayonnement solaire, dans les longueurs d'onde comprises entre $0,78 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$ (visible et proche infrarouge), traverse une vitre et est piégé à l'intérieur, où il est absorbé par une surface sélective. Cette dernière réémet un rayonnement thermique à des longueurs d'onde plus élevées (entre $4 \mu\text{m}$ et $30 \mu\text{m}$) que le verre bloque totalement. La paroi vitrée s'échauffe alors et émet une partie de cette énergie vers l'absorbeur et l'autre vers l'extérieur. Enfin, le fluide caloporteur circulant sous l'absorbeur récupère par convection cette chaleur, ce qui élève sa température au passage dans le capteur. [42]

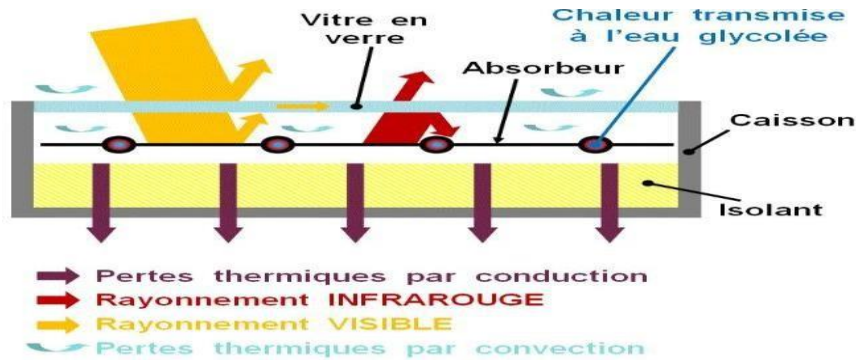


Figure III. 1 : fonctionnement d'un capteur solaire thermique [51]

a. Vitrage

La vitre solaire avec une grande transmission lumineuse, optimise les rendements solaires et résiste aux intempéries. [43]

➤ Pertes par rayonnement

Les vitres utilisées dans les capteurs plans laissent passer le rayonnement solaire incident (fonction 1) avec un facteur de transmission λ très élevé (0.85), mais ils sont opaques au rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur porté à la température de 35 à 100°C (longueur d'onde $>20 \mu\text{m}$).

Dénoté « effet de serre », ce processus s'appuie sur la couverture vitrée dont la face interne capte le rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur. En se réchauffant, cette face réémet à son tour de la chaleur, répartie pour moitié vers l'extérieur et pour moitié vers l'absorbeur. Ainsi, les pertes par rayonnement sont réduites de 50 % dans le bilan thermique global. Bien qu'il soit théoriquement possible de diminuer encore ces déperditions en superposant plusieurs vitrages, on se limite en pratique au double vitrage, pour deux raisons majeures :

- La transmission de l'énergie est significativement atténuée (coefficient de transmission $\lambda \approx 0,65$ pour un double vitrage).
- Le coût d'investissement et d'exploitation devient prohibitif au-delà de deux couches de verre. [43]

➤ Pertes par convection

La couverture transparente limite également les pertes par convection. L'air est l'un des meilleurs isolants; on piège de l'air dans le polystyrène, sous réserve que la lame d'air n'ait pas

une épaisseur supérieure à 3 cm, au-delà, des phénomènes convectifs interviennent. Dans la pratique, on adopte 3 cm entre l'absorbeur et la couverture, de façon à garder l'échange par conduction en considérant l'air immobile. Pour limiter les pertes de couverture, on peut recouvrir la face interne de celle-ci d'une couche réfléchissante qui renvoie l'infrarouge venant de l'absorbeur. [43]

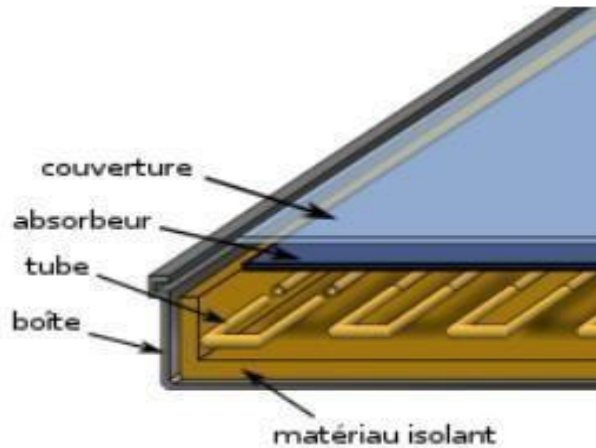


Figure III. 2: La couverture transparente d'un capteur solaire. [52]

b. Absorbeur

L'absorbeur est un composant d'un capteur thermique tel un panneau solaire qui a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, et de le convertir en chaleur via un fluide caloporteur dans le but de réaliser un gain d'économie d'énergie. L'absorbeur est généralement un corps noir absorbant le rayonnement du soleil lié mécaniquement ou dans la même structure à un réseau irriguant de l'eau. Il peut prendre la forme d'une plaque de métal, d'un serpentin vitré ou non, d'un tube sous vide, d'une bâche en plastique, ou d'un simple réservoir en plastique/métal.

Deux fonctions incombent à l'absorbeur :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible
- Transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes. [44].

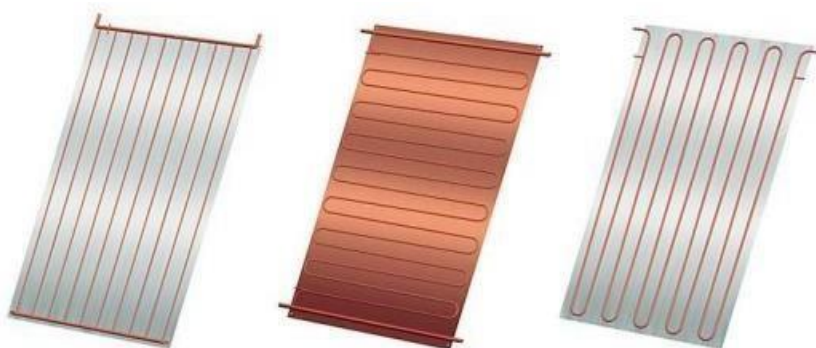


Figure III. 3: Les différents modèles, types et matériaux des absorbeurs [53]

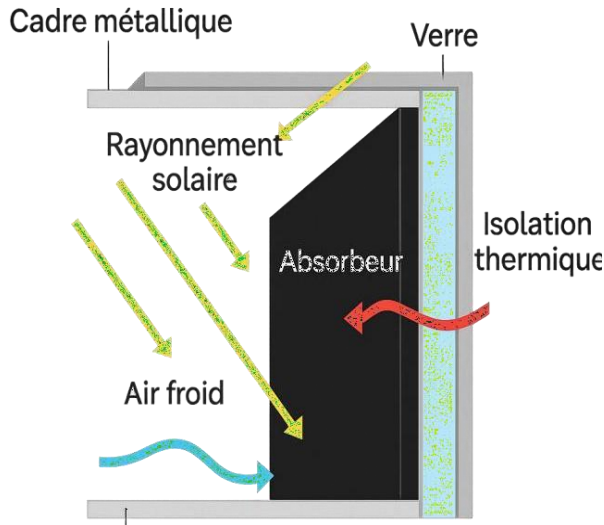


Figure III. 4: Schéma d'un absorbeur plan

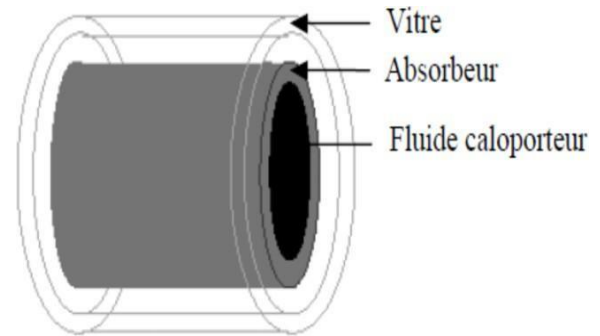


Figure III. 5: schéma d'un élément du tube absorbeur [54]

c. Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur circule dans le circuit primaire de l'installation, c'est-à-dire entre les capteurs solaires et le boiler. Plusieurs types de fluides peuvent être employés (eau, glycol, etc.), mais il est important de tenir compte du risque de gel, particulièrement en hiver, puisque les capteurs sont exposés aux températures extérieures. Pour éviter ce problème, on privilégie généralement un fluide capable de résister à des températures allant jusqu'à -20°C dans nos régions. Une autre solution consiste à utiliser de l'eau, à condition de s'assurer que les parties vulnérables de l'installation soient entièrement vidangées pour prévenir tout risque de gel. [45]

o Entrée du caloporteur

Le caloporteur froid s'écoule dans les tubes de circulation pour absorber l'énergie solaire piégée dans le capteur.

o Sortie du caloporteur

Le caloporteur qui sort du capteur à une température élevée (pouvant atteindre 80°C environ), est stocké ou utilisé immédiatement [43]

d. L'isolation thermique arrière et latérale

L'isolation thermique est intégrée à l'intérieur du boîtier du capteur, à l'arrière et sur les côtés. Elle sert à limiter les pertes de chaleur vers l'extérieur, améliorant ainsi le rendement global du capteur. Elle est généralement constituée de laine minérale ou de mousse rigide, avec une épaisseur de 30 à 60 mm.

e. Le coffre du capteur

C'est une structure sous forme de cadre qui consolide l'ensemble. [43]

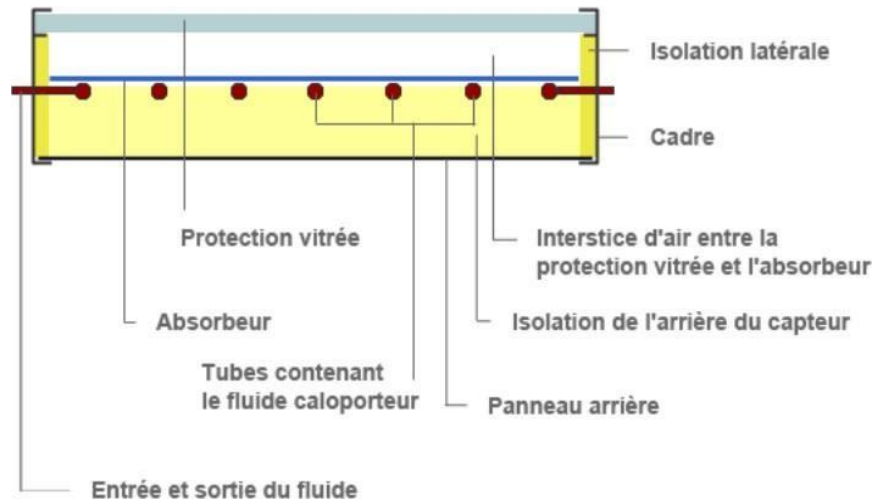


Figure III. 6: Composants d'un capteur plan vitré [55]

III.5.2 La tuyauterie

La tuyauterie joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement d'une installation solaire thermique. Elle permet d'acheminer le fluide caloporteur entre les capteurs solaires, le ballon de stockage et, le cas échéant, les dispositifs de chauffage (plancher chauffant, radiateurs, etc.). Ce circuit hydraulique, généralement fermé, inclut également des éléments comme les pompes, les échangeurs thermiques et les vases d'expansion.

Une conception optimisée du réseau de tuyaux est primordiale pour assurer une circulation fluide et limiter les pertes de charge. Il est recommandé d'adopter un circuit aussi direct que possible, sans longueurs inutiles ni changements de diamètre, afin d'améliorer le rendement global du système.

Enfin, toutes les canalisations doivent être soigneusement isolées thermiquement, en particulier dans les zones non chauffées, afin de minimiser les pertes de chaleur et de garantir une performance énergétique optimale.

III.5.3 Echangeur de chaleur

Il s'agit d'un mécanisme conçu pour faciliter l'échange de chaleur entre deux fluides, généralement isolés par une paroi étanche. Ce système est largement employé dans des applications

variées, où il intervient pour réaliser des fonctions telles que :

- Réchauffer ou refroidir un fluide grâce à un second fluide porteur (batteries chaudes/froides, évaporateur, condenseur, tour de refroidissement, etc.).
- Isoler deux réseaux de fluides afin d'éviter tout risque sanitaire ou corrosion (par exemple, chauffe-eau solaire, installations géothermiques).
- Préserver l'intégrité des réseaux en cas de pressions de service distinctes, comme dans les systèmes de chauffage urbain. (46)

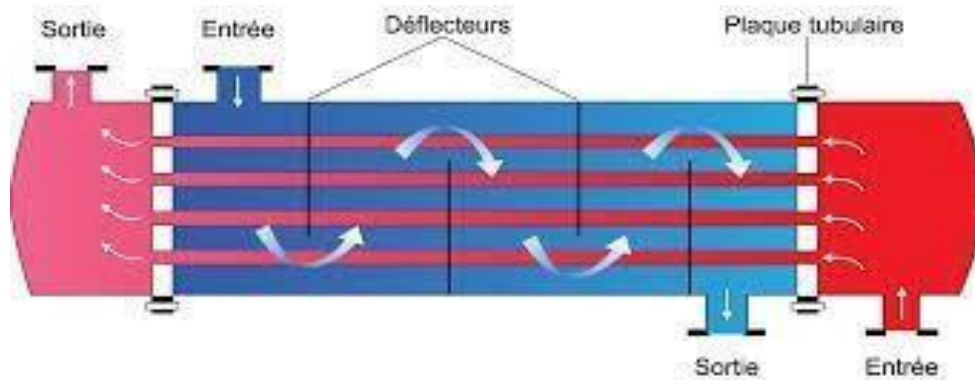


Figure III.7 : échangeur chaleur thermique

- L'échangeur pour cuve : serpentin interne, serpentin externe et double enveloppe

Que ce soit pour chauffer et stocker de l'eau chaude sanitaire ou un liquide de processus, l'utilisation de cuve munie d'un échangeur intégrée est souvent une option valable. Bien sûr c'est aussi le cas lorsqu'on veut refroidir le contenu de la cuve.

Pour cela, en fonction de nombreux critères de décision, le choix peut se porter vers plusieurs techniques. Dans tous les cas, la cuve ayant une fonction de stockage, il faut penser à l'isoler. C'est la base pour conserver la chaleur et limiter les consommations d'énergie.

Le serpentin interne permet de faire circuler un fluide thermique (chaud ou froid), directement au contact du liquide que l'on veut chauffer ou refroidir, pendant le stockage de celui-ci dans la cuve. C'est très efficace, mais complexe en termes de fabrication puisqu'il faut faire rentrer le serpentin dans la cuve avant de la fermer. L'idée du serpentin externe permet de contourner la difficulté de mise en œuvre.

Cependant, comme le fluide thermique n'est pas directement en contact avec le liquide, l'efficacité de l'échange est moins bonne. Une bonne isolation est ici encore plus importante, puisque la source

de chaleur ou de froid est à l'extérieur de la cuve, au plus près de l'air ambiant.

Le principe de la double peau est similaire à celui du serpentin externe. La différence est simplement que le circuit du liquide thermique n'est pas canalisé, mais que celui-ci s'écoule « librement », sur toute la surface extérieure de la cuve. On retrouve beaucoup ce type d'échangeur en industrie agroalimentaire, en général associé avec une fonction de mélange ou de malaxage dans la cuve. [47]

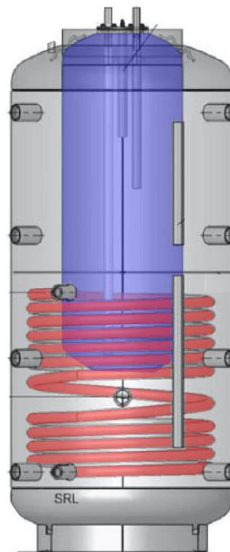


Figure III. 8: échangeur serpentin dans un ballon de stockage

III.5.4 Système de stockage

Le choix d'un ballon de stockage d'eau chaude sanitaire dépend du besoin. Cependant, il doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Matériau résistant à la corrosion et aux hautes températures généralement en acier inoxydable.
- Avoir une bonne stratification (variation de la masse volumique en fonction de la température) interne des températures.
- Bonne isolation thermique afin d'éviter les pertes thermiques.
- Une dimension adaptée aux besoins. Dans le cadre de ce mémoire, il a été question de recenser les différents de stockage existant sur le marché ainsi que leurs particularités.

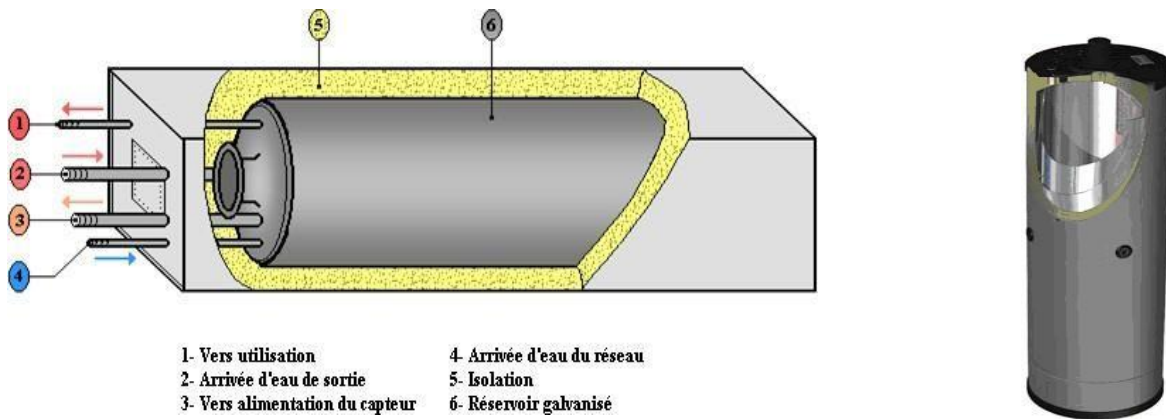


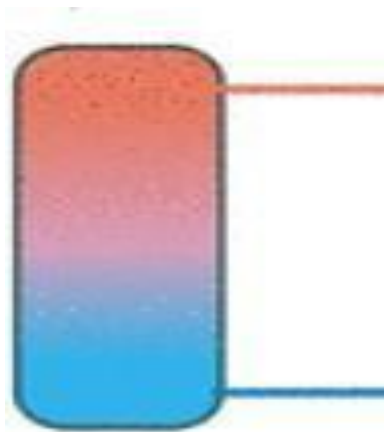
Figure. III. 9: ballon de stockage.

➤ Ballon de stockage sans échangeur

Ce réservoir est spécifiquement conçu pour stocker directement l'eau sanitaire à chauffer. L'énergie thermique captée par les capteurs solaires est transférée au liquide soit par conduction via une résistance électrique immergée, soit via un échangeur intégré au circuit primaire. Bien que cette configuration offre une solution économique et facile à installer, elle exige l'utilisation d'un fluide caloporteur compatible avec les normes sanitaires (eau potable ou glycol alimentaire), sous peine de provoquer des phénomènes de corrosion accélérée ou de contamination microbiologique.

En raison de ces contraintes techniques, ce système est principalement déployé sous forme d'unités monoblocs (circuit fermé et réassemblé), adaptées aux régions bénéficiant de climats tempérés. Son application reste limitée dans les zones à forts écarts thermiques, où les risques de gel ou de surchauffe compromettent sa durabilité.

○ Types de Réservoirs de Stockage sans échangeurs



○ Ballon tampon : Le ballon tampon est un réservoir de stockage thermique conçu pour accumuler l'énergie destinée au chauffage du bâtiment. Il permet de lisser les variations de la production thermique, évitant ainsi les cycles courts des générateurs de chaleur (comme les chaudières ou les pompes à chaleur). Ce réservoir n'est pas en contact direct avec l'eau sanitaire et sert uniquement à stocker l'eau chaude du circuit de chauffage, améliorant ainsi la performance et la durabilité de l'installation.

Figure III. 10: Ballon solaire sans échangeur

➤ **Ballon de stockage avec échangeur**

Dans le dispositif étudié, le ballon est équipé d'un échangeur thermique intégré directement à la cuve. Cet échangeur, généralement conçu en serpentin d'acier ou de cuivre, est placé à l'intérieur du réservoir. Le fluide caloporteur, chauffé par les capteurs solaires, circule à travers cet échangeur sans jamais entrer en contact avec l'eau sanitaire, évitant ainsi tout mélange. La chaleur est transférée par conduction à travers les parois métalliques de l'échangeur. [48]

➤ **Types de Réservoirs de Stockage avec échangeurs**

○ Réservoirs à simple serpentin :

Utilisés pour des systèmes solaires simples où un seul échangeur de chaleur est suffisant.

○ Ballon bivalent (réservoir à double serpentin) :

Il s'agit d'un réservoir doté de deux échangeurs de chaleur indépendants : l'un connecté aux capteurs solaires pour récupérer l'énergie thermique renouvelable, et l'autre à un système d'appoint (comme une chaudière ou un dispositif électrique), garantissant ainsi la couverture complète des besoins en eau chaude sanitaire, même en absence de rayonnement solaire suffisant.

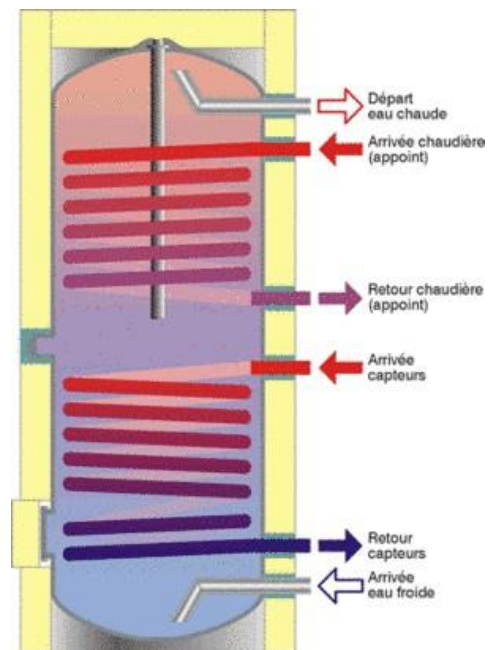


Figure III. 11: Ballon solaire avec échangeur

○ Réservoirs avec stratification améliorée :

Conçus pour optimiser la stratification thermique, avec des dispositifs internes pour contrôler les flux d'eau et améliorer l'efficacité du chauffage.

III.5 Un système d'appoint (chaudière)

Une chaudière peut être utilisée comme source principale ou de secours, notamment lorsque l'énergie solaire disponible est insuffisante pour couvrir pleinement les besoins en chauffage du bâtiment et en production d'eau chaude sanitaire (ECS). Le choix du type de chaudière dépend de la capacité nécessaire, de l'efficacité énergétique, du combustible disponible, ainsi que des exigences liées aux deux usages. Parmi les options courantes, on trouve :

➤ **Chaudière à gaz :**

Fonctionnant au gaz naturel ou au propane, ces chaudières sont largement utilisées pour leur efficacité et leur coût d'exploitation réduit. Elles interviennent en complément du solaire pour assurer le chauffage et l'ECS quand le rayonnement est faible.

➤ **Chaudière électrique :**

Alimentées par l'électricité, elles représentent une solution pratique en l'absence d'accès au gaz. Elles peuvent prendre le relais pour le chauffage et l'eau chaude lorsque le solaire ne suffit pas.

➤ **Chaudière à fioul :**

Bien que moins répandues aujourd'hui pour des raisons environnementales, ces chaudières sont encore utilisées dans certaines régions comme source d'appoint, avec un stockage de combustible nécessaire.

➤ **Chaudière mixte :**

Ce type d'équipement polyvalent produit simultanément chauffage et ECS, assurant un appoint fiable en cas de déficit d'énergie solaire.

➤ **Positionnement de l'appoint**

Quatre configurations possibles :

- **Intégré** au ballon de stockage
- **En série** avec le stockage
- **En parallèle** avec le stockage
- **Indépendant** du système solaire

III.6 Le chauffe-eau solaire

Le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire est simple. Des panneaux solaires, installés généralement en toiture, transforment la lumière du soleil en chaleur. Un circuit hydraulique permet de ramener cette chaleur dans un ballon, où l'eau chaude sanitaire est stockée en attendant d'être utilisée.

Durant la journée, le soleil fait monter en température l'eau du ballon. Lorsque le soleil est trop

voilé (et la nuit) une régulation arrête la circulation entre les panneaux et le ballon. l'eau chaude, protégée par l'isolation du ballon, reste disponible plusieurs jours pour les usages domestiques.

Une source d'énergie complémentaire permet de pallier les périodes de mauvais ensoleillement prolongé. Elle se déclenche lorsque la température de l'eau dans le ballon descend en dessous d'une température de consigne.

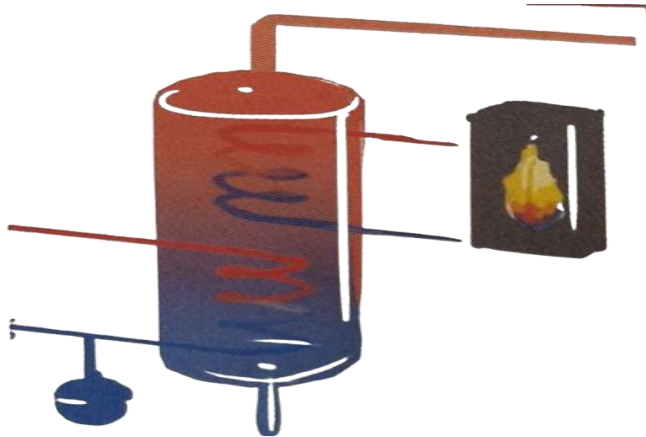


Figure III. 12: Schéma d'un ballon de stockage pour un chauffe-eau solaire couplé avec appoint

III .6.1 Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

Au lever du jour, les premiers rayons solaires commencent à incider sur les capteurs thermiques, provoquant une élévation progressive de la température de l'absorbeur. Cette chaleur est ensuite transmise au fluide caloporteur circulant dans les tubes du capteur. Lorsque la température du fluide dépasse celle de l'eau contenue dans la partie inférieure du ballon de stockage, le dispositif de régulation met en route la pompe de circulation. À ce moment, la zone inférieure du ballon est généralement occupée par de l'eau refroidie pendant la nuit ou par de l'eau froide récemment introduite à la suite d'un soutirage.

Le fluide chaud traverse alors l'échangeur thermique immergé, cédant une partie de son énergie thermique à l'eau sanitaire. Cette interaction entraîne une diminution modérée de sa température avant son retour vers les capteurs, où il est de nouveau chauffé. Grâce à la haute sensibilité du système de régulation différentielle, un simple écart de température de 1 à 3 °C suffit à maintenir la circulation.

Au fur et à mesure de la matinée, la température de l'eau au voisinage du serpentin augmente progressivement. Simultanément, le fluide caloporteur, rencontrant une eau de plus en plus chaude, perd moins de chaleur à chaque cycle et atteint des températures plus élevées sous l'effet de l'irradiation croissante. Vers midi, le fluide peut atteindre environ 50 °C, tandis que la température de l'eau dans la partie basse du ballon converge également vers cette valeur.

Lorsqu'une demande d'eau chaude intervient, celle-ci est soutirée au sommet du ballon, où la température est la plus élevée. Elle est immédiatement remplacée par de l'eau froide, qui se loge dans la partie inférieure, favorisant ainsi une stratification thermique stable. Cette eau fraîche est réchauffée efficacement au contact du serpentin traversé par le fluide chaud.

Dans l'après-midi, en cas d'ensoleillement continu, la température du fluide peut continuer à augmenter. Si elle dépasse un seuil critique — souvent fixé autour de 70 °C — la régulation suspend temporairement la circulation pour prévenir tout risque de surchauffe. Bien que la circulation soit arrêtée, les capteurs continuent d'absorber l'énergie solaire, ce qui accroît la température interne. Afin d'éviter l'ébullition, le circuit primaire est maintenu sous pression (typiquement 2 bars) et équipé d'un vase d'expansion permettant de compenser la dilatation du fluide, assurant ainsi la sécurité du système fermé.

En fin d'après-midi, si une nouvelle demande en eau chaude survient, la température du ballon peut chuter en dessous du seuil de déclenchement, entraînant une reprise momentanée de la circulation. Au coucher du soleil, la baisse de l'irradiation et l'augmentation de l'angle d'incidence provoquent le refroidissement progressif des capteurs. Lorsque la température du fluide caloporteur devient inférieure à celle de l'eau du ballon, la régulation stoppe définitivement la circulation jusqu'au lendemain.

Durant la nuit, le ballon subit une déperdition thermique lente à travers ses parois. Par effet de convection naturelle, l'eau refroidie migre vers le bas du réservoir, tandis que l'eau chaude reste en haut, prête à être utilisée dès le matin. Ce phénomène de stratification thermique naturelle permet d'optimiser la récupération d'énergie solaire dès les premières heures du jour. [40]

III .6.2 Les différents types de chauffe-eau solaires

Il existe de nombreux modèles de chauffe-eau solaires proposés par les fabricants. Le particulier qui souhaite réaliser une installation peut rapidement se trouver perdu parmi les nombreuses dénominations commerciales.

Le type de chauffe-eau, la capacité du ballon et la surface des panneaux solaires sont les trois caractéristiques principales d'une installation. Regardons pour l'instant chacune des quatre grandes familles de chauffe-eau. Dans la pratique, les chauffe-eau solaires appartiennent à l'un des quatre types suivants :

- Monobloc
- Thermosiphon
- Circulation forcée
- Auto vidange

a. Les chauffe-eau monobloc

Ce sont les chauffe-eau les plus simples : le ballon et le panneau solaire forment un seul ensemble, d'où leur appellation. C'est directement l'eau chaude sanitaire qui circule dans les panneaux. Réchauffée par le rayonnement solaire, l'eau devient moins dense et monte dans le ballon situé légèrement au-dessus du panneau. Il n'y a donc pas besoin de pompe.

Néanmoins, le ballon d'eau chaude doit être situé à proximité immédiate du panneau, en général sur la toiture ce qui pose parfois des problèmes d'esthétique et d'isolation : le chauffe-eau dépasse de la toiture, et le ballon est à l'extérieur du logement, en plein vent. [40]

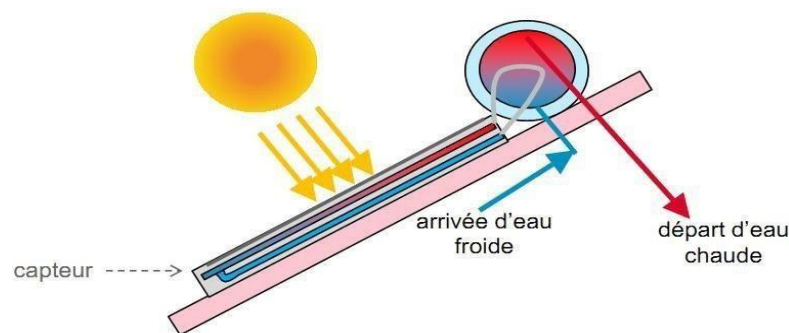


Figure III. 13 : schéma d'un chauffe-eau monobloc [56]

b. Les chauffe-eau à thermosiphon

Pour éviter les inconvénients du système monobloc, tout en conservant l'avantage d'un système simple, on peut séparer les panneaux du ballon d'eau chaude. Tant que les panneaux restent plus bas que le ballon de stockage, l'eau va pouvoir continuer à circuler naturellement par effet (thermosiphon). A la sortie du panneau, l'eau est plus chaude donc plus légère, et monte vers

le ballon. Elle est remplacée par l'eau la plus froide du ballon, qui est plus lourde et qui descend vers le bas des panneaux. Mais sous certains climats, on ne peut malheureusement pas faire circuler de l'eau dans les panneaux solaires l'année, à cause des risques de gel. Deux alternatives sont alors envisageables : les chauffe-eau à circulation forcée et fluide antigel, et les chauffe-eau à auto-vidange.

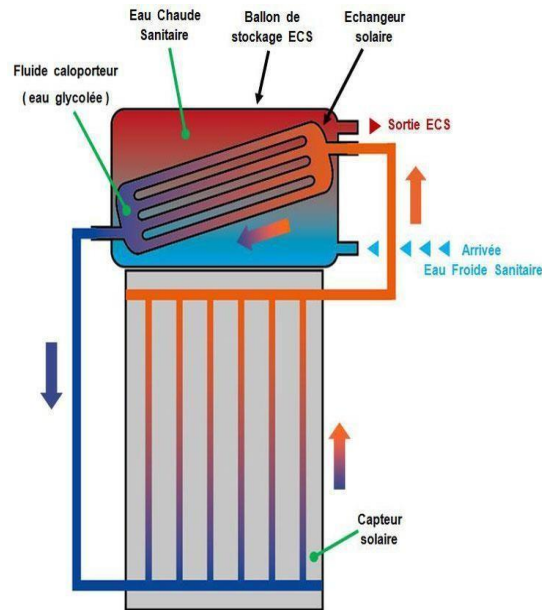


Figure III.14 : schéma d'un chauffe-eau thermosiphon [57]

c. Les chauffe-eaux à circulation forcée

Les panneaux solaires seront remplis avec un fluide qui ne craint pas le gel (en général de l'eau glycolée). Comme ce fluide est impropre à la consommation et ne doit pas être mélangé à l'eau chaude sanitaire, la chaleur sera récupérée dans le ballon à travers un échangeur. Un serpentin, à l'intérieur du ballon joue ce rôle et évite tout contact entre l'eau chaude et le fluide caloporteur. Une pompe assure le transfert du fluide entre les capteurs solaires et l'échangeur. Du coup, la position du ballon par rapport aux panneaux n'a pas d'importance.

d. Les chauffe-eaux à auto-vidange

Une alternative pour éviter le risque de gel est de vider les panneaux solaires en période de non-utilisation. C'est le principe des chauffe-eaux à auto vidange. Dans ce cas, le ballon est toujours situé plus bas que les panneaux solaires. Dès que le soleil ne chauffe plus, la circulation entre le ballon et les capteurs solaires s'arrête, et le circuit se vidange automatiquement. Les panneaux solaires et la partie de canalisation exposée au froid sont donc vides en cas de gel. Dès que l'ensoleillement reprend, la circulation se remet en route et circuit se remplit. [40]

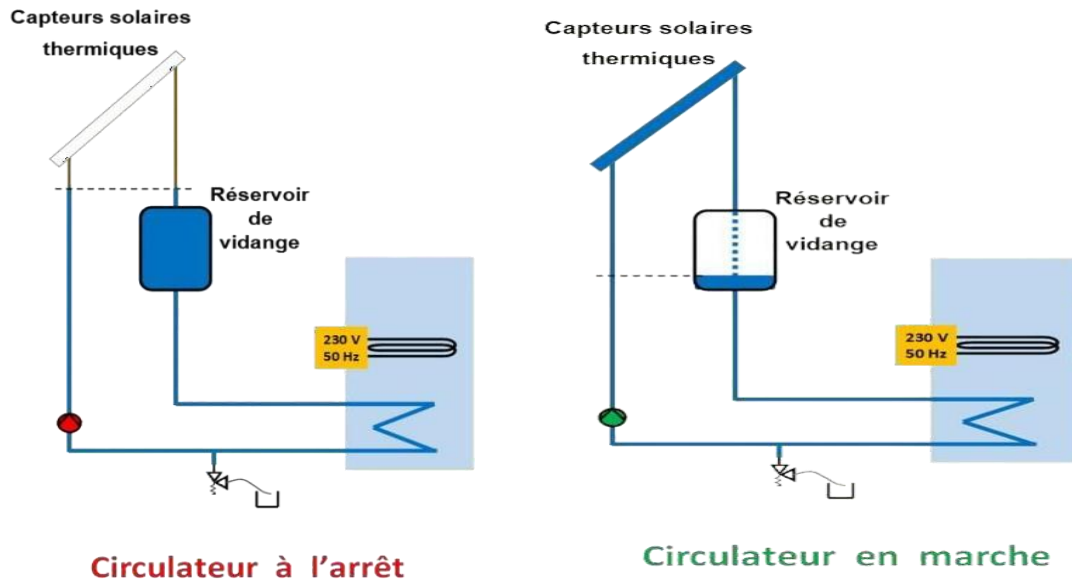


Figure III. 15 : schéma d'un chauffe-eau à auto vidange.

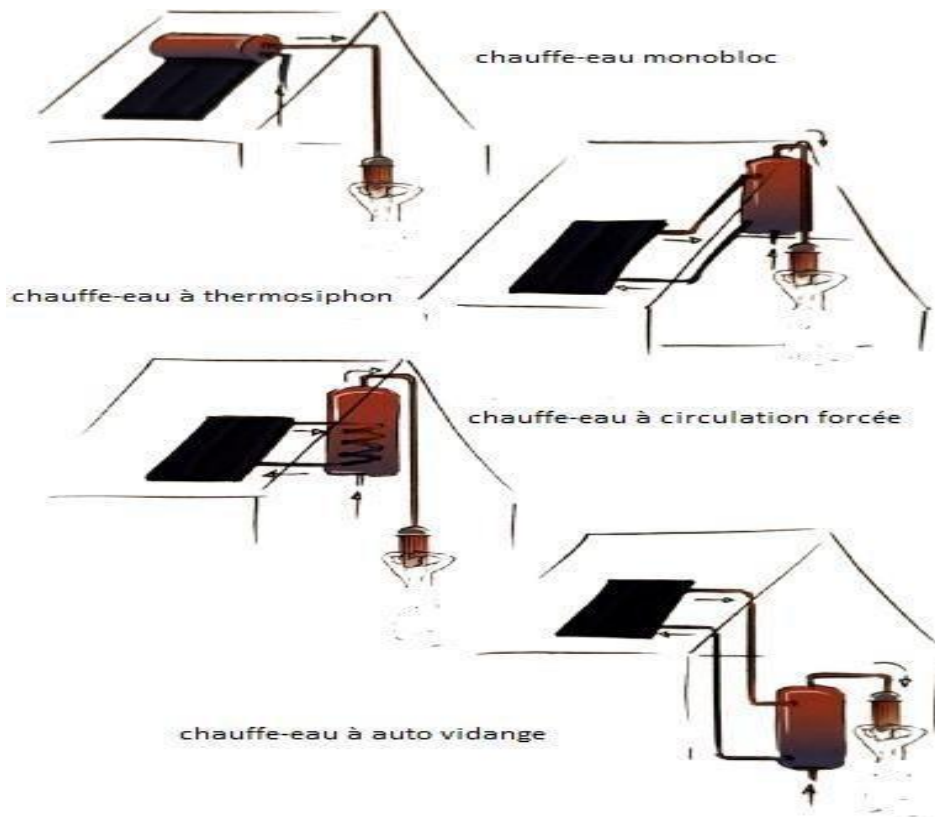


Figure III. 16 : les différents types de chauffe-eau solaire

III.7 Le chauffage solaire

Lorsqu'on observe le fonctionnement d'un système solaire pour la production d'eau chaude sanitaire, il devient tentant d'envisager une extension du principe au chauffage du logement. L'énergie thermique serait captée par une large surface de capteurs solaires installés en toiture, puis stockée dans un ballon de grande capacité destiné à couvrir simultanément les besoins en chauffage et en eau chaude domestique.

Les systèmes capables d'assurer à la fois le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire sont appelés systèmes solaires combinés ou SSC. Bien que séduisants en théorie, ces systèmes présentent plusieurs défis techniques à surmonter pour garantir une efficacité réelle. Le principal obstacle réside dans le décalage entre les besoins en chauffage et l'ensoleillement disponible : en hiver, la demande est élevée alors que l'apport solaire est limité, nécessitant un fort dimensionnement de la surface de capteurs. À l'inverse, en été, la production excède largement les besoins. De plus, comme la demande de chauffage est surtout nocturne, un stockage thermique important est nécessaire.

Un autre point complexe concerne les températures : pour satisfaire les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire en parallèle, il faut disposer d'eau à deux températures différentes. Cela conduit le plus souvent à l'emploi de deux ballons de stockage. Toutefois, l'usage d'un ballon unique reste possible grâce à un dispositif de régulation intelligent exploitant la stratification thermique verticale du stockage.

En définitive, concevoir un chauffage solaire efficace à partir de capteurs en toiture s'avère bien plus complexe que la mise en place d'un simple chauffe-eau solaire. On distingue principalement trois types d'installations représentatives : le plancher solaire direct, le système de chauffage solaire centralisé à fluide caloporteur, et le chauffage solaire à air [40].

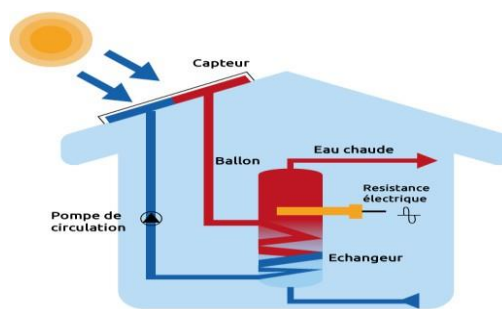


Figure III. 17 : schéma d'une installation d'un chauffage solaire

a. Le plancher solaire

Le plancher solaire est un mode de chauffage résidentiel basé sur le même principe que le plancher chauffant classique. Des capteurs solaires thermiques, installés en toiture, réchauffent un fluide caloporteur qui circule dans un réseau intégré à la dalle de béton du plancher. Les avantages de ce système sont nombreux : au lieu de stocker la chaleur dans un ballon d'eau chaude, la dalle, grâce à sa forte inertie thermique, accumule la chaleur et la restitue progressivement, notamment durant la nuit. De plus, la température de fonctionnement, faible dans le cas du chauffage par le sol basse température, permet aux capteurs solaires d'opérer à leur rendement optimal.

Cette technique, développée dans les années 1970 à l'École Supérieure d'Ingénieurs de Marseille, a été initialement diffusée par la société Clipsol sous le nom de « plancher solaire direct ». Plus de 3500 maisons en France sont équipées de ce type d'installation. Étant donné que les besoins en chauffage d'un logement sont bien supérieurs à ceux d'un simple chauffe-eau, il est nécessaire de prévoir une surface de capteurs beaucoup plus importante. Pour un logement individuel en métropole, les surfaces de panneaux se situent typiquement entre 20 et 30 m².

Comme les besoins en chauffage sont concentrés en hiver et en demi-saison, l'inclinaison des panneaux est généralement plus prononcée que pour un chauffe-eau, afin d'optimiser les apports solaires hivernaux. Même bien dimensionné, il est fréquent que le chauffage solaire soit complété par une source d'énergie d'appoint, comme une chaudière bois ou gaz de faible puissance, pour pallier les périodes de faible ensoleillement [40].

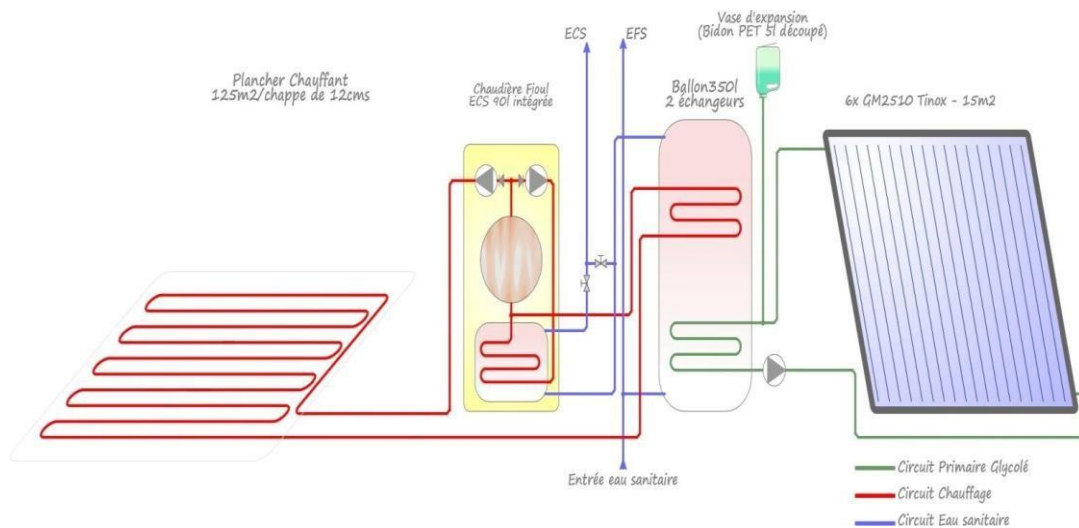


Figure III. 18 : schéma d'une installation d'un plancher solaire direct [58]

b. Le chauffage central solaire

Sur le même principe que le chauffe-eau solaire, on peut construire des installations solaires de chauffage central, utilisant des radiateurs conventionnels. Le problème est que la température de l'eau des radiateurs est habituellement beaucoup plus élevée que celle utilisée dans un plancher chauffant. Or, le rendement des capteurs solaires est de moins en moins bon lorsque la température de fonctionnement augmente. Pour remédier à ce problème, deux approches techniques peuvent être envisagées :

- Soit utiliser des capteurs à tubes sous vide (meilleur rendement à haute température)
- Soit prévoir un système de chauffe-eau mixte à stratification de température, permettant de stocker l'eau à différentes températures en fonction des besoins.

D'excellentes réalisations fonctionnant selon ce principe donnent, depuis des années, satisfaction à leurs utilisateurs. Cependant, il faut bien avouer que ce type de système se situe à la limite technologique du solaire thermique pouvant être mis en œuvre pour les particuliers. Quoiqu'il en soit, ceci ne peut se faire que dans une maison bien isolée, car cela permet d'opérer le chauffage central à plus basse température. C'est donc le premier point à étudier avant de se lancer dans ce type de réalisation. [40]

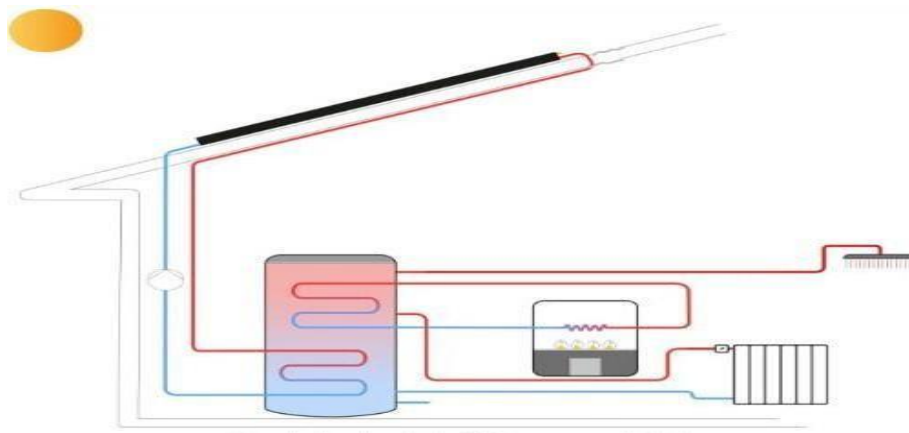


Figure III.19 : schéma d'une installation d'un chauffage solaire centrale combiné [59]

c. Le chauffage solaire de l'air

On utilise le rayonnement solaire pour chauffer directement l'air au lieu de passer par un

fluide caloporteur. C'est l'option retenue par les systèmes de chauffage solaire de l'air.

Surtout développés en Amérique du Nord, ces systèmes utilisent des capteurs d'un type particulier, à travers lesquels va s'effectuer la ventilation du bâtiment. Ces capteurs sont généralement placés en façade.

Le système de ventilation aspire l'air extérieur à travers les perforations du capteur, puis le fait circuler dans l'espace entre le capteur et le mur du bâtiment. On récupère ainsi la chaleur de l'air qui s'est réchauffé au contact de la plaque sombre.

Selon les applications, on contrôle la température de l'air fourni au bâtiment en ajustant automatiquement le mélange entre l'air neuf et l'air circulé renvoyé dans le bâtiment. On peut aussi contrôler cette température en modulant le débit de ventilation ou encore en ajoutant un chauffage auxiliaire de l'air au mazout, au gaz naturel ou à l'électricité. L'air chauffé est alors distribué dans le bâtiment.

On remarquera que la conception même d'un système de chauffage solaire d'air de ventilation permet de récupérer les pertes thermiques du mur du bâtiment qui sert de capteur. Dans le bilan thermique, les pertes de ce mur peuvent être typiquement réduites jusqu'à la moitié.

Malheureusement, du fait des grandes surfaces de mur ou de toiture mobilisées et du système de ventilation nécessaire, ce mode de préchauffage de l'air est plus adapté aux bâtiments de grande taille qu'aux logements individuels. (40)

III.8 Transition vers un système solaire combiné (SSC)

Aussi désigné sous le terme de *combi-système*, le système solaire combiné (SSC) est une installation qui exploite le rayonnement solaire pour couvrir une partie des besoins en chauffage des locaux ainsi qu'en eau chaude sanitaire (ECS). Comme son nom l'indique, ce système associe deux fonctions essentielles : la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de l'habitat.

Le fluide caloporteur, chauffé par les capteurs solaires, transmet son énergie non seulement à l'eau sanitaire, mais également à l'eau du circuit de chauffage. Ces deux transferts thermiques s'effectuent à l'aide d'échangeurs thermiques intégrés à un ballon de stockage. L'eau destinée au chauffage circule ensuite dans les émetteurs de chaleur, tels que les radiateurs ou les planchers chauffants, contribuant ainsi au réchauffement de l'air ambiant.

Afin d'assurer la continuité du service lors des périodes de faible ensoleillement ou de forte

demande thermique, une chaudière d'appoint conventionnelle est généralement prévue pour prendre le relais.

III .8.1 Le système solaire combiné avec stockage de l'eau de chauffage en ballon

Ce système est basé sur le stockage de l'eau chaude solaire dans un réservoir afin de restituer la chaleur tout au long de la journée. Il est constitué de quatre principaux éléments :

- Des capteurs solaires thermiques identiques utilisés avec un chauffe-eau solaire. Ils reçoivent le rayonnement solaire et ainsi chauffe l'eau.
- Un réservoir tampon d'eau de chauffage de grande capacité (environ 700L) intégré la production d'eau chaude sanitaire.
- Une chaudière raccordée au réservoir pour compléter le chauffage, si besoin.
- Un ensemble de régulation

Le fluide chauffé dans les capteurs passe dans un échangeur situé dans la partie basse du ballon de stockage. L'eau froide est réchauffée au contact de l'échangeur et lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'ensoleillement, une sonde de température déclenche l'appoint.

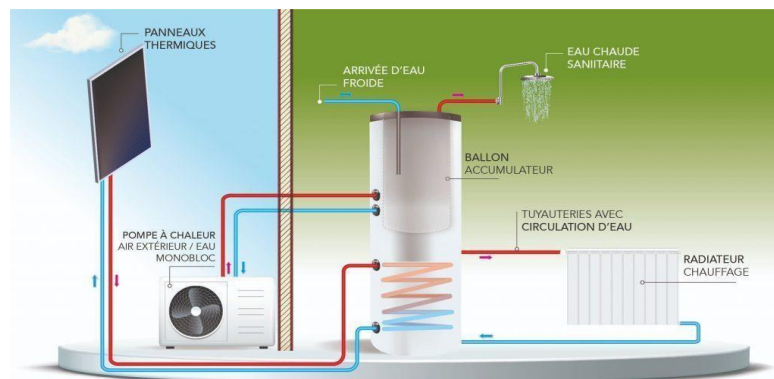


Figure III. 20 : schéma d'une installation d'un système solaire combiné SSC [60]

III .8.2 Le plancher solaire direct (PSD)

Le plancher solaire direct (PSD) repose sur un principe proche de celui des systèmes solaires combinés avec stockage, à la différence qu'il ne nécessite pas de ballon tampon. En effet, la dalle du plancher chauffant assure elle-même le stockage thermique grâce à son inertie, restituant la chaleur accumulée durant la journée tout au long de la nuit. Un ballon indépendant est dédié exclusivement à la production et au stockage de l'eau chaude sanitaire. Par ailleurs, une chaudière d'appoint intervient lorsque l'apport solaire est insuffisant pour couvrir les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire. [49]

III.9 Les installations solaires thermiques

III.9.1 Le chauffe-eau solaire individuel (CESI)

Le CESI est un système assurant le préchauffage de l'eau chaude sanitaire. Le générateur au gaz naturel apporte le complément de chaleur nécessaire pour atteindre la température souhaitée de production d'eau chaude sanitaire, notamment durant les périodes où le rayonnement solaire est insuffisant.

Pour l'installation d'un CESI, il est indispensable de vérifier que le projet dispose ou peut intégrer une surface destinée à l'implantation des capteurs solaires présentant les caractéristiques suivantes :

- Une surface suffisante, généralement de l'ordre de 4 m² pour une habitation individuelle, afin de couvrir environ 50 % des besoins en eau chaude sanitaire.
- Une orientation privilégiée vers le sud, avec un minimum d'ombrage (par exemple dû à un bâtiment voisin).
- Une accessibilité adaptée, que ce soit en toiture (pose en surimposition ou intégrée), sur toiture-terrasse ou au sol sur des supports dédiés.

a. Le principe de fonctionnement

Deux options de couplage « solaire-gaz naturel » sont envisagées : le CESI avec appoint séparé, recommandé notamment lorsque l'installation solaire est ajoutée sans remplacement de la chaudière existante, et le CESI avec appoint intégré, qui combine la production solaire et l'appoint dans un même ensemble.

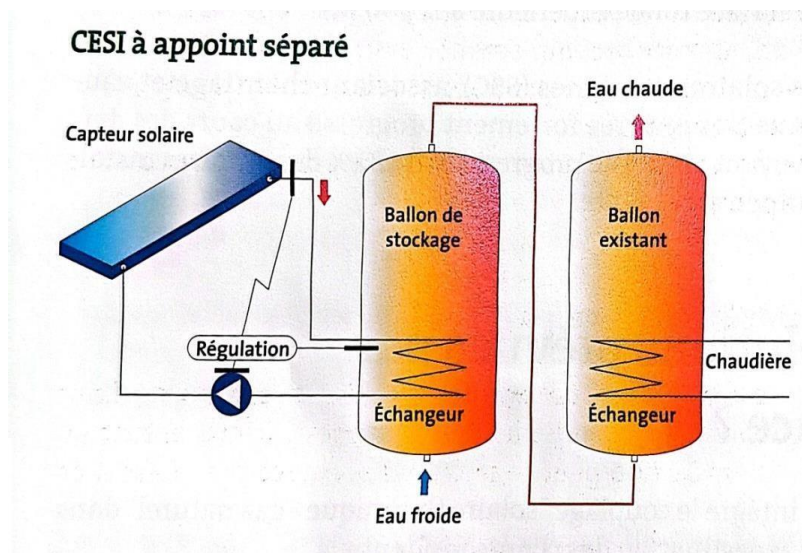


Figure III. 21 : schéma de principe d'un CESI à appoint séparé par préparateur d'eau chaude sanitaire+ chaudière

Le fonctionnement d'un CESI à appoint séparé peut se décrire ainsi :

- Les capteurs solaires captent l'énergie thermique et la transmettent au ballon de stockage solaire via un échangeur interne.
- L'eau préchauffée est ensuite acheminée vers le ballon d'eau chaude sanitaire ou vers l'entrée d'eau froide de la chaudière, qui prend le relais pour assurer le complément de chauffage.
- La circulation du fluide entre les capteurs et le ballon solaire est assurée par un circulateur contrôlé par une régulation adaptée.

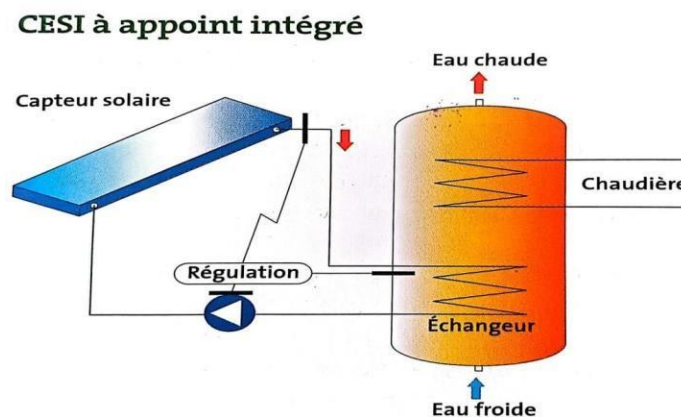


Figure III. 22 : schéma de principe d'un CESI à appoint intégré

Le principe de fonctionnement d'un CESI à appoint intégré est le suivant :

- L'installation dispose d'un seul ballon de stockage pourvu de deux échangeurs l'échangeur en partie basse permet de récupérer l'énergie solaire et réchauffe l'eau stockée dans la partie inférieure du ballon. Durant les jours les plus ensoleillés, l'ensemble du volume du ballon peut être réchauffé par l'énergie solaire.
- Un échangeur hydraulique en partie haute (placé à la moitié ou aux deux tiers du ballon) apporte le complément d'énergie nécessaire à l'élévation ou au maintien en température de l'eau stockée dans la partie supérieure du ballon.
- La circulation entre les capteurs et le ballon s'effectue grâce à un circulateur et une régulation appropriée. [50]

b. Dimensionnement de l'installation solaire en Algérie

Dans le cadre d'une installation neuve, le dimensionnement de la production d'eau chaude sanitaire (ECS) au gaz naturel est effectué indépendamment de la contribution solaire : le système gaz est conçu pour assurer à lui seul la totalité des besoins en l'absence d'apport solaire.

Dans le cas d'une installation existante, c'est la solution du CESI à appoint séparé qui est privilégiée.

En fonction du taux de couverture solaire souhaité, de la zone climatique algérienne, et des besoins en eau chaude sanitaire, la surface des capteurs et la capacité du ballon ECS peuvent varier.

➤ **Zonage climatique proposé pour l'Algérie**

- **Zone A** : Nord humide (régions côtières : Alger, Oran, Annaba)
- **Zone B** : Hauts plateaux (Sétif, Tiaret, Batna)
- **Zone C** : Sud semi-aride et désertique (Ghardaïa, Tamanrasset)

c. L'installation

La plupart des capteurs solaires utilisés sont de type plan vitré, disposant d'un avis technique favorable ainsi que d'une certification CSTBat, garantissant leur conformité aux exigences de qualité et de performance. Les capteurs non vitrés ne sont pas retenus ici, car ils ne répondent pas aux exigences requises pour la production d'eau chaude sanitaire, notamment en termes de rendement thermique.

Dans la majorité des installations, le fluide caloporteur, qui assure le transfert de chaleur entre les capteurs solaires et le ballon de stockage, est un liquide antigel spécifiquement recommandé par le fabricant. La nature et la qualité de ce fluide jouent un rôle essentiel dans la longévité et le bon fonctionnement de l'installation.

La pose et le raccordement du système doivent impérativement être réalisés par un professionnel qualifié, afin de garantir le respect des normes techniques et d'assurer une exploitation fiable et durable du dispositif.

d. entretien et la maintenance, quelques points clés

▪ **Entretien et suivi d'un CESI**

Tout comme les autres systèmes de chauffage, un chauffe-eau solaire individuel (CESI) nécessite

un suivi et un entretien réguliers.

- **Contrôles à effectuer régulièrement**

Il est conseillé de surveiller périodiquement le bon fonctionnement de l'installation en vérifiant :

- **La pression du fluide caloporteur** : elle doit être maintenue à environ **0,6 bar + H/10**, où H correspond à la hauteur (en mètres) entre les capteurs et le ballon.
- **Le régulateur et le circulateur** : par temps ensoleillé, leur fonctionnement doit être vérifié. L'installation devrait être équipée de deux thermomètres (entrée et sortie de l'échangeur solaire). En conditions normales, l'écart de température entre ces deux points ne dépasse généralement pas **10 °C**. Un écart supérieur à **15 °C** peut indiquer un problème de circulation du fluide.

Ces vérifications peuvent être effectuées par l'utilisateur entre deux interventions d'un professionnel.

Par ailleurs, conformément aux recommandations du fabricant, il est préférable de faire contrôler au moins une fois par an les propriétés du fluide caloporteur (pH et densité)

- **Un contrat d'entretien souscrit auprès d'un professionnel**

Des contrôles doivent être effectués tous les ans, suivant les indications du constructeur et de l'installateur au moment de mise en service de l'installation.

- **Quelques repères économiques**

- Une installation individuelle « solaire-gaz naturel » pour la production d'eau chaude sanitaire permet une réduction des consommations énergétiques comprises entre 30 % et 70 %, en fonction du dimensionnement adopté.
- Les coûts liés à une installation solaire, tant en termes d'investissement que d'exploitation, dépendent principalement de la surface de capteurs installée. Celle-ci est directement corrélée au taux de couverture solaire visé ainsi qu'au niveau d'ensoleillement de la zone géographique.
- L'investissement initial peut également varier de manière significative selon le type d'équipement retenu. [50]

III.9.2 Système solaire hybride

Le système solaire combiné (SSC) repose sur l'association d'un dispositif individuel au gaz naturel assurant le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, avec une installation solaire thermique composée de capteurs solaires et d'un ballon de stockage d'eau chaude sanitaire.

Avant toute proposition d'un SSC, il est impératif de s'assurer que le projet prévoit (ou peut intégrer) une surface adaptée à l'installation des capteurs solaires, répondant aux critères suivants :

- Une superficie suffisante, de l'ordre de 15 m² par logement, permettant de couvrir environ 50 % des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- Une orientation optimale, idéalement vers le sud, avec un ombrage minimal (par exemple, absence de masques solaires liés à des bâtiments voisins).
- Une accessibilité adéquate : en toiture (pose sur ou intégration à la toiture), en toiture-terrasse, ou au sol (avec capteurs montés sur supports).

a. Le principe de fonctionnement

Il existe plusieurs solutions de restitution pour les systèmes solaires combinés. Le plancher solaire direct (PSD), marque déposée par Clipsol, représente aujourd'hui le système solaire combiné le plus couramment utilisé. Ce dispositif associe des capteurs solaires thermiques, un ballon de stockage, ainsi qu'un système émetteur de chaleur.

Le fluide caloporteur, généralement constitué d'un mélange d'eau et d'antigel, assure le transfert de l'énergie thermique depuis les capteurs jusqu'au ballon de stockage ou directement vers le système de chauffage.

Les produits de dernière génération incluent un ballon qui assure la double fonction de :

- Stockage pour la production d'eau chaude sanitaire par système instantané (à travers un échangeur à plaques)
- Une bouteille casse-pression est utilisée pour assurer l'indépendance hydraulique entre les différents circuits de l'installation, tout en maintenant un niveau de température adapté à chaque circuit.

Le ballon est ainsi stratifié selon trois zones de température : zone la plus froide en bas (zone solaire), zone intermédiaire tiède pour le chauffage et une zone chaude pour la production d'eau chaude sanitaire. Ainsi, la récupération de l'énergie solaire est optimisée. Une zone « radiateurs » peut être raccordée au système.

Ce type de système solaire combiné présente l'avantage d'un encombrement réduit, puisque le stockage solaire pour le chauffage est intégré au plancher. [50]

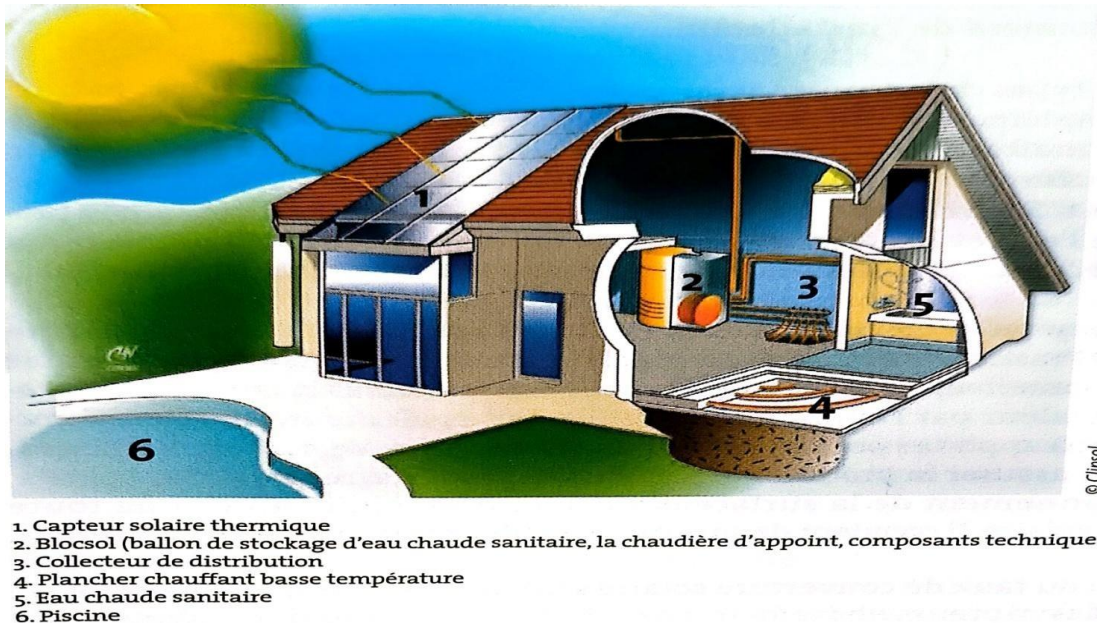


Figure III. 23: installation solaire thermique d'un système solaire combiné

b. Les autres systèmes

Le fluide caloporteur transfère la chaleur solaire aux réservoirs d'eau tampon, puis retourne vers les capteurs pour entamer un nouveau cycle. La chaleur collectée par les capteurs est transmise aux réservoirs tampon à l'aide d'un échangeur thermique. L'eau ainsi réchauffée est utilisée pour le chauffage du bâtiment, au moyen d'émetteurs à basse température tels que les planchers chauffants basse température (PCBT) ou les radiateurs basse température.

La production d'eau chaude sanitaire peut être assurée soit par un échangeur thermique intégré au réservoir tampon, soit par un ballon spécifique, couplé à un échangeur thermique interne ou externe. La chaleur solaire peut être stockée :

- Soit dans un ballon unique, raccordé à une chaudière d'appoint, alimentant à la fois les circuits de chauffage et d'eau chaude sanitaire.
- Soit dans deux ballons distincts, l'un dédié au chauffage et l'autre à la production d'eau chaude sanitaire, tous deux associés à un système d'appoint.

c. Le dimensionnement de l'installation

Dans les deux types de systèmes solaires combinés. Le générateur gaz naturel apporte le complément de chaleur nécessaire à l'obtention de la température de confort souhaitée, notamment pendant les périodes où le rayonnement solaire est insuffisant.

En ce qui concerne la production d'eau chaude sanitaire (ECS), l'installation solaire assure la phase de préchauffage de l'eau, tandis que le générateur au gaz naturel fournit le complément

d'énergie nécessaire pour atteindre la température de consigne.

Le dimensionnement des systèmes de chauffage et de production d'ECS est réalisé indépendamment de l'installation solaire. La régulation constitue un élément clé pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble. Elle a pour mission principale de privilégier l'apport en chaleur solaire, tout en ajustant de manière optimale l'énergie d'appoint dédiée à la production d'ECS.

Le dimensionnement de la surface des capteurs solaires représente un paramètre fondamental dans toute conception d'installation. Il est donc recommandé de consulter les fabricants de matériel pour garantir une configuration adaptée.

En fonction du taux de couverture solaire visé, de la zone climatique, de la surface de captation et des besoins en ECS, les volumes des ballons d'ECS et de chauffage peuvent varier de manière significative.

Dans les systèmes combinés ECS/chauffage, il peut être nécessaire d'opérer des compromis concernant l'orientation des capteurs. Lorsque la priorité est donnée au chauffage, une inclinaison des capteurs à 60° est généralement retenue pour optimiser la captation durant les saisons froides. Cette orientation, moins favorable en été, permet néanmoins de limiter les surchauffes tout en satisfaisant les besoins en ECS.

La surface des capteurs est généralement suffisante pour couvrir la demande en eau chaude sanitaire pendant la période estivale. Toutefois, en cas d'inoccupation prolongée, la température du fluide circulant dans les capteurs peut atteindre des niveaux très élevés. Pour limiter les risques de surchauffe estivale et préserver la durabilité du matériel, plusieurs solutions techniques ont été développées par les fabricants : circuits de décharge thermique, capteurs auto-vidangeables, refroidissement nocturne, circuits sous pression élevée pour éviter l'ébullition du fluide caloporteur, ou encore d'autres dispositifs de protection thermique.

L'énergie solaire produite en été peut également être valorisée en assurant le chauffage de l'eau d'une piscine.

d. L'installation

Les capteurs solaires sont majoritairement de type plan vitré. Les capteurs « sans vitrage » sont exclus dans ce cas, car ils ne sont pas adaptés à production d'eau chaude sanitaire.

Le fluide caloporteur du circuit de transfert est celui qui est recommandé par le fabricant des capteurs. La qualité du fluide est un élément déterminant pour la longévité de l'installation. [50]

III.9.3 L'eau chaude sanitaire (ECS) solaire collective

La réalisation d'une installation solaire destinée à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) peut être envisagée sous réserve de réunir les conditions suivantes :

- Disponibilité d'une surface adaptée à l'implantation des capteurs solaires, que ce soit au sol, en toiture ou sur terrasse, avec une surface moyenne de l'ordre de 2 m² de capteurs par logement (soit environ 1 m² de capteur solaire pour 50 à 70 litres d'eau chaude sanitaire, selon la région).
- Existence, ou possibilité de création, d'un local technique dédié au stockage de l'eau chaude sanitaire solaire, avec un volume de stockage solaire d'environ 100 litres par logement.

Par ailleurs, une consommation d'eau chaude sanitaire répartie de manière homogène tout au long de l'année constitue un facteur favorable à l'optimisation de la performance et de la productivité de l'installation solaire.

a. Les différents schémas de l'installation solaire

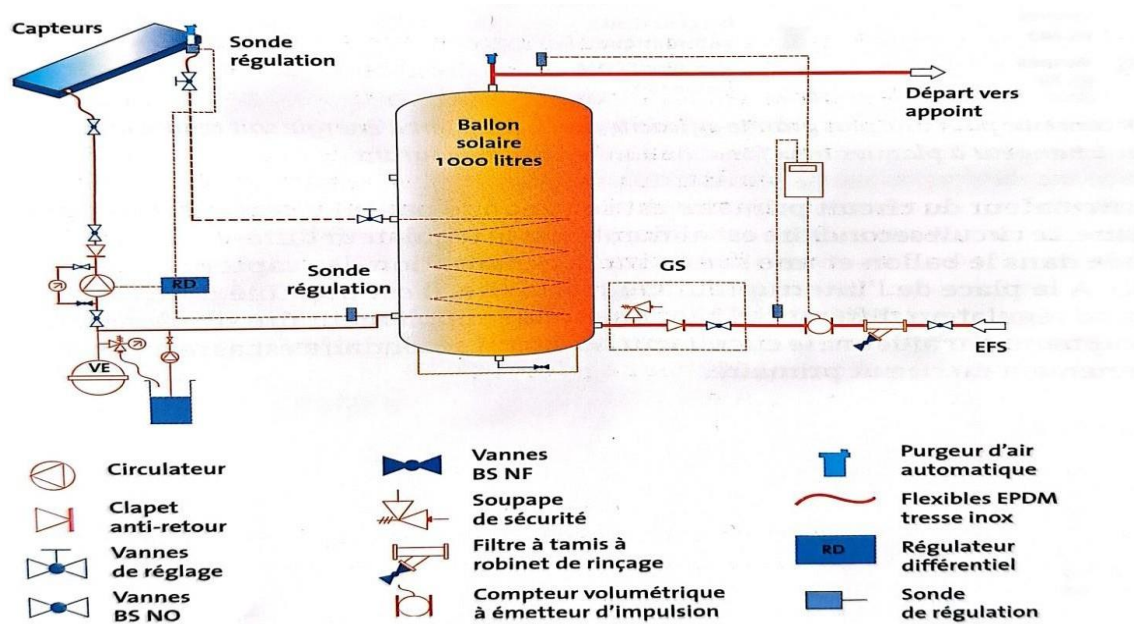


Figure III. 24 : schéma pour des installations de faibles importances (surface des capteurs < 20 m²)

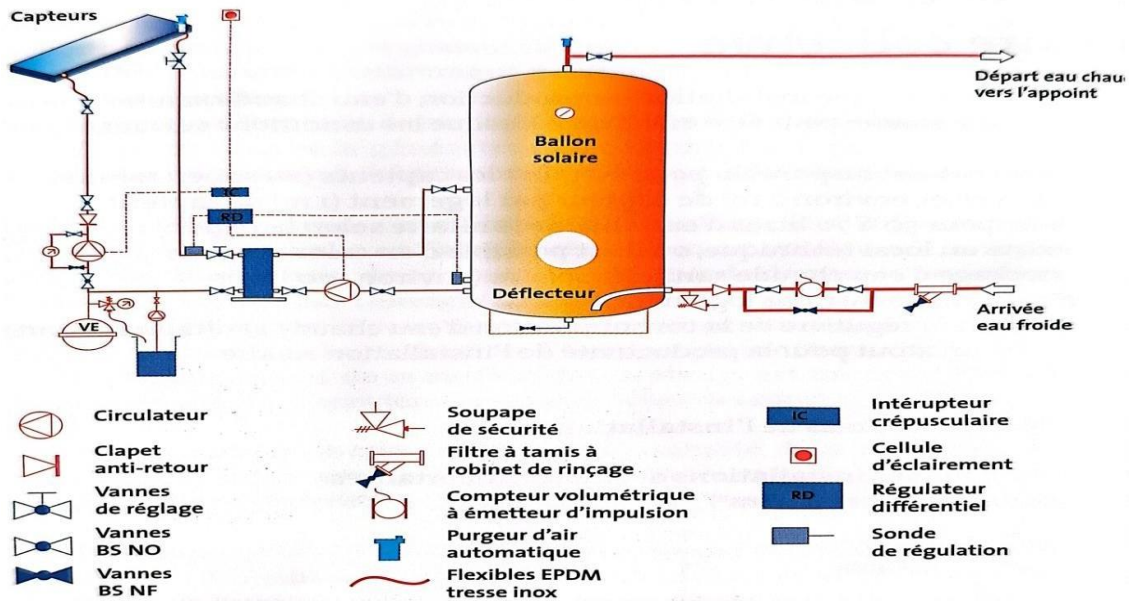


Figure III. 25 : schéma conseillé au-delà de 20m² de capteurs

Le circulateur du circuit primaire est commandé par un interrupteur crépusculaire, associé à une sonde placée dans le ballon ainsi qu'à une autre sonde installée sur la canalisation reliant les capteurs à l'échangeur thermique. En remplacement de l'interrupteur crépusculaire, il est également possible d'installer un second régulateur différentiel, muni d'une sonde supplémentaire positionnée en sortie des capteurs, afin d'améliorer la gestion du système. Par ailleurs, le circulateur du circuit secondaire est asservi au fonctionnement du circuit primaire, garantissant une coordination optimale entre les deux circuits.

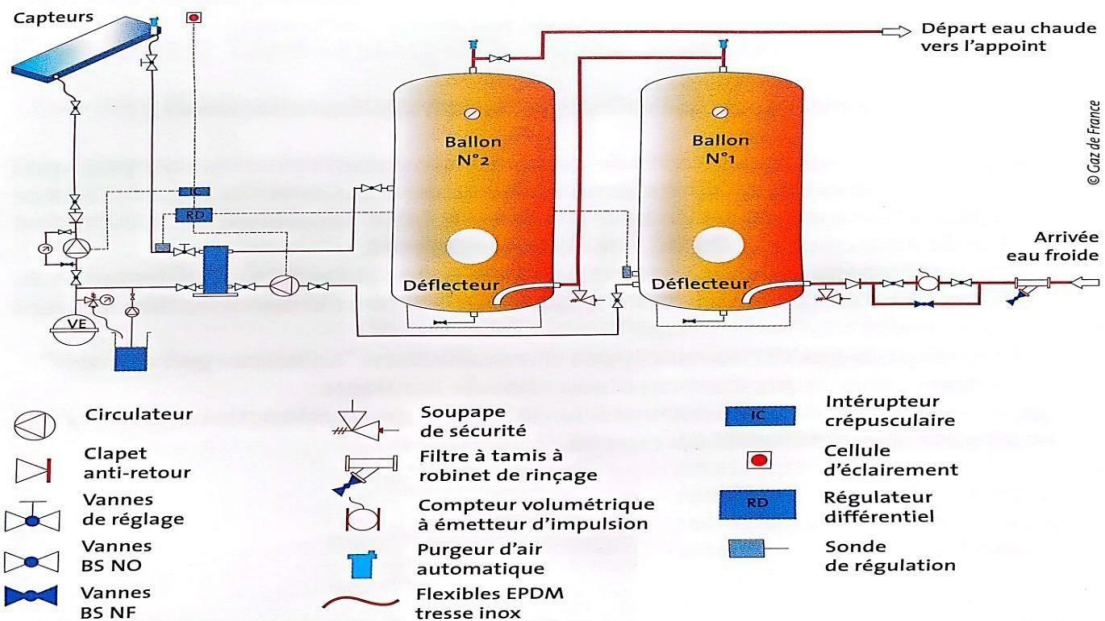


Figure III. 26: Schéma retenu lorsque le volume du chauffe-eau solaire augmente

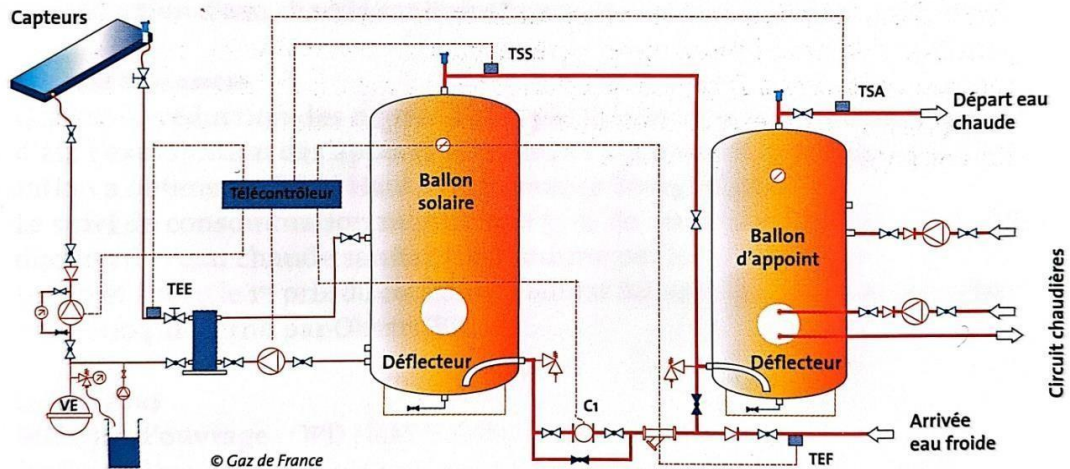


Figure III. 27 : schéma de couplage avec un appoint chaudières : le cas d'une télécontrôle de l'installation solaire

b. Un guide pour la maintenance et l'exploitation des installations

Dans le but de mettre à la disposition des exploitants un référentiel technique à la fois clair, structuré et opérationnel, un cahier de notes de « savoir-faire » a été élaboré. Ce document constitue un outil d'aide à l'exploitation regroupant l'ensemble des informations nécessaires à la maintenance préventive et curative des installations solaires collectives. Il fournit des éléments techniques précis permettant de garantir la pérennité, la sécurité et l'efficacité des systèmes. On y retrouve notamment :

- Une classification et une description détaillée des différentes configurations d'installations collectives hybrides « solaire-gaz naturel » destinées à la production d'eau chaude sanitaire ;
- Un ensemble de fiches techniques portant sur l'identification des dysfonctionnements courants, les procédures de vérification, ainsi que les opérations d'entretien systématique ou correctif à appliquer.

III.10 Dimensionnement général d'une installation solaire thermique combinée (SSC)

III.10.1 Analyse des besoins énergétiques

a. Besoin en eau chaude sanitaire (ECS) :

Formule :

$$Q_{\text{ECS}} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{III.1})$$

- m : masse d'eau consommée kg/jour
- C_p : capacité calorifique massique de l'eau = 4185 J/(kg.°C)
- ΔT : température de consigne – température froid

b. Besoin en chauffage du bâtiment

Formule :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{III.2})$$

- U : coefficient global de transmission thermique (W/m²°C)
- A : surface déprédative (m²)
- ΔT : température intérieure – température extérieure

Ou globalement

$$Q_{\text{chauffage}} = \text{Surface habitable} \times \text{besoins spécifiques (W/m}^2\text{)}$$

c. Rendement du capteur

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot 1. \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right)^2 \quad (\text{III.3})$$

- η_0 : rendement optique.
- a_1 : coefficient de perte linéaire (W/m²·K).
- a_2 : coefficient de perte thermique quadratique (W/m²·K²)
- T_m : température moyenne du fluide.
- T_a : température ambiante.
- G : rayonnement incident (W/m²).

d. Pertes par infiltration d'air (renouvellement)

$$Q_{\text{vent}} = 0,34 \cdot \eta \cdot V \cdot \Delta T \quad (\text{III.4})$$

- Q_{vent} : pertes thermiques (W)
- **0,34**: coefficient ($\rho_{\text{air}} \cdot C_{p,\text{air}}$)
- η : taux de renouvellement d'air (h^{-1}) — **0,3 h^{-1}** pour une isolation lourde
- V : volume chauffé (m^3)
- ΔT : différence de température intérieure/extérieure ($^{\circ}\text{C}$)

e. Apports solaires à travers les vitrages

$$Q_{\text{sol}} = S \cdot g \cdot G \quad (\text{III.5})$$

- Q_{sol} : apport solaire (W)
- S : surface vitrée (m^2)
- g : facteur solaire du vitrage
- G : rayonnement solaire global incident (W/m^2)

f. Apport internes

$$Q_{\text{int}} = \sum (P_i \cdot N_i) \quad (\text{III.6})$$

- P_i = puissance unitaire d'un équipement ou occupant
- N_i = nombre d'équipements ou d'occupants

III.11. Logiciel T*Sol

En raison du coût et du temps, la simulation est un moyen efficace pour mettre en place et étudier le comportement thermique des bâtiments dans des conditions d'exploitation, mais il faut savoir ce que vous faites pour utiliser l'outil de manière optimale. L'informatique offre la possibilité d'effectuer des calculs qui seraient longs, fastidieux et répétitifs.

Les simulations thermodynamiques permettent au bâtiment de "vivre" longtemps, d'étudier des comportements prédictifs donnant des résultats proches de la réalité.

Pour valider les solutions retenues, le logiciel T*SOL a été choisi pour la simulation en raison des divers avantages qu'il présente.

III.11.1 Présentation du logiciel T*SOL

T*SOL est un programme de simulation et de conception solaire thermique pour la préparation d'eau chaude, le chauffage, les piscines, la chaleur industrielle et les grandes installations.

Les utilisateurs sont des planificateurs, des installateurs, des consultants en énergie des architectes. Le T*SOL de base est conçu pour simuler l'installation solaire d'une maison unifamiliale ou bien familiale.

Il permet une présentation rapide d'une installation solaire qui comprend des estimations de production et des bénéfices correspondants.

Les systèmes simples et typiques disponibles comprennent environ 80% des champs d'applications d'installations comparables utilisées en Europe et Amérique. En plus des systèmes standards, T*SOL propose également :

- Des solutions adaptées aux entreprises, piscines couvertes, traitement thermique dans les grandes installations.
- Plusieurs variantes pour un même projet, arbre du projet.
- Études de bagage à main, support de dimensionnement, graphiques de résultats.
- Profils de charge et composants modifiables.

T*SOL Expert est également adapté à la simulation de réseaux solaires. Ce programme permet aux concepteurs d'étudier l'effet des différences d'installation sur les performances d'une installation solaire thermique. Tous les paramètres du système peuvent être modifiés rapidement à l'aide

de l'interface d'utilisateur.

On peut aussi analyser les résultats de la simulation dans des tableaux ou des graphiques. Les facilités de calcul avancées de T*SOL en font un véritable outil professionnel pour la planification d'installations solaires thermiques.

III.11.2 Avantages du logiciel T*SOL

Les avantages qu'offre le logiciel T*SOL sont très nombreux. En effet, utilisation de T*SOL devenue de plus en plus facile et permet de faire changer les différents paramètres très facilement. D'autre part, en comparaison avec les autres logiciels T*SOL est plus rapide dans les simulations. Certes, ce n'est pas le même concept ni les mêmes équations à résoudre.

III.11.3 Fonctionnalités Principales

a. Conception de Systèmes Solaires

- Modélisation précise des systèmes solaires thermiques, incluant les capteurs solaires, les réservoirs de stockage et les systèmes de distribution.
- Bibliothèque étendue de composants solaires avec des caractéristiques techniques détaillées.
- Paramétrage flexible pour répondre aux besoins spécifiques des projets.

b. Simulation Dynamique

- Calculs horaires et simulations dynamiques basés sur des données météorologiques précises pour évaluer les performances du système tout au long de l'année.
- Analyse des gains solaires, des besoins énergétiques et des pertes thermiques.

c. Analyse des Performances

- Calcul du taux de couverture solaire, de l'efficacité du système et de l'économie d'énergie réalisée.
- Évaluation financière incluant les coûts initiaux, les économies réalisées et les temps de retour sur investissement

d. Rapports et Documentation

- Génération de rapports détaillés et personnalisables pour la présentation des résultats de simulation.
- Graphiques et tableaux illustrant les performances du système et les économies d'énergie.[41]

III.11.4 Les étapes de simulation d'un projet dans T-SOL

- Informations générales du projet

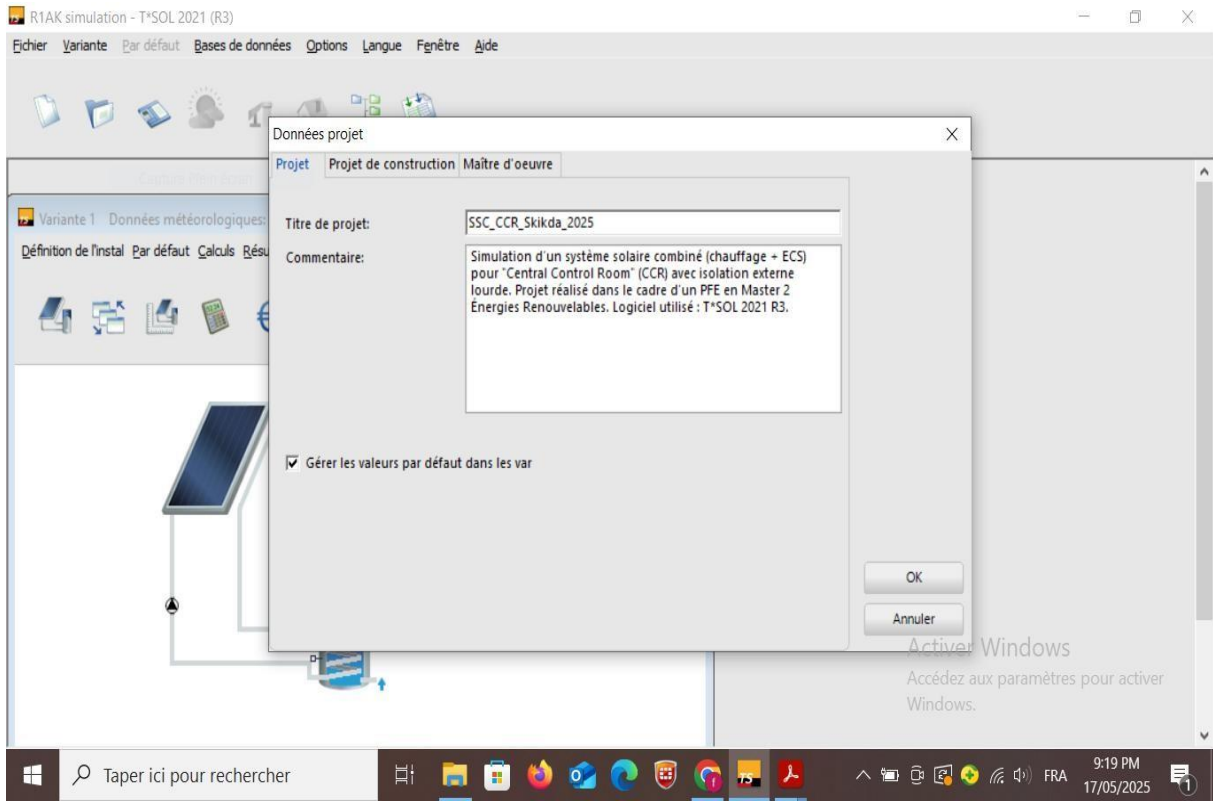


Figure III. 28 : présentation générale du projet (41)

Dans cette première capture, l'onglet « Projet » du logiciel T*SOL 2021 R3 présente les données de base du projet de simulation. Le titre du projet est « SSC_CCR_Skikda_2025 », ce qui indique qu'il s'agit d'un système solaire combiné (SSC) prévu pour le site de Skikda en 2025. Le commentaire associé détaille le contenu et le contexte du projet : il s'agit de la simulation d'un système solaire thermique combiné destiné à assurer à la fois le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) pour la salle de contrôle principale (Central Control Room – CCR) de la raffinerie RA1K de Skikda. Ce bâtiment est équipé d'une isolation thermique extérieure lourde, ce qui améliore son efficacité énergétique. Il est précisé que ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de fin d'études (PFE) en Master 2 Énergies Renouvelables, et que le logiciel utilisé est T*SOL 2021 R3, un outil spécialisé dans la simulation des systèmes solaires thermiques.

- **Données du site et de l'interlocuteur**

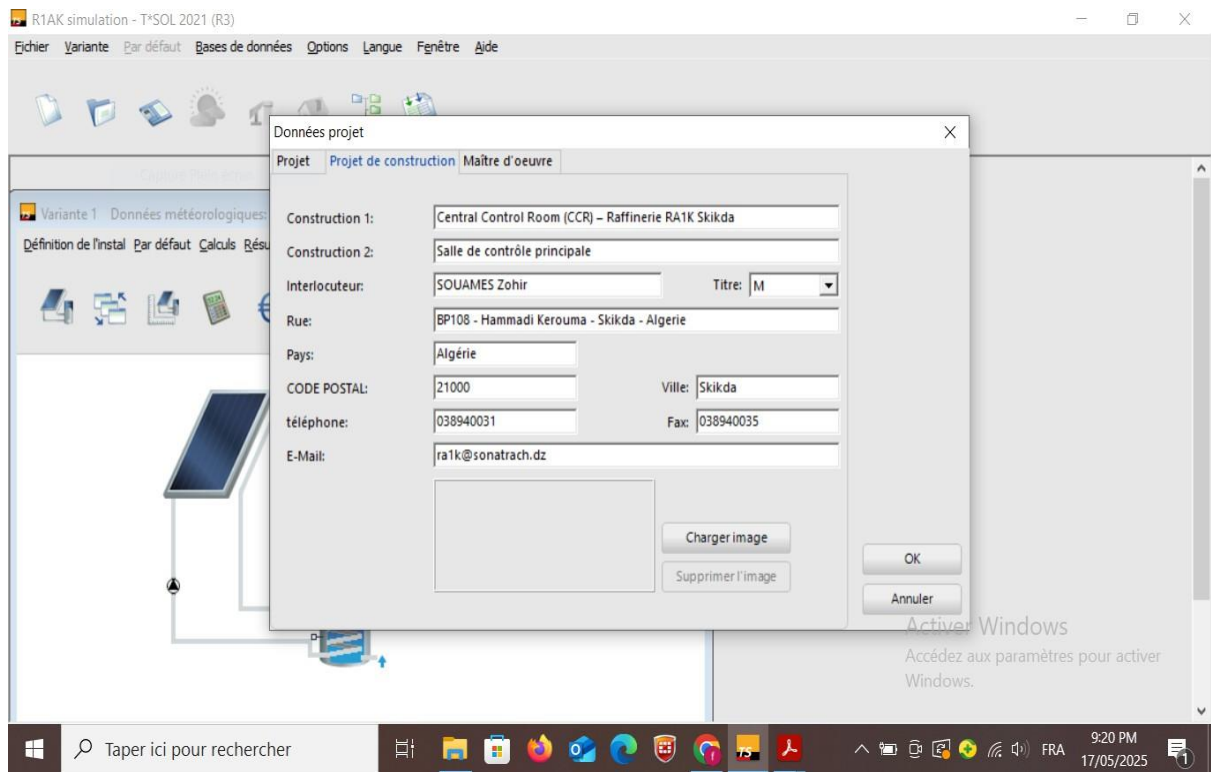


Figure III. 29 : données du site et du référent

La deuxième capture correspond à l'onglet « Projet de construction ». Elle fournit les informations relatives au site d'implantation du système solaire ainsi que les coordonnées du responsable ou interlocuteur technique. Le site concerné est toujours le Central Control Room (CCR) de la raffinerie RA1K, située à Skikda, en Algérie. Il s'agit de la salle de contrôle principale de cette raffinerie. Le contact principal pour le projet est M. SOUAMES Zohir, dont les coordonnées professionnelles sont détaillées : adresse (BP108 – Hammadi Kerouma), code postal (21000), ville (Skikda), téléphone, fax et adresse e-mail professionnelle rattachée à Sonatrach, ce qui montre qu'il s'agit d'un projet en collaboration avec le secteur industriel national.

- **Coordonnées de l'utilisateur**

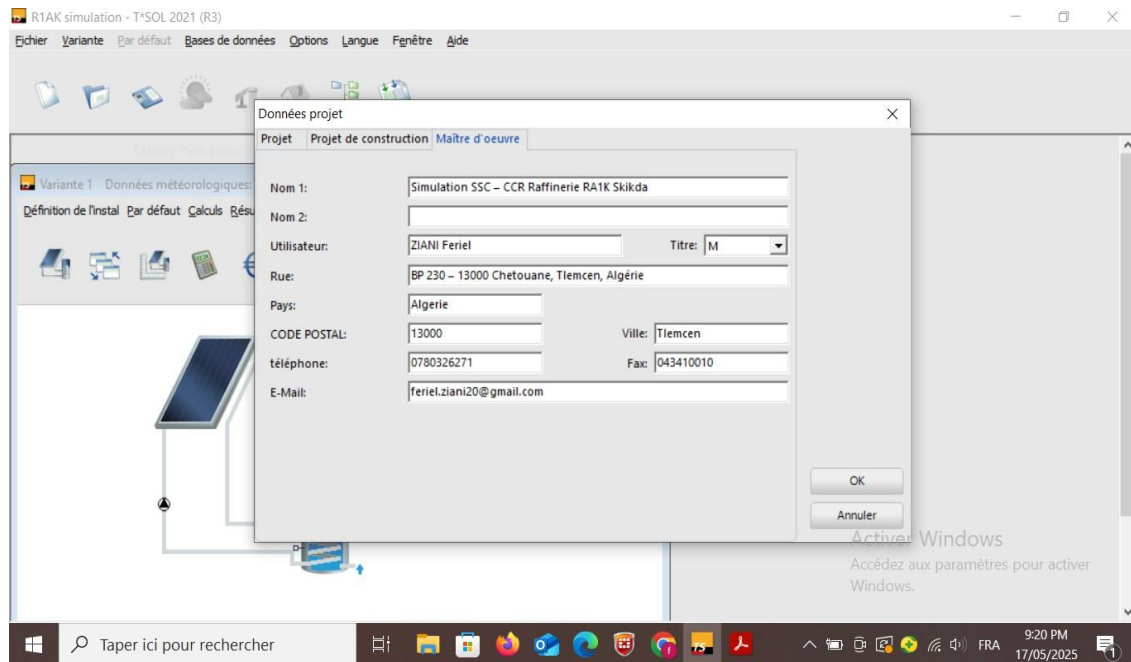


Figure III. 30 : information de l'utilisateur

Cette capture concerne l'onglet « Maître d'ouvrage » ou « Maître d'œuvre », qui désigne ici nous, la personne qui réalise la simulation. Le projet est intitulé « Simulation SSC – CCR Raffinerie RA1K Skikda » et il est attribué à ZIANI Ferial, étudiante en Master 2 à Tlemcen. Les informations personnelles incluent notre adresse (BP 230 – 13000 Chetouane, Tlemcen), notre numéro de téléphone et notre adresse e-mail. Ces données précisent qu'on est les responsables du dimensionnement et de la simulation du système solaire, dans le cadre de notre projet de fin d'études. Cela reflète un travail appliqué et professionnel, avec une mise en situation réelle.

- **Création de la variante**

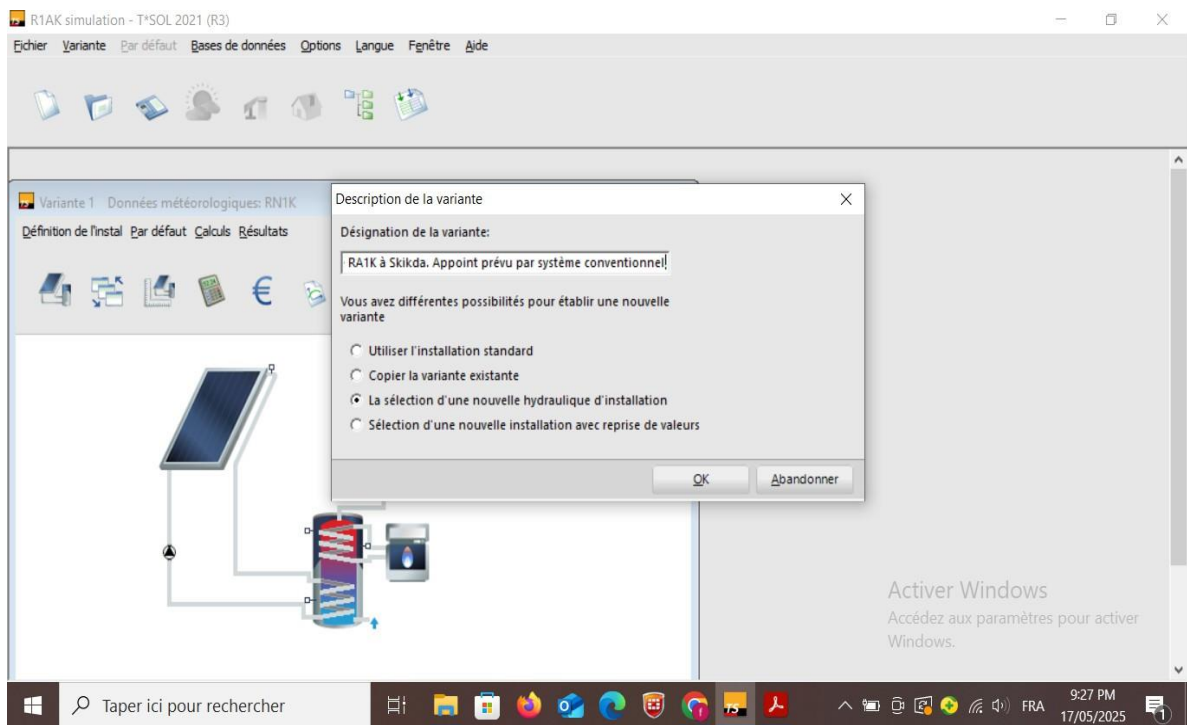


Figure III. 31 : formulation de la variante (50)

Dans cette capture, on est à l'étape de création d'une variante de simulation dans T*sol. La boîte de dialogue s'intitule « Description de la variante », et elle nous permet de nommer notre variante, ici : « RA1K à Skikda. Appoint prévu par système conventionnel ». Cela signifie que on a étudié une installation solaire thermique située à Skikda, avec un appoint prévu par un système classique, probablement une chaudière à gaz ou électrique. Ensuite, on doit choisir comment créer cette variante : soit en partant de l'installation standard, soit en copiant une variante existante, soit en choisissant un nouveau schéma hydraulique, soit en sélectionnant une nouvelle installation en reprenant certaines valeurs existantes. Cette étape est essentielle pour organiser nos différentes simulations et comparer des scénarios d'installation.

- **Données météorologiques du site**

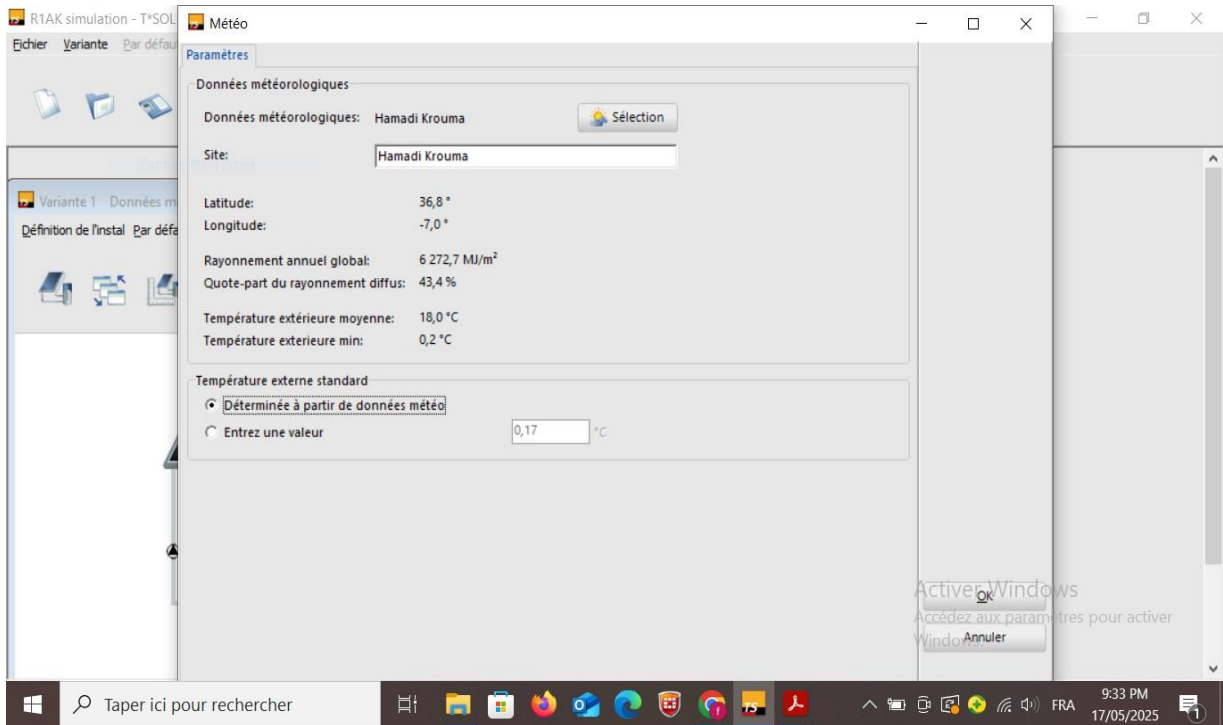


Figure III.32 : données climatique du site

Dans cette capture, on est dans l'onglet Météo, où on a choisis les données climatiques associées au site d'étude. On a sélectionné le site Hamadi Krouma, ce qui correspond à une localisation proche ou représentative de Skikda. Les coordonnées géographiques sont renseignées : latitude 36,8°. Le logiciel affiche ensuite des données climatiques importantes pour la simulation : un rayonnement solaire global annuel de 6 272,7 MJ/m² (très bon en termes de potentiel solaire), une part de rayonnement diffus de 43,4 %, et une température extérieure moyenne de 18,0 °C. La température minimale enregistrée est de 0,2 °C. Pour la température extérieure de référence, on a laissé l'option par défaut « Déterminée à partir des données météo », ce qui garantit que la simulation utilise des valeurs climatiques réalistes.

- **Choix du schéma hydraulique**

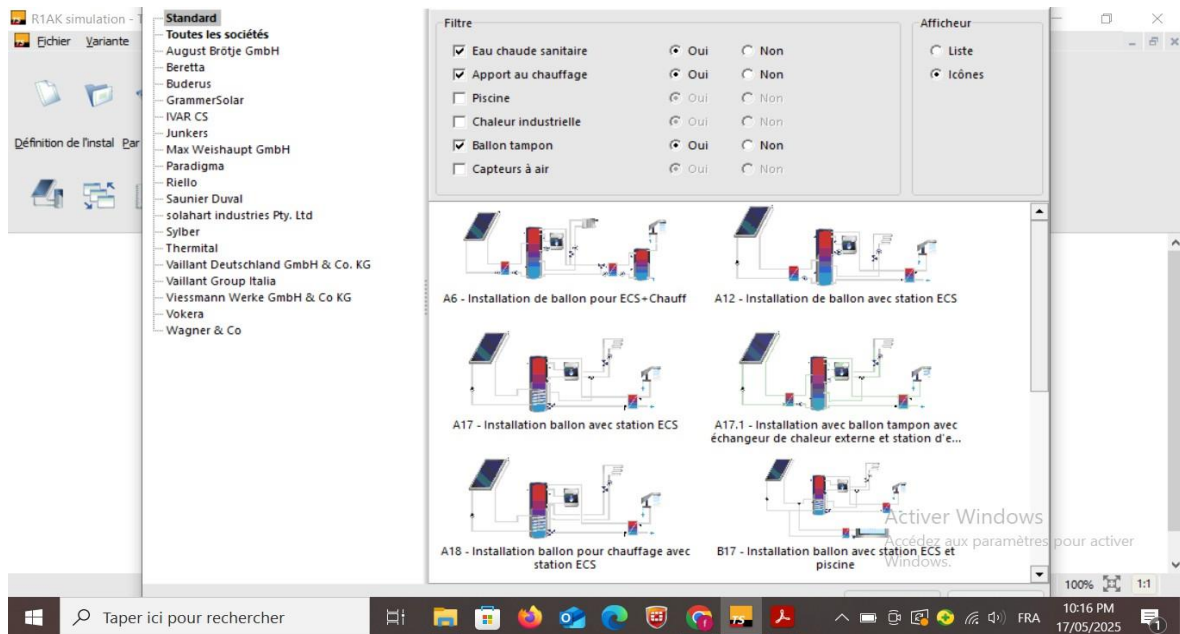


Figure III. 33 : sélection du schéma hydraulique

Dans cette capture, on est dans la fenêtre de sélection du type d'installation. On filtre les installations disponibles selon plusieurs critères : production d'eau chaude sanitaire (ECS), apport au chauffage, et présence d'un ballon tampon. On n'a pas activé les filtres pour la piscine, la chaleur industrielle, ni les capteurs à air. Grâce à ces filtres, T*SOL te propose une sélection de schémas standards adaptés à notre projet. Chaque miniature présente un schéma hydraulique typique (par exemple : A6, A12, A17, etc.), où l'on retrouve les éléments principaux : capteurs solaires, ballon de stockage, appoint, échangeurs, etc. On peut ainsi choisir la configuration la plus proche de notre installation réelle afin d'obtenir une simulation thermique fidèle à la réalité.

- **Saisie des données du projet**

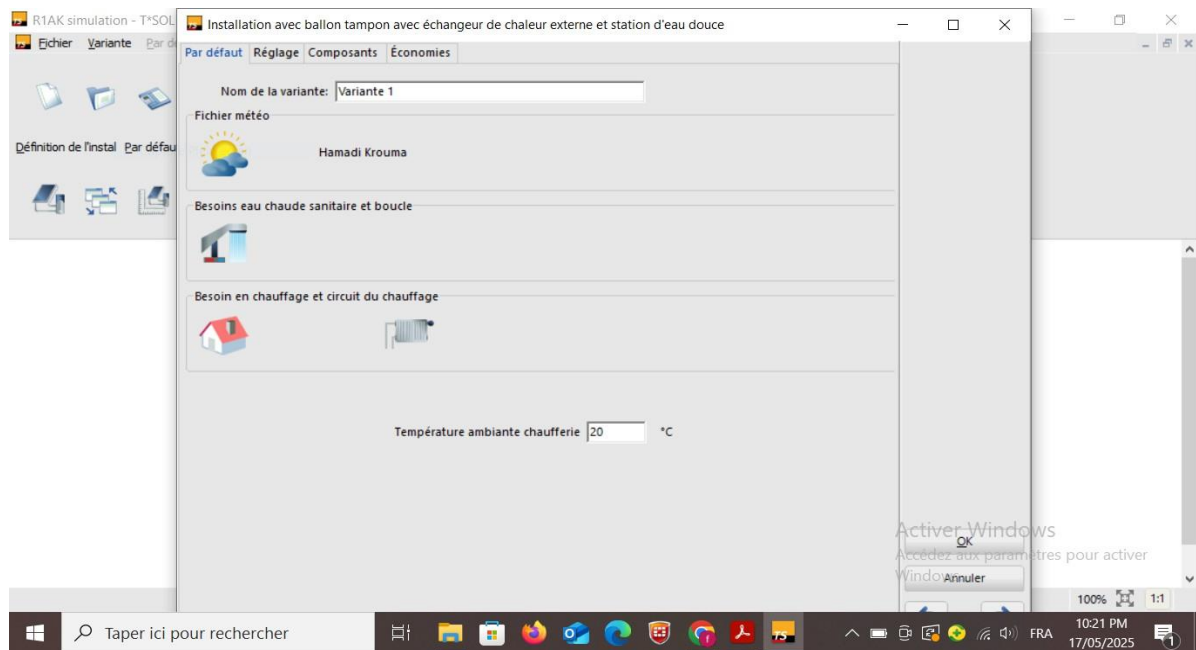


Figure III. 34 : enregistrement des informations du projet.

Cette capture correspond à l'interface de saisie des informations générales du projet. C'est ici que l'on entre le nom du projet, la localisation géographique (dans notre cas, la région du CCR), ainsi que les conditions climatiques locales en sélectionnant une station météo représentative. On y renseigne également les besoins énergétiques du bâtiment, notamment la demande annuelle de chauffage et la consommation en eau chaude sanitaire. Ces données servent de base pour le dimensionnement du système et sont indispensables pour que T*sol puisse réaliser des simulations réalistes et adaptées au contexte climatique réel.

- **Saisie des besoins en eau chaude sanitaire (ECS)**

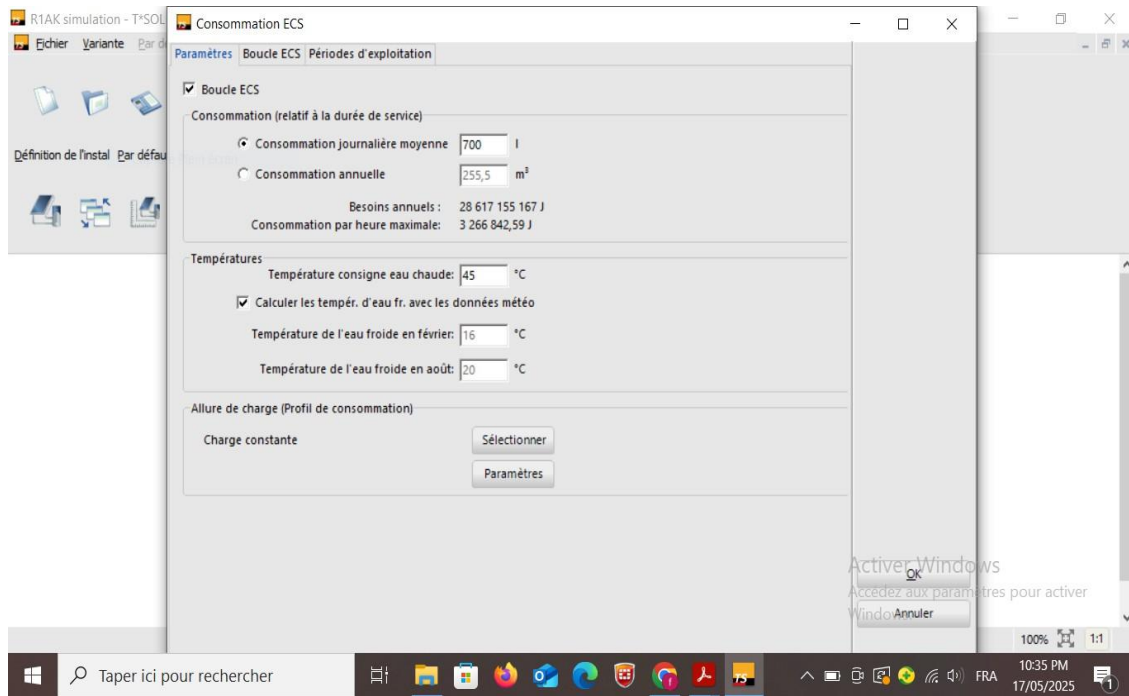


Figure III. 35 : paramétrage des besoins de l'ECS

Cette capture montre l'étape où l'on définit précisément les besoins en eau chaude sanitaire (ECS). On y indique le volume journalier d'eau chaude requis selon les spécificités du bâtiment, ainsi que le profil de consommation (type d'usage, nombre d'occupants, répartition horaire de la demande, etc.). Cette saisie permet au logiciel de déterminer comment l'ECS est consommée dans la journée et l'année, afin d'adapter la taille du ballon de stockage, de modéliser les besoins en appoint, et de dimensionner correctement le système solaire en fonction des habitudes d'utilisation.

- **Profil de charge constante**

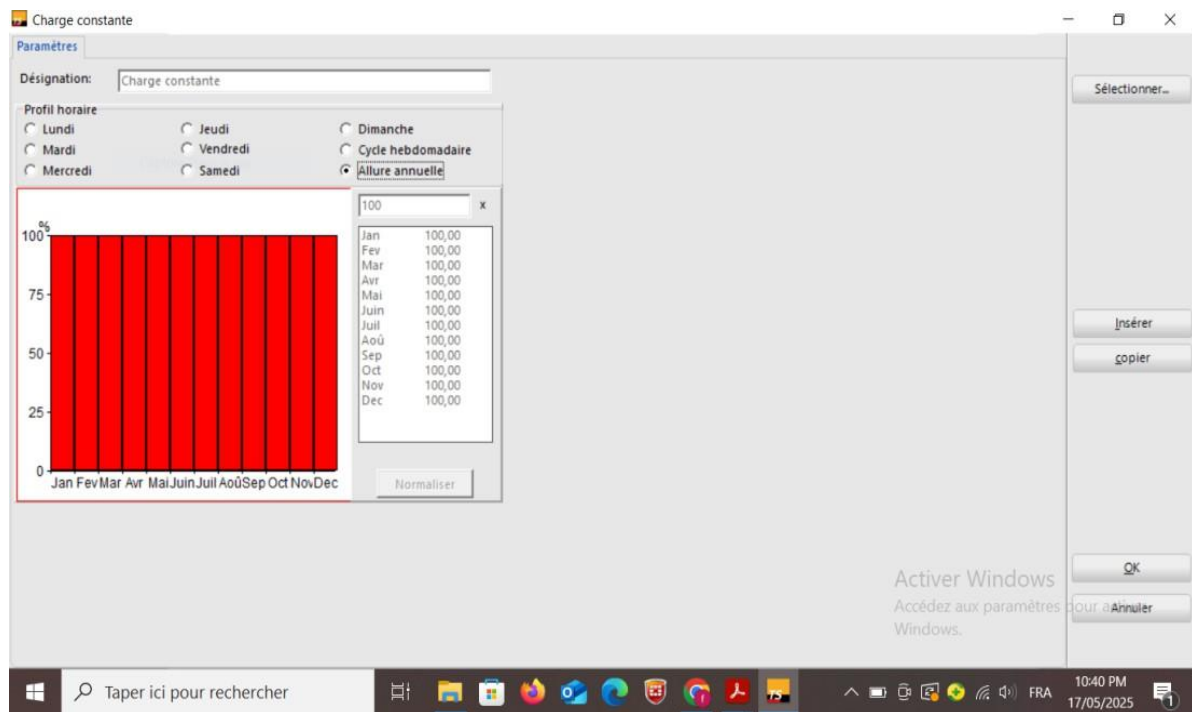


Figure III. 36 : graphique a barres de charge stable

Dans cette capture d'écran, l'interface montre la définition d'un profil de charge constante sur T*SOL. Le graphique rouge à barres représente la répartition mensuelle de la charge, indiquant que celle-ci est fixée à 100 % pour chaque mois de l'année. Cela signifie que la demande énergétique simulée est identique de janvier à décembre, sans variation saisonnière. L'option sélectionnée est "Allure annuelle", ce qui confirme que le profil est uniforme sur toute l'année. Un tel profil est utilisé généralement pour des bâtiments où la consommation reste constante, comme les hôpitaux, les usines ou certaines applications industrielles nécessitant une fourniture continue d'eau chaude ou de chauffage.

- Paramètres de la boucle ECS

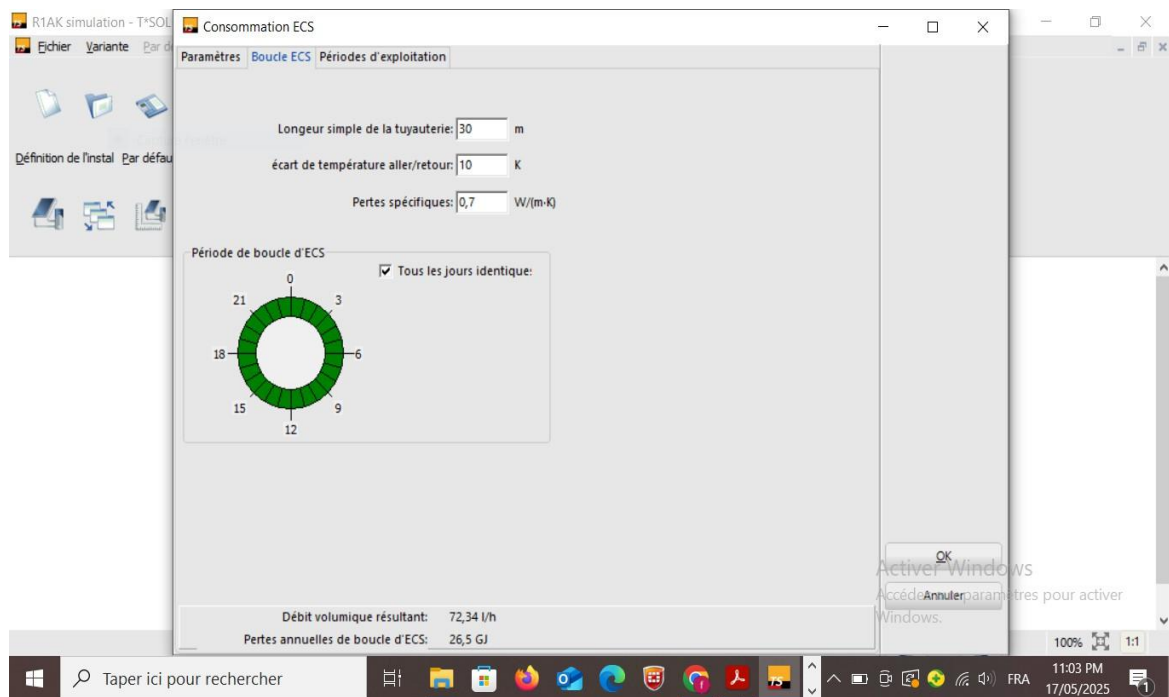


Figure III. 37 : Réglages du circuit d'eau chaude sanitaire

Capture concerne la configuration de la boucle de recirculation d'eau chaude sanitaire (ECS). Plusieurs paramètres y sont définis : la longueur de tuyauterie est de 30 mètres, ce qui correspond à la distance aller-retour entre le ballon et le point de puisage le plus éloigné. L'écart de température aller/retour est fixé à 10 kelvins, ce qui représente la différence de température entre l'eau chaude envoyée et celle qui revient. Les pertes spécifiques sont de 0,7 W/(m·K), indiquant un niveau d'isolation moyen de la tuyauterie. Le diagramme circulaire montre que la boucle fonctionne 24 heures sur 24, tous les jours de la semaine, comme l'indique la case cochée "Tous les jours identique". Enfin, en bas de la fenêtre, le logiciel calcule les résultats suivants : un débit volumique de 72,34 litres par heure et des pertes annuelles de 26,5 GJ, ce qui donne une idée de l'énergie perdue simplement pour maintenir la température dans les tuyaux.

- **Période d'exploitation de la production ECS**

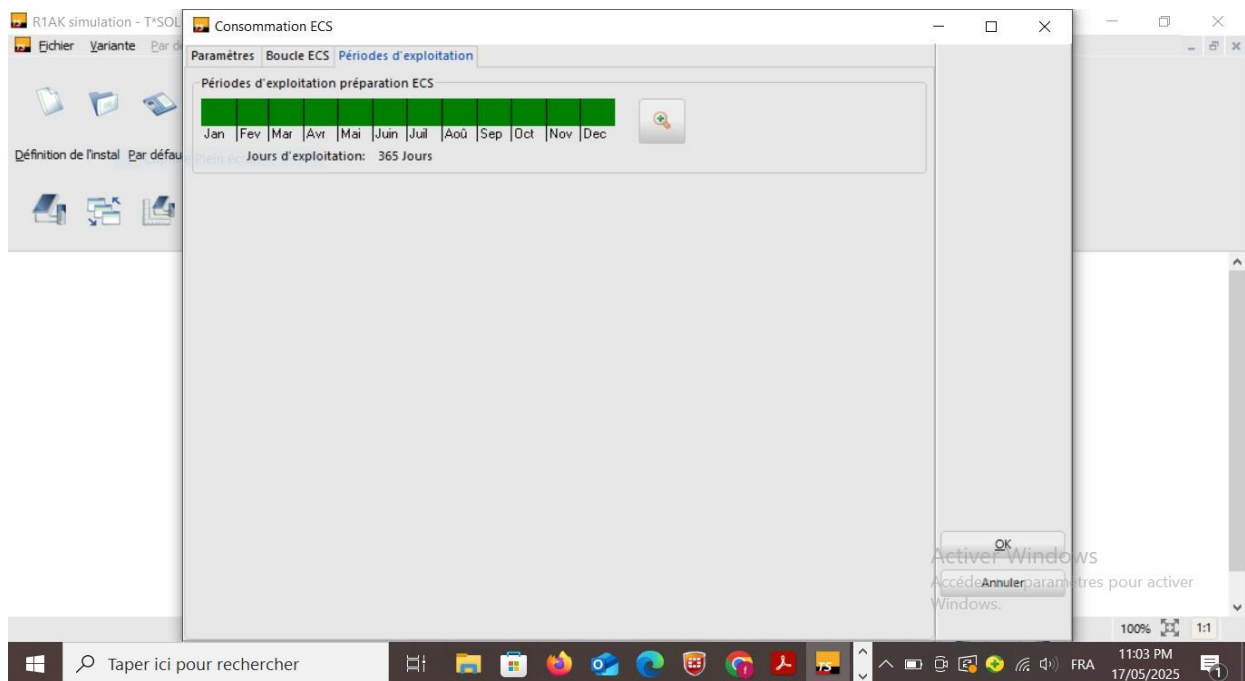


Figure III.38 : Durée de fonctionnement de la production d'eau chaude sanitaire

Capture concerne la période d'exploitation de la production d'ECS. On observe ici un tableau mensuel où chaque mois est représenté par une barre verte, indiquant que la production d'eau chaude est active toute l'année, sans interruption. En bas de la fenêtre, il est précisé que le système fonctionne 365 jours par an, ce qui signifie que l'eau chaude est disponible en continu. Cette configuration est adaptée aux bâtiments ayant une demande permanente en eau chaude, comme les logements, les hôtels ou les établissements de santé. Le système est donc configuré pour fournir l'ECS à tout moment, ce qui a une incidence sur la consommation annuelle d'énergie.

- **Besoin thermique**

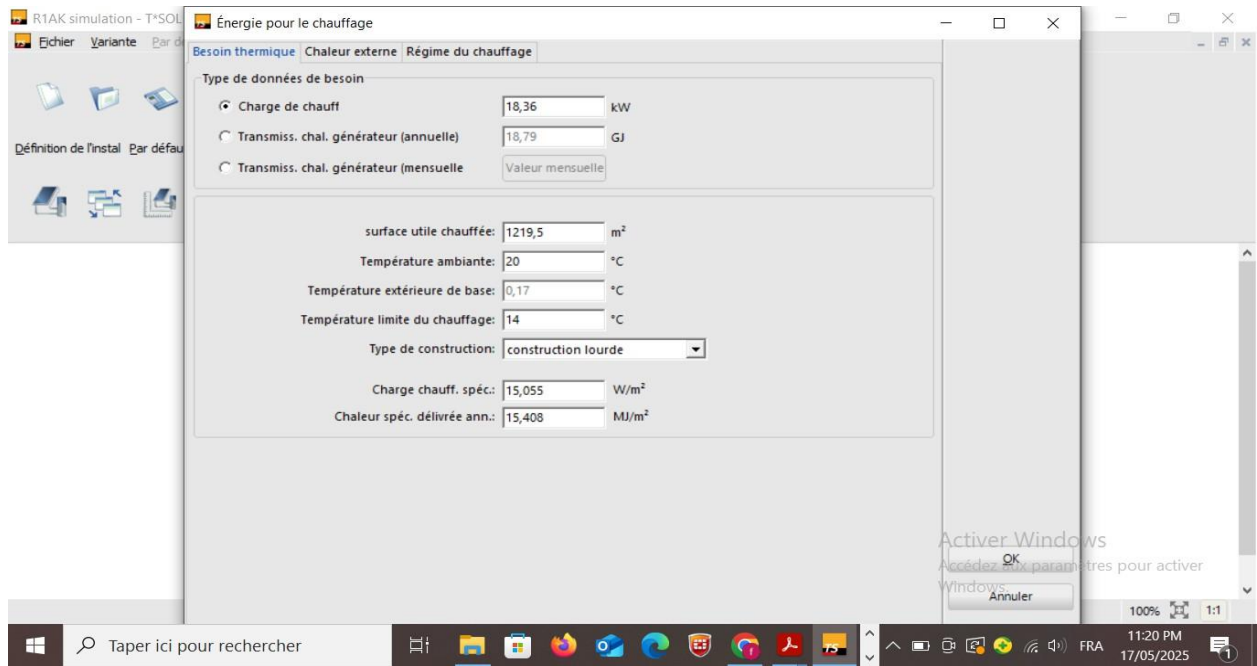


Figure III. 39 : Consommation thermique nécessaire

Capture présente les données de besoin thermique pour le chauffage dans le logiciel T*SOL. On y voit que la surface utile chauffée est de 1219,5 m², avec une température ambiante souhaitée de 20 °C. La température extérieure de base est de 0,17 °C, ce qui correspond à une température de référence pour le dimensionnement en période hivernale. La température limite du chauffage est fixée à 14 °C, au-delà de laquelle le chauffage est coupé. Le type de construction est défini comme "construction lourde", ce qui indique une forte inertie thermique. La puissance maximale de chauffage nécessaire est de 18,36 kW, soit une charge spécifique de 15,055 W/m². L'énergie annuelle transmise au générateur est de 18,79 GJ, ce qui équivaut à une chaleur spécifique annuelle de 15,408 MJ/m². Cette fenêtre permet d'estimer les besoins thermiques du bâtiment afin de bien dimensionner le système de chauffage.

- **Chaleur externe**

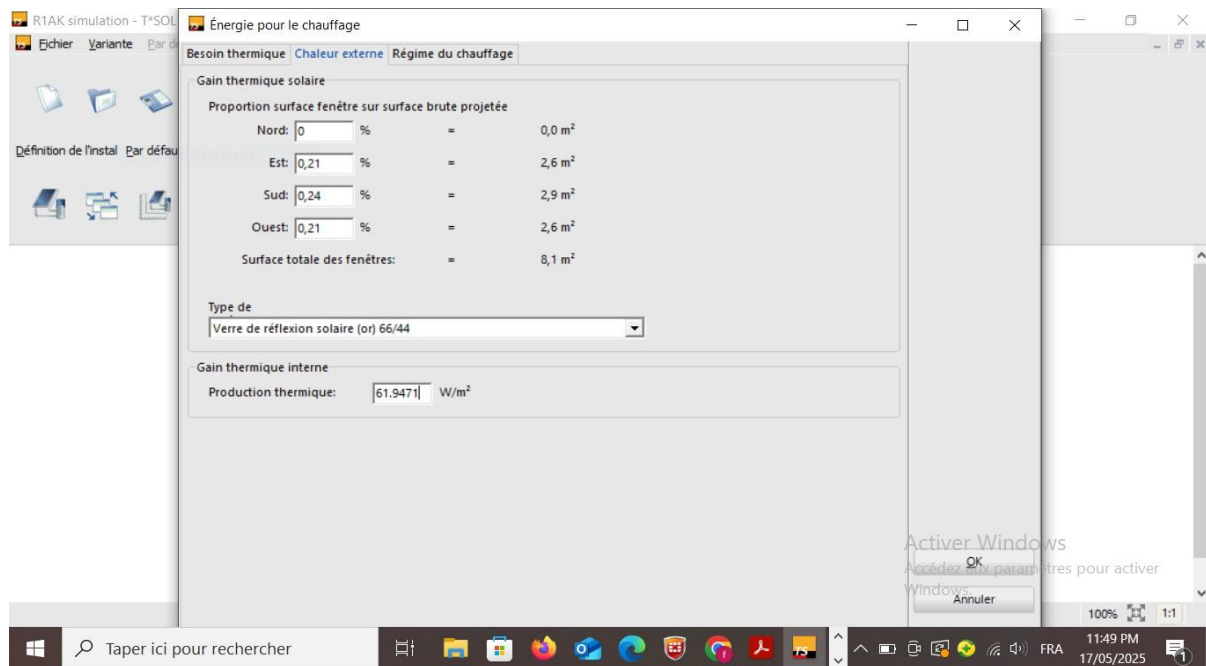


Figure III. 40 : Apport de chaleur externe

Capture d'écran concerne les gains thermiques externes et internes. Elle détaille la proportion de surface vitrée par orientation : aucune ouverture au nord, et des surfaces vitrées très faibles aux autres orientations (2,6 m² à l'est et à l'ouest, 2,9 m² au sud), totalisant 8,1 m². Le type de vitrage utilisé est un verre de réflexion solaire 66/44, qui limite les apports solaires tout en laissant passer un certain pourcentage de lumière. En ce qui concerne les apports internes, la production thermique interne est de 61,9471 W/m². Cette valeur représente les apports de chaleur générés par les occupants, l'éclairage et les équipements internes du bâtiment plus l'apport solaire. Ces gains contribuent à réduire la demande de chauffage en apportant une part d'énergie gratuite.

- Régime du chauffage

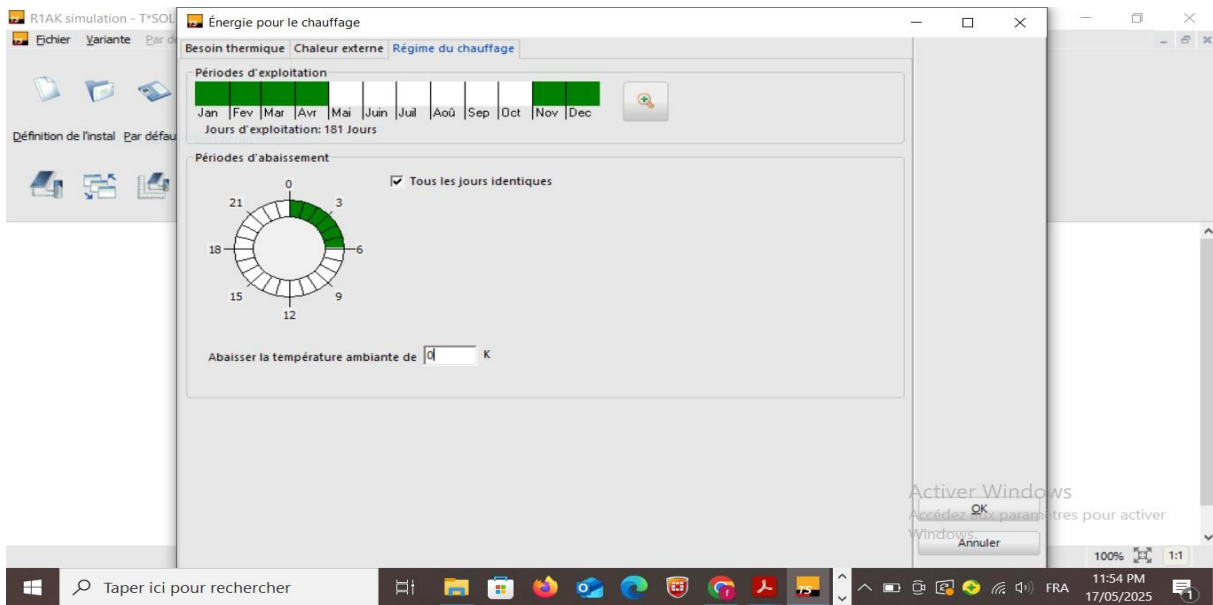


Figure III. 41 : Profil de fonctionnement du chauffage

Capture d'écran illustre le régime de chauffage, c'est-à-dire la période pendant laquelle le chauffage est actif et les éventuelles réductions de température selon les horaires. Les mois de fonctionnement du chauffage sont janvier à avril et novembre à décembre, soit 181 jours par an. Le champ d'abaissement soit réglé à 0 Kelvin, ce qui signifie qu'en réalité, aucune réduction de température n'est appliquée. Cette interface permet de moduler le chauffage en fonction de l'occupation réelle.

- **Configuration du circuit de chauffage dans T*SOL**

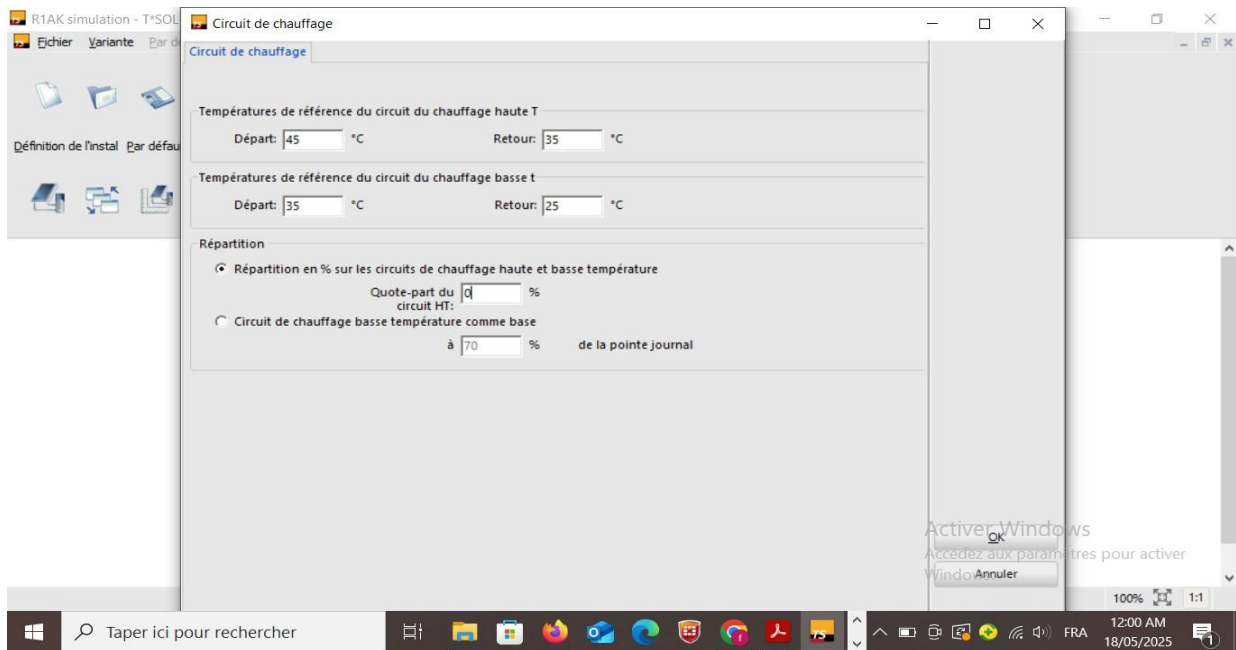


Figure III. 42: Configuration du circuit de chauffage dans T*SOL

Dans cette étape, on configure les températures de référence des circuits de chauffage haute et basse température. Pour le circuit de chauffage haut température (HT), on fixe une température de départ à 45 °C et une température de retour à 35 °C. Quant au circuit de chauffage basse température (BT), les températures sélectionnées sont de 35 °C au départ et 25 °C au retour, ce qui est cohérent avec les exigences des systèmes de chauffage par le sol ou à basse consommation.

La répartition de la puissance entre les deux circuits se fait en pourcentage. Ici, 0 % de la puissance est attribuée au circuit haut température, ce qui signifie que le circuit basse température est utilisé comme base principale du système

Ce choix de privilégier le chauffage basse température permet de maximiser le rendement du système solaire thermique, puisque les capteurs sont plus efficaces à basse température.

À cette étape, on revient sur cette interface afin de poursuivre la simulation en sélectionnant la partie « composants » de l'installation.

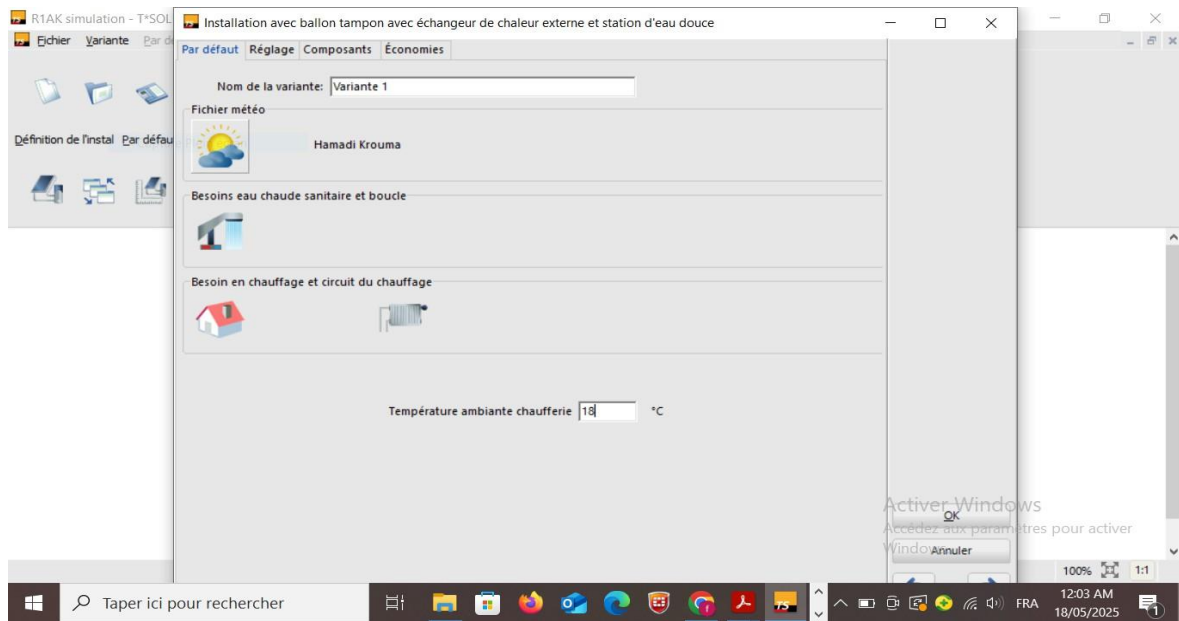


Figure III. 43: Interface de T*sol dédiée à la configuration des composants.

- **Configuration des composants**

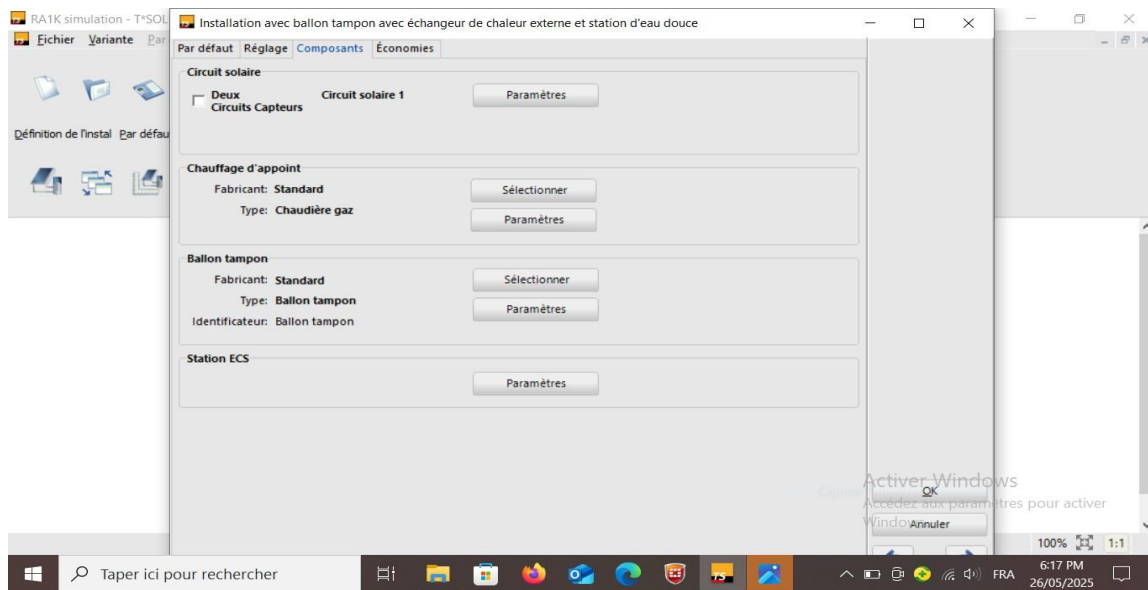


Figure III. 44 : Paramétrage des composants

Cette capture d'écran montre la fenêtre de configuration des composants principaux dans le logiciel T*SOL 2021. Elle nous permet de définir les éléments qui composent l'installation solaire thermique. On y voit que le circuit solaire est configuré avec un seul circuit de capteurs (l'option "Deux circuits capteurs" n'est pas cochée). La partie chauffage d'appoint indique que le système utilise une chaudière à gaz de type standard. Le ballon tampon est également de type standard et il est identifié comme "Ballon tampon". Enfin, une station d'eau chaude sanitaire (ECS) est incluse. Cette étape est essentielle dans la simulation pour spécifier tous les équipements du système.

• Choix et dimensionnement des capteurs solaires pour l'installation

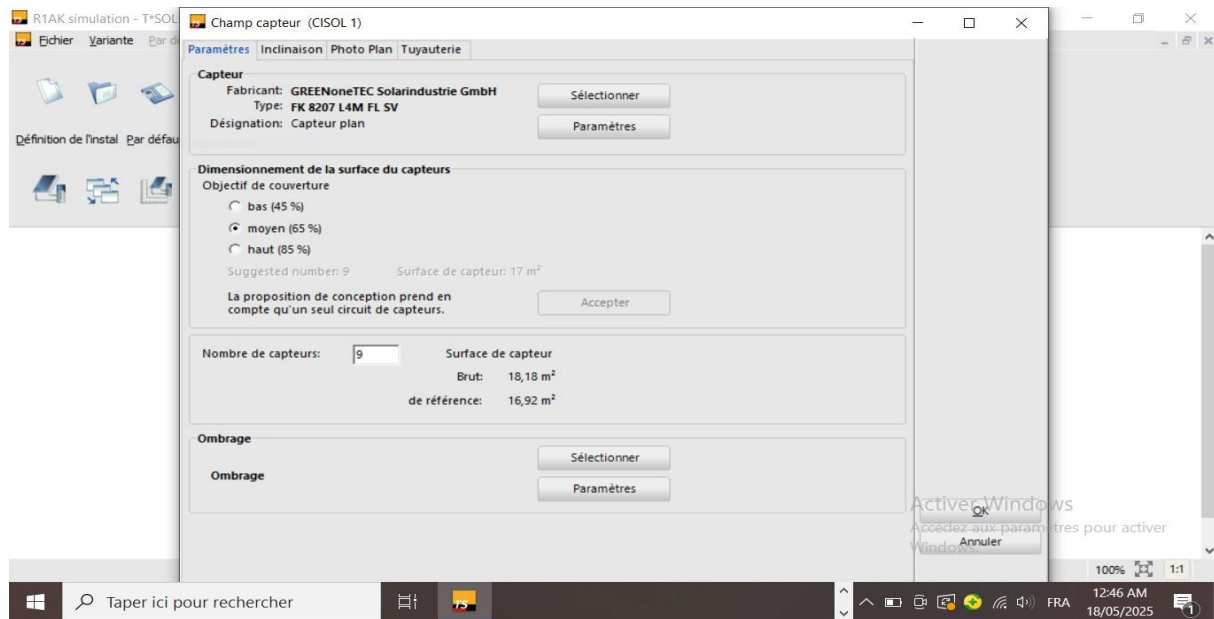


Figure III.45 : Choix et dimensionnement des capteurs solaires pour l'installation

Dans cette étape, nous choisissons le type de capteur qui convient le mieux à notre installation, ici le capteur GREENoneTEC Solarindustrie GmbH type FK 8207 L4M FL SV. Ce capteur a été sélectionné pour son rendement élevé et sa compatibilité avec notre système.

Ensuite, nous déterminons le nombre de capteurs nécessaires en fonction des besoins énergétiques de l'installation. Nous choisissons également la surface totale que ces capteurs vont couvrir afin d'assurer une production suffisante d'énergie thermique.

- **Schéma système a eau avec ballon tampon**

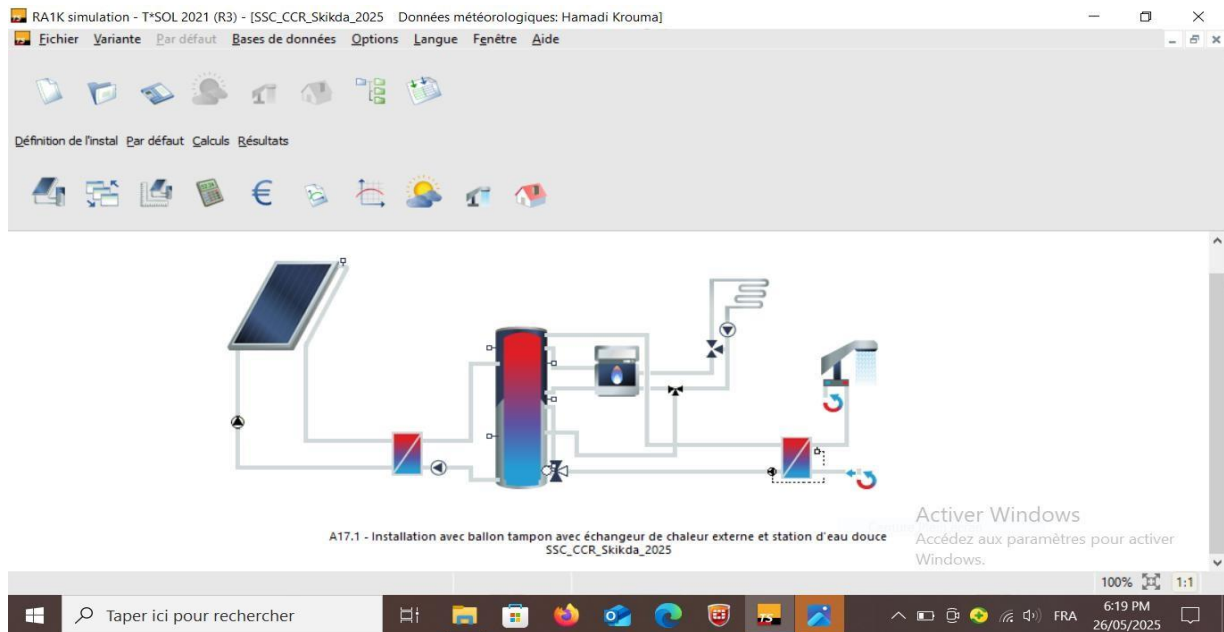


Figure III. 46: Configuration d'un circuit liquide intégrant un ballon tampon

Capture représente le schéma fonctionnel choisit pour le système solaire thermique simulé dans T*sOL, nommé "A17.1 – Installation avec ballon tampon avec échangeur de chaleur externe et station d'eau douce".

- **Système à capteur à air**

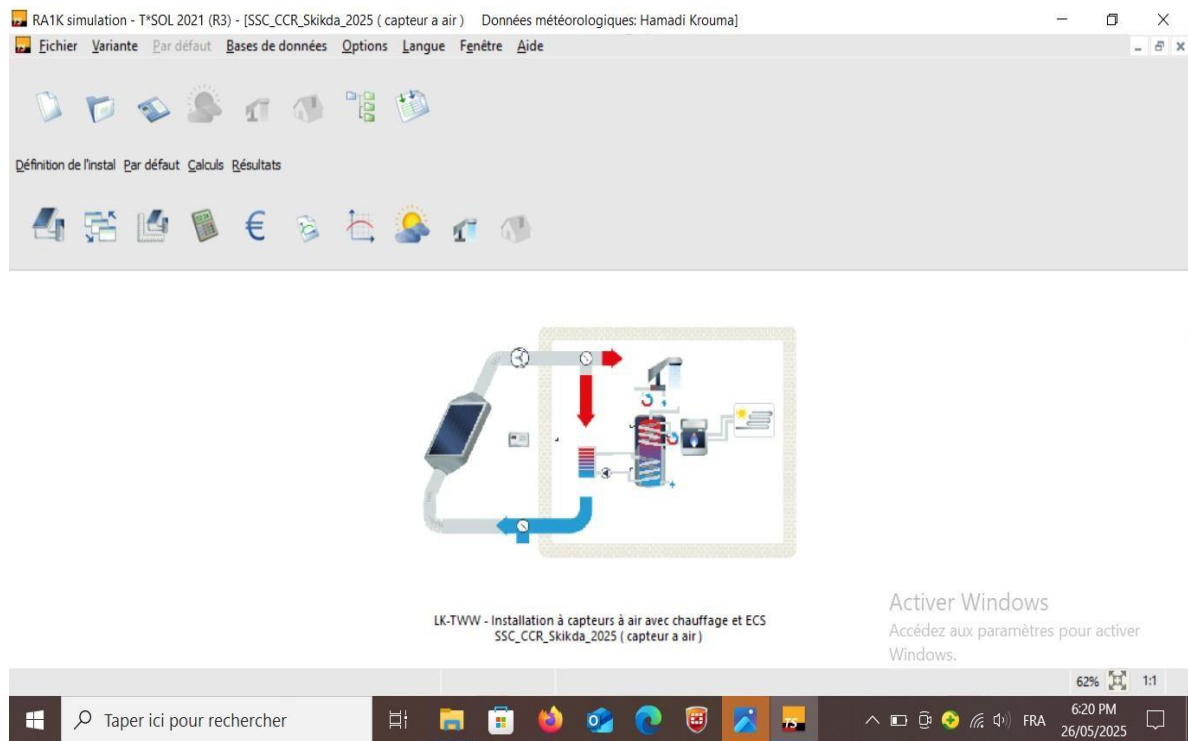


Figure III. 47 : Système à capteur à air

Capture illustre un système différent : une installation solaire thermique utilisant des capteurs à air au lieu de capteurs à eau. Le schéma correspond à l'installation "LK-TWW – Installation à capteurs à air avec chauffage et ECS". (Pour la deuxième simulation)

- Configuration de la simulation et filtres

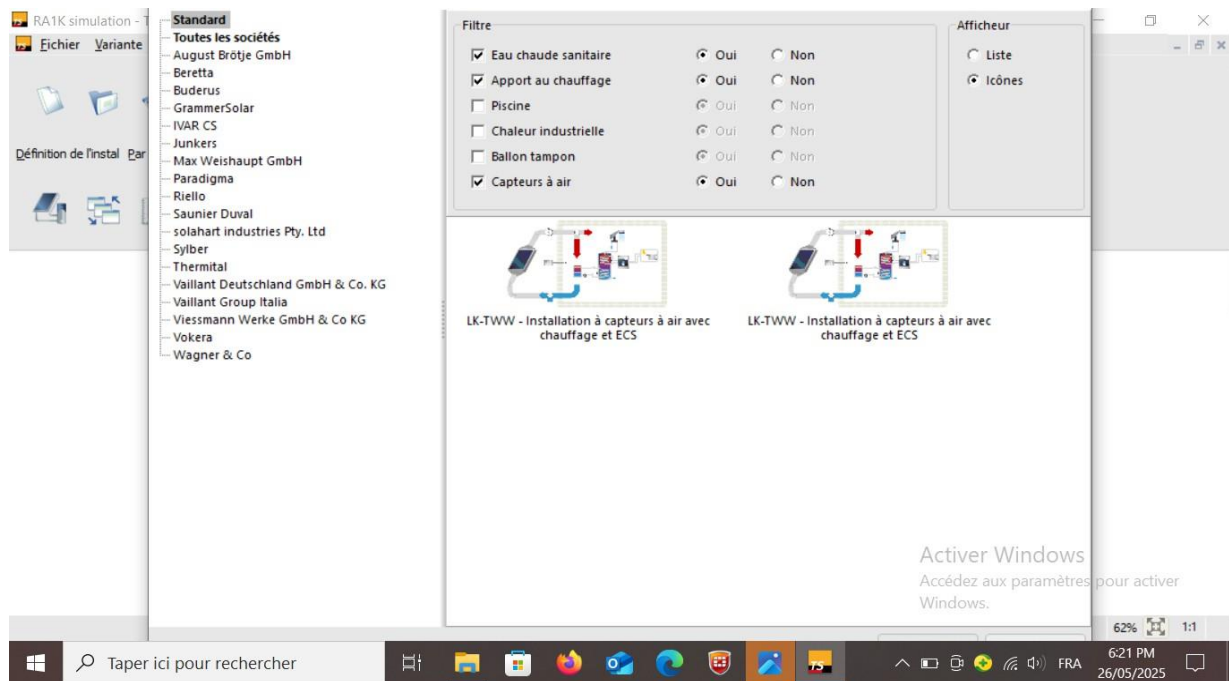


Figure III. 48 : Réglages de la simulation RA1K ainsi que des filtres

Cette capture d'écran montre l'interface de configuration d'une simulation thermique RA1K. Elle liste plusieurs fabricants d'équipements thermiques (Vaillant, Viessmann, Buderus, etc.) et permet d'appliquer des filtres pour cibler des fonctionnalités spécifiques, comme l'apport au chauffage ou les capteurs à air. L'utilisateur a choisi d'afficher les résultats sous forme d'icônes plutôt qu'en liste. Une option pour une installation combinant capteurs à air, chauffage et eau chaude sanitaire (LK-TWW) est présente.

- **Dimensions et caractéristiques du bâtiment**

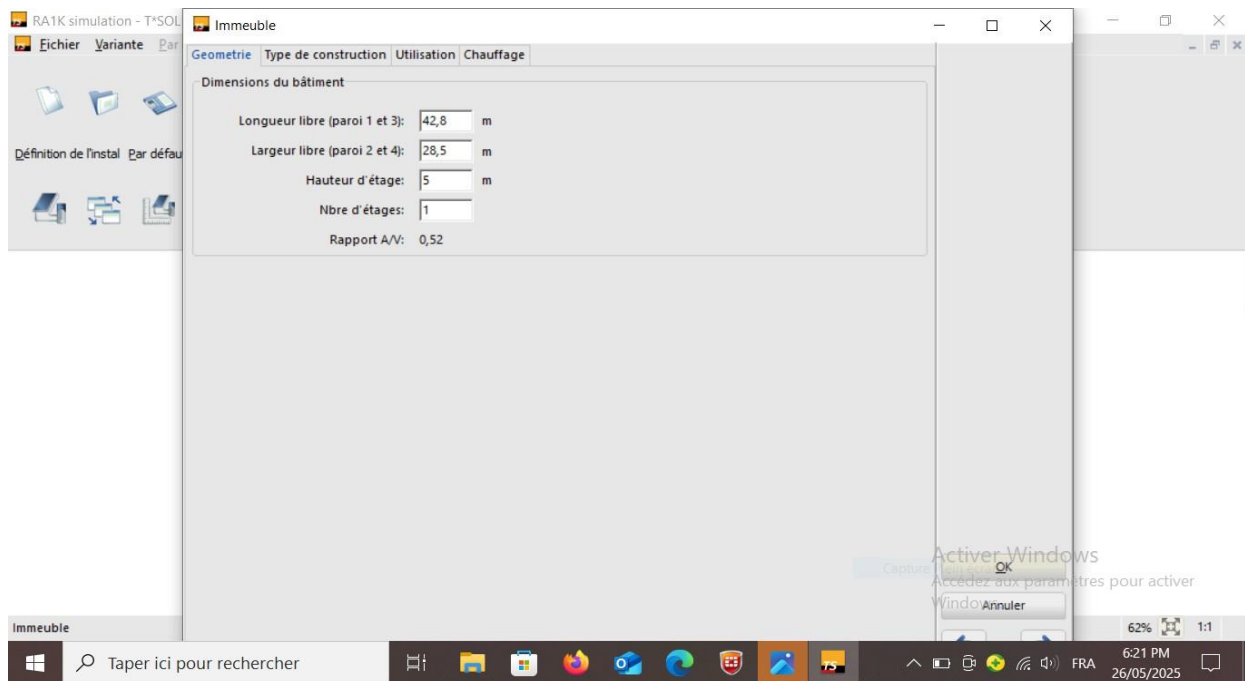


Figure III. 49: Caractéristiques géométriques et techniques du bâtiment

Cette capture concerne les paramètres géométriques d'un bâtiment dans le module "T*SOL" de la simulation RA1K. Elle indique que le bâtiment utilise un chauffage conventionnel et fournit ses dimensions précises : longueur (42,8 m), largeur (28,5 m), hauteur d'étage (5 m), et un seul étage. Le rapport surface/volume (A/V) est de 0,52, ce qui donne une idée de sa compacité.

- **Système de chauffage et capteurs à air**

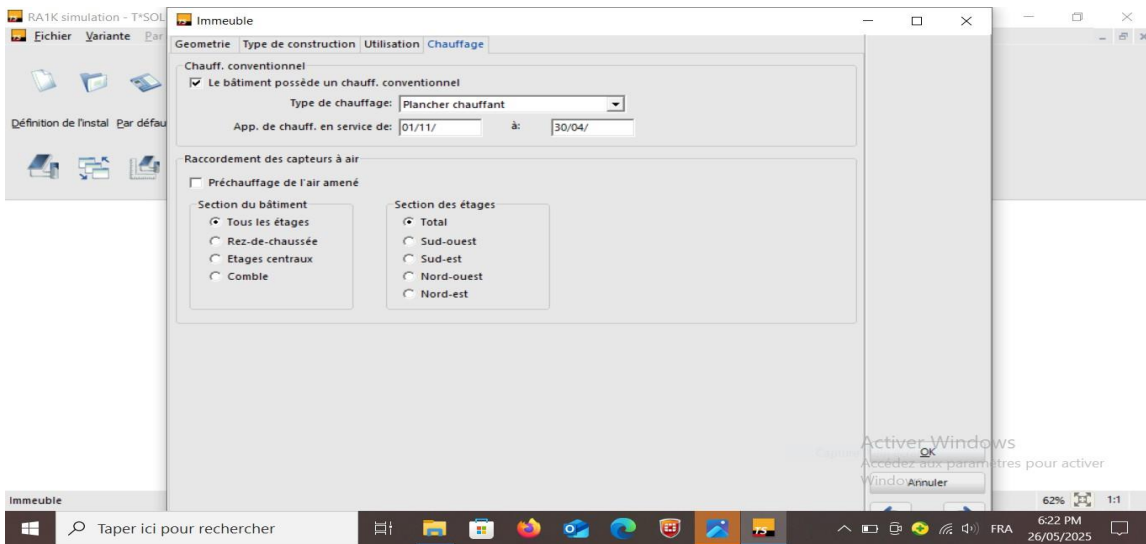



Figure III. 50 : Circuit de chauffage utilisant des capteurs à air

Cette capture détaille les spécificités du système de chauffage et des capteurs à air dans le bâtiment simulé. Elle confirme l'utilisation d'un plancher chauffant, actif du 1er novembre au 30 avril. Les capteurs à air sont configurés pour préchauffer l'air amené et sont répartis dans différentes zones du bâtiment. Les étages sont également divisés en sections géographiques (Sud-ouest, Nord-est, etc.), ce qui permet une gestion thermique optimisée en fonction de l'orientation et des besoins spécifiques de chaque zone. Ces paramètres sont essentiels pour adapter la simulation aux caractéristiques réelles du bâtiment.

Une fois l'ensemble des paramètres de simulation correctement définis, l'exécution de la simulation peut être lancée via ce bouton  .

À l'issue de cette opération, le logiciel T*SOL génère un rapport complet du projet, accompagné de diagrammes détaillés illustrant les performances énergétiques du système simulé. Ces résultats sont accessibles à travers une interface claire, comme le montre l'exemple ci-dessous.

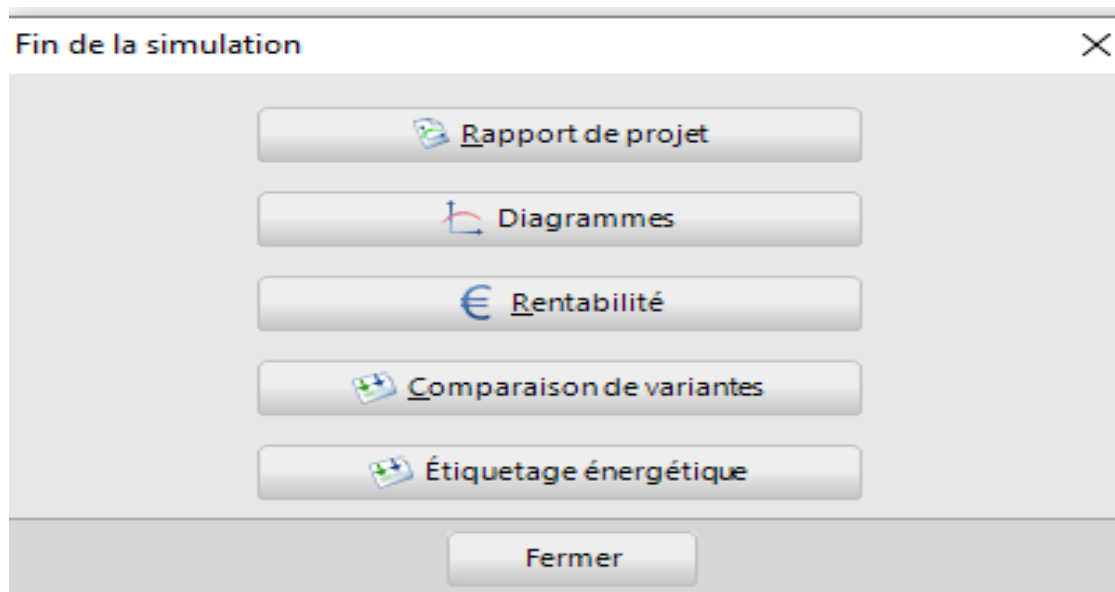


Figure III. 51: Fin du processus de simulation

III.12 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté une synthèse des différents systèmes de chauffage solaire et de chauffe-eau solaire, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement et leurs applications variées. Par ailleurs, nous avons fait référence à un logiciel dédié, dont l'utilisation permet d'accompagner l'analyse et la modélisation de ces systèmes, sans toutefois détailler son fonctionnement. Cette approche globale offre un cadre professionnel et structuré, essentiel pour approfondir par la suite les aspects techniques de ces solutions énergétiques.

IV. Chapitre 04 : Étude Comparative et Interprétation des Résultats

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats des simulations réalisées pour les deux configurations de systèmes solaires combinés (SSC) envisagées pour le Centre de Contrôle Régional (CCR) de Skikda. À travers une évaluation technique détaillée, les performances énergétiques des deux installations sont comparées selon plusieurs critères : production thermique, couverture solaire, besoins d'appoint et efficacité globale. Cette analyse vise à identifier la solution la plus adaptée aux exigences du site, en tenant compte à la fois de son potentiel solaire et de ses contraintes d'exploitation.

IV.2 Présentation descriptive du CCR au sein du complexe de raffinage RA1K

Le Centre de Contrôle Régional (CCR), situé au cœur du complexe de raffinage RA1K à sonatrach Skikda, constitue le centre névralgique de la supervision et de la gestion des unités de production. Véritable pilier stratégique, il assure un pilotage centralisé, en temps réel, des procédés industriels grâce à une infrastructure technologique de pointe.



Figure IV.1 : illustration du centre de contrôle régional

Le système de contrôle-commande repose sur une plateforme DCS de marque Yokogawa, reconnue pour sa robustesse et sa précision en automatisation industrielle. Cette architecture permet une surveillance continue et une commande à distance des équipements critiques (vannes, pompes,

compresseurs, échangeurs), via des interfaces homme-machine (IHM) ergonomiques et un réseau de communication fiable. La possibilité d'intervention manuelle rapide garantit la sécurité et la continuité des opérations.

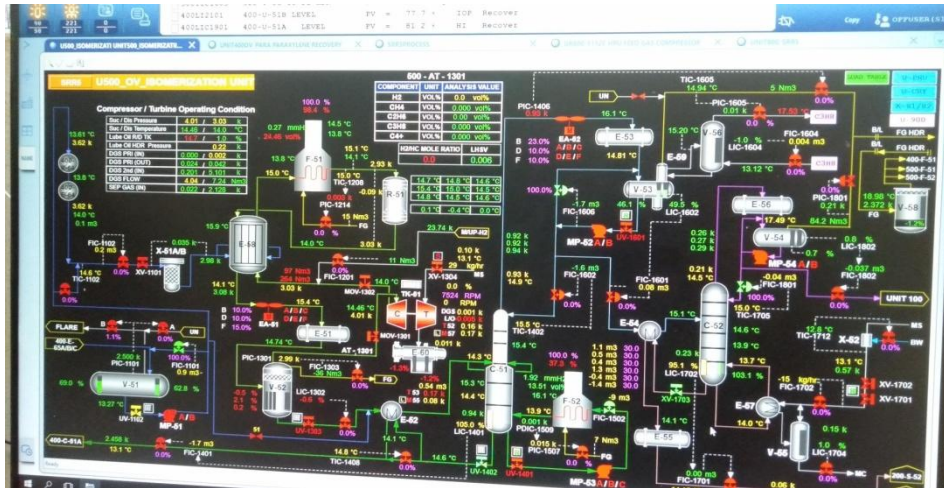


Figure IV.2 : Exemple d'affichage temps réel sur Yokogawa DCS – Photo mobile

En parallèle, le CCR est doté d'une Gestion Technique du Bâtiment (GTB) centralisée. Celle-ci repose sur des automates programmables interconnectés à des capteurs intelligents, assurant une collecte en temps réel des données relatives aux conditions ambiantes, à la consommation énergétique et au fonctionnement des équipements. Cette surveillance permanente permet la détection précoce des anomalies, une maintenance préventive efficace et une optimisation continue des performances énergétiques.

Malgré un climat méditerranéen globalement favorable, les équipements sensibles du CCR (électroniques et informatiques) nécessitent une température intérieure stable, autour de 20 °C, afin d'assurer leur bon fonctionnement et leur longévité. Pour répondre à cette exigence, le bâtiment bénéficie d'une isolation thermique externe lourde, limitant les échanges thermiques avec l'extérieur et réduisant significativement les besoins énergétiques.

Au-delà de son rôle opérationnel, le CCR illustre une approche intégrée de la performance énergétique et de la durabilité. Dans cette perspective, une simulation énergétique a été réalisée avec le logiciel T*SOL afin d'évaluer la faisabilité d'un système solaire thermique. Cette étude vise à couvrir, partiellement ou totalement, les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire du bâtiment, contribuant ainsi à la transition énergétique du site.

IV.3 Données du site et évaluation énergétique du CCR

IV.3.1 Données géographiques et météorologiques du site

L'installation est localisée dans la ville de Skikda, à l'est de l'Algérie, au sein du complexe industriel RA1K. Cette région bénéficie d'un climat méditerranéen tempéré, caractérisé par des étés modérément chauds et secs, et des hivers doux à frais. Ces conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans l'évaluation du potentiel solaire et l'optimisation du rendement d'un système solaire thermique.

Les données utilisées dans la simulation T*SOL sont les suivantes :

- **Localisation** : Skikda – Hamadi Krouma – Complexe de raffinage RA1K – Sonatrach
- **Latitude** : 36,86°
- **Longitude** : 6,91°
- **Température intérieure de consigne (chauffage)** : 20 °C

Ces valeurs constituent la base climatique intégrée dans le logiciel T*SOL pour la simulation énergétique.

IV.3.2 Données d'occupation et caractéristiques thermiques du bâtiment

Le bâtiment concerné est le Centre de Contrôle Régional (CCR), infrastructure hautement technologique destinée à la supervision des unités de production. Il présente les caractéristiques suivantes :

- **Surface habitable estimée** : 1219,5 m².
- **Volume chauffé** : environ 6097,5 m³.
- **Nombre d'occupants** : 70 personnes.
- **Horaires d'occupation** : 24h/24 en rotation.
- **Structure** : murs en béton avec isolation thermique externe, toiture plate isolée, vitrages triple épaisseur.

a. Toiture en béton

Détails de la toiture :

- **Couleur de la surface extérieure** : Moyenne
- **Valeur U globale** : 0,394 W/(m²·°K)

Couches de la toiture (de l'intérieur vers l'extérieur) :

Couche	Épaisseur (mm)	Résistance thermique R ((m ² ·°K)/W)	Poids (kg/m ²)
Résistance surface intérieure	0.000	0.16000	0.0
Béton léger 250 mm	250.000	0.31850	400.0
Isolation polystyrène 40 mm	40.000	1.92596	1.1
Feuille bitumineuse 3 mm	3.000	0.07222	3.4
Gravier 50 mm	50.000	0.01428	112.0
Résistance surface extérieure	0.000	0.04400	0.0

Tableau IV.1 : Caractéristiques des couches de la toiture modélisée dans T*SOL

→ **Épaisseur totale** : 343 mm

→ **Résistance thermique totale** : 2,53 (m²·°K)/W

b. Mur en blocs

Détails du mur :

- **Couleur de la surface extérieure** : Moyenne
- **Valeur U globale** : 0,335 W/(m²·°K)

Couches du mur (de l'intérieur vers l'extérieur)

Couche	Épaisseur (mm)	Densité (kg/m ³)	Résistance thermique R ((m ² ·°K)/W)	Poids (kg/m ²)
Résistance surface intérieure	0.000	0.0	0.12000	0.0
Mortier de ciment 25 mm	25.000	1600.0	0.03464	40.0
Bloc 100 mm	100.000	1550.0	0.13757	155.0
Isolation en panneau 50 mm	50.000	29.0	2.40746	1.5
Bloc 150 mm	150.000	1550.0	0.20635	232.5
Mortier de ciment 25 mm	25.000	1600.0	0.03463	40.0
Résistance surface extérieure	0.000	0.0	0.04400	0.0

Tableau IV.2 : Caractéristiques des couches de la mure modélisée dans T* SOL

→ Épaisseur totale : 350 mm

→ Résistance thermique totale : 2,98 (m²·°K)/W

c. Charge thermique par local

Zone	Calcul détaillé	Charge thermique (W)
Salle à manger	$(54 \times 0,394 \times 15) + (25,5 \times 0,335 \times 15)$	445,77
Couloir	$(385 \times 0,394 \times 15) + (28 \times 0,335 \times 15) + (60 \times 0,335 \times 15) + (18 \times 0,335 \times 15)$	2 808,00
Vestiaire	$(231 \times 0,394 \times 15) + (39 \times 0,335 \times 15)$	1 561,19
Bureau responsable unité	$23 \times 0,394 \times 15$	135,93
Salle de conférence	$(56,5 \times 0,394 \times 15) + (54 \times 0,335 \times 15) + (54 \times 0,335 \times 15)$	876,62
Sanitaires	$(40 \times 0,394 \times 15) + (40 \times 0,335 \times 15)$	437,40
Consoles	$(430 \times 0,934 \times 15)$	2 541,30
Fenêtres	$8 \times 0,8 \times 15$	96,00
Portes	$14,5 \times 0,6 \times 15$	130,50
Infiltration d'air	$0,34 \times 0,3 \times 6097,5 \times 15$	9 329,18
Total	18 361,88 W (≈ 18,36 kW)	

Tableau IV.3 : Répartition de la charge thermique par zone dans le CCR

d. Apports thermiques internes

Source	Calcul détaillé	Puissance thermique (W)
Occupants (70 personnes)	70×120	8 400
Ordinateurs (100 unités)	100×300	30 000
Imprimantes laser (10 unités)	10×600	6 000
Machines à café (12 unités)	$12 \times 1 200$	14 400
Réfrigérateurs 160 L (5 unités)	5×150	750
Éclairage	Selon les données du CCR	13 414,5
Total apports internes	72 964,5 W	

Tableau IV.4 : Puissances thermiques internes par source dans le CCR

e. Apports solaires

Élément	Calcul détaillé	Valeur (W)
Apports solaires (surface = 8 m ²)	$8 \times 0,5 \times 145$	580

Tableau IV.5 : Apports solaires calculés pour les surfaces vitrées du CCR

f. Synthèse des gains thermiques

Type de gain	Valeur (W)
Apports internes	72 964,5
Apports solaires	580
Total des gains	73544,5 W

Tableau IV.6 : Répartition des apports thermiques internes et solaires dans le CCR

g. Production moyenne des gains thermiques

Paramètre	Valeur
Surface chauffée (S)	1 219,5 m ²
Production thermique spécifique	60,31 W/m²

Tableau IV.7 : Production thermique spécifique par unité de surface du CCR

IV.4 Dimensionnement thermique du CCR

IV.4.1 Eau chaude sanitaire (ECS)

Bien que le CCR soit principalement un espace technique, une demande en eau chaude sanitaire est présente pour couvrir les besoins essentiels du personnel (lavabos, sanitaires, douches).

Paramètres intégrés à la simulation :

- **Consommation journalière moyen** : 700 L/jour
- **Besoin annuelle en eau chaude sanitaire ECS** : 10383,24 kWh/an
- **Température de consigne ECS** : 45 °C
- **Boucle ECS** : présente
- **Température de l'eau froide** :
 - hiver (février) : 16 °C
 - été (août) : 20 °C

IV.4.2 Besoins en chauffage

Le maintien permanent de la température intérieure à 20 °C, nécessaire à la stabilité des équipements électroniques sensibles, impose une charge thermique continue.

- **Les besoins en chauffage annuelle** : 79315,2 kWh/an
- **Besoin référence en flux de chaleur du bâtiment**: 18,36 kW
- **Température externe standard**: 0,17 °C
- **Températures de référence** : 35 °C/25 °C

Ces données permettent de simuler précisément la performance énergétique d'un système solaire thermique combiné (chauffage + ECS).

IV.4.3 Configurations des systèmes solaires simulés pour le CCR

Dans le cadre de la simulation énergétique du Centre de Contrôle Régional (CCR) de la raffinerie RA1K à Skikda, deux configurations de systèmes solaires combinés (SSC) ont été étudiées à l'aide du logiciel T*SOL :

a. Système à capteurs à air avec ballon bivalent :

Cette installation utilise des capteurs à air couplés à un échangeur air/eau, avec stockage dans un ballon bivalent. L'appoint est assuré par une chaudière à gaz naturel intégrée.

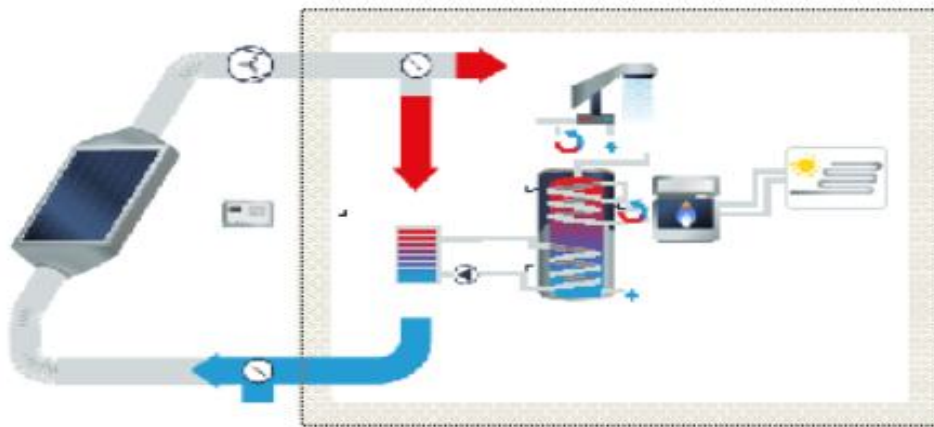


Figure IV.3 : installation à capteur à air avec chauffage et ECS (Simulation : *LKTWW_SSC_CCR_Skikda_2025*)

b. Système à capteurs plans a eau avec ballon tampon et station d'eau douce

Composé de capteurs plans vitrés, d'un ballon tampon, d'un échangeur externe et d'une station d'eau douce pour la production instantanée d'ECS. L'appoint est également fourni par une chaudière à gaz naturel.

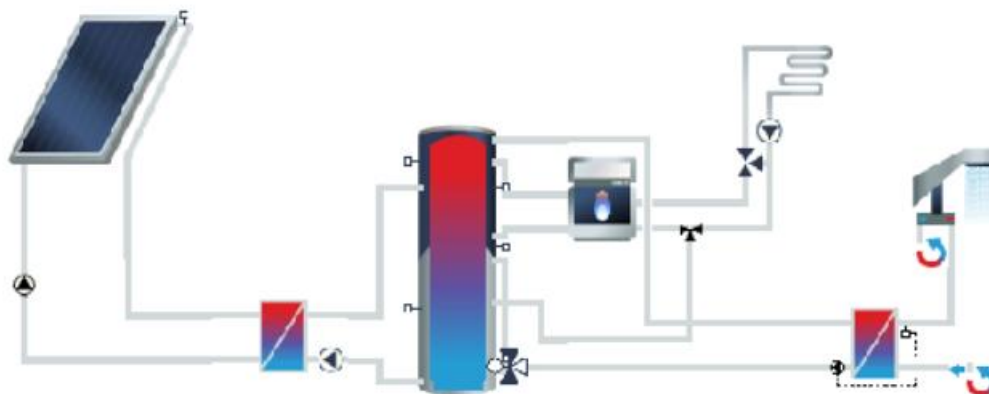


Figure IV.4 : installation avec ballon tampon avec échangeur de chaleur externe et station d'eau douce (Simulation : A17.1 – SSC_CCR_Skikda_2025)

IV.5 Analyse et interprétation détaillée des performances simulées des installations solaires

Le tableau ci-dessous synthétise les spécifications techniques ainsi que les configurations opérationnelles des deux systèmes solaires thermiques analysés dans le cadre de cette étude.

Critère	Capteurs à air	Capteurs à eau avec ballon tampon
Nom du projet	SSC_CCR_Skikda_2025 (air)	SSC_CCR_Skikda_2025 (eau)
Type de capteurs	Capteurs à air vitrés	Capteurs plans vitrés à eau
Fabricant	Standard	GREENoneTEC – FK 8207 L4M FL SV
Nombre de capteurs	50	49
Surface brute installée	100 m ²	98,98 m ²
Surface de référence	90 m ²	92,12 m ²
Inclinaison / Orientation	45° / Sud (180°)	45° / Sud (180°)
Type de stockage	Ballon ECS bivalent – 400 L	Ballon tampon – 5700 L
Station ECS	/	Vitotrans 353 (Viessmann)
Chauffage d'appoint	Chaudière gaz – 40 kW	Chaudière gaz – 88 kW
Type de distribution	Chauffage par air (plancher chauffant)	Chauffage hydraulique basse température (35/25 °C)
Période de chauffage	1er nov. – 30 avril	6 mois

Tableau IV.8 : Caractéristiques techniques et paramètres opérationnels des deux installations solaires thermiques

IV.5.1 Part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie d'appoint

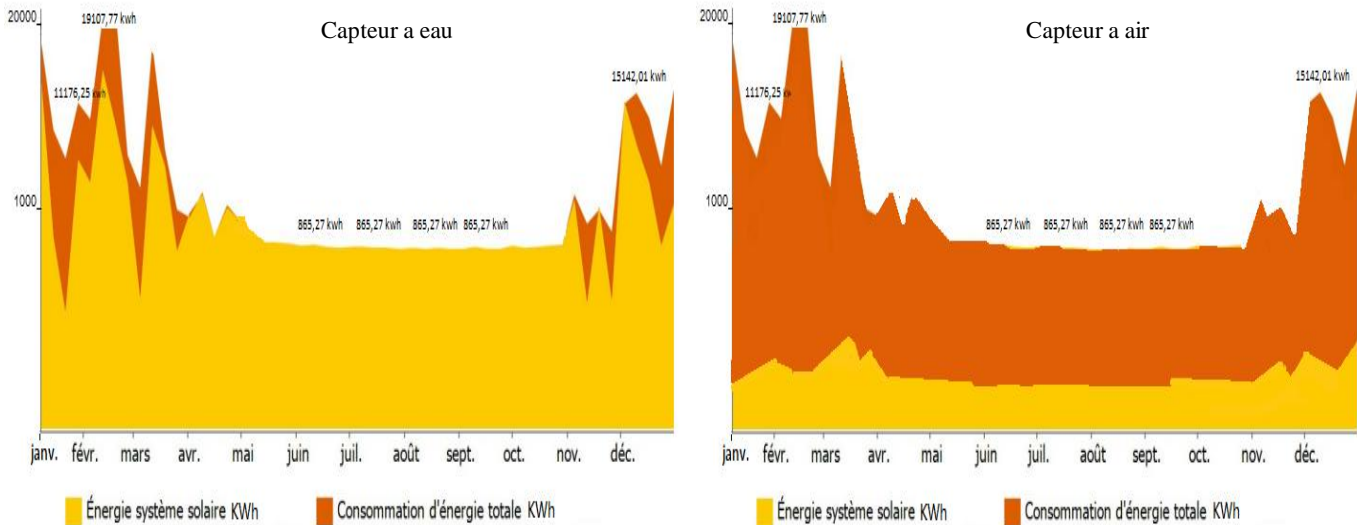


Figure IV.5 : Part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie d'appoint.

- **Observation :**

- Pour l'installation intégrant des capteurs solaires à eau, l'énergie solaire assure 80 % des besoins thermiques annuels, limitant ainsi l'apport de l'énergie d'appoint à seulement 20 %.
- En revanche, dans le cas de l'installation basée sur des capteurs à air, la couverture solaire est nettement inférieure, ne représentant que 30 %, tandis que l'énergie d'appoint doit compenser les 70 % restants.

- **Interprétation :**

- Les deux graphes comparant l'énergie fournie par le système solaire et la consommation d'énergie d'appoint mettent en évidence une nette différence de performance entre les deux types de capteurs. Dans le cas du capteur à eau, on constate que la plus grande partie des besoins énergétiques du CCR est assurée par le système solaire, avec une contribution relativement faible de l'énergie d'appoint. Cela reflète une bonne captation et un bon transfert de chaleur, permettant de couvrir efficacement les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire. À l'inverse, pour le capteur à air, le graphique montre une situation inversée : l'énergie d'appoint devient prédominante, tandis que la contribution du système solaire reste limitée. Cette faible performance est liée aux caractéristiques du capteur à air, dont le rendement est généralement plus faible en raison

des pertes thermiques plus importantes et de la faible capacité de l'air à stocker et transporter la chaleur. Ainsi, ces deux représentations graphiques confirment que le capteur à eau est bien plus adapté aux installations solaires combinées nécessitant un apport énergétique stable et performant.

IV.5.2 La Température maximale mensuelle dans le capteur

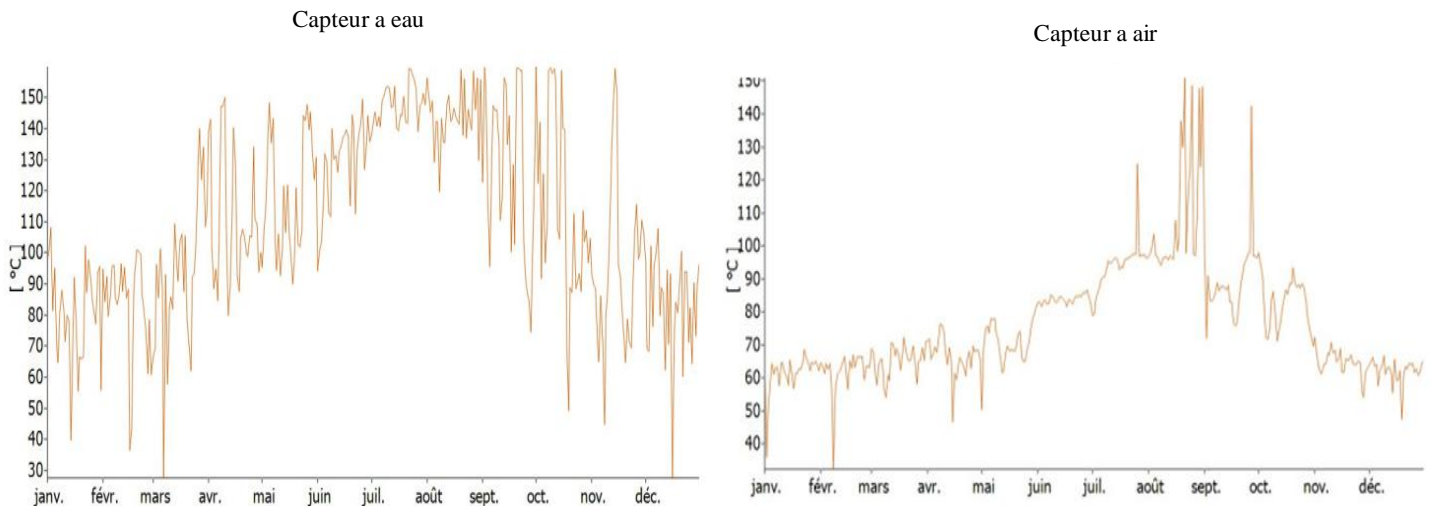


Figure IV.6 : Profil mensuel des températures maximales dans le capteur solaire

- **Interprétation :**

- Les deux graphes comparatifs illustrent de manière claire la différence de performance thermique entre le capteur solaire à eau et le capteur à air. On observe que la courbe de température du capteur à eau reste globalement plus élevée tout au long du mois, ce qui traduit une meilleure capacité à capter et à conserver la chaleur solaire. Cette supériorité s'explique principalement par les propriétés du fluide caloporteur liquide (eau ou mélange eau-glycol), qui possède une conductivité thermique et une capacité calorifique nettement supérieures à celles de l'air. À l'inverse, le capteur à air montre une courbe de température plus basse, avec des variations plus importantes, témoignant de pertes thermiques plus élevées et d'une moindre efficacité. L'air, en tant que fluide léger et peu conducteur, chauffe lentement et restitue mal la chaleur collectée. Cette différence de comportement entre les deux systèmes, clairement visible sur les deux graphes, démontre que le capteur à eau est plus adapté aux applications thermiques exigeantes, comme le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire dans des bâtiments industriels tels que le Centre de Contrôle Régional (CCR).

IV.5.3 Taux de couverture solaire

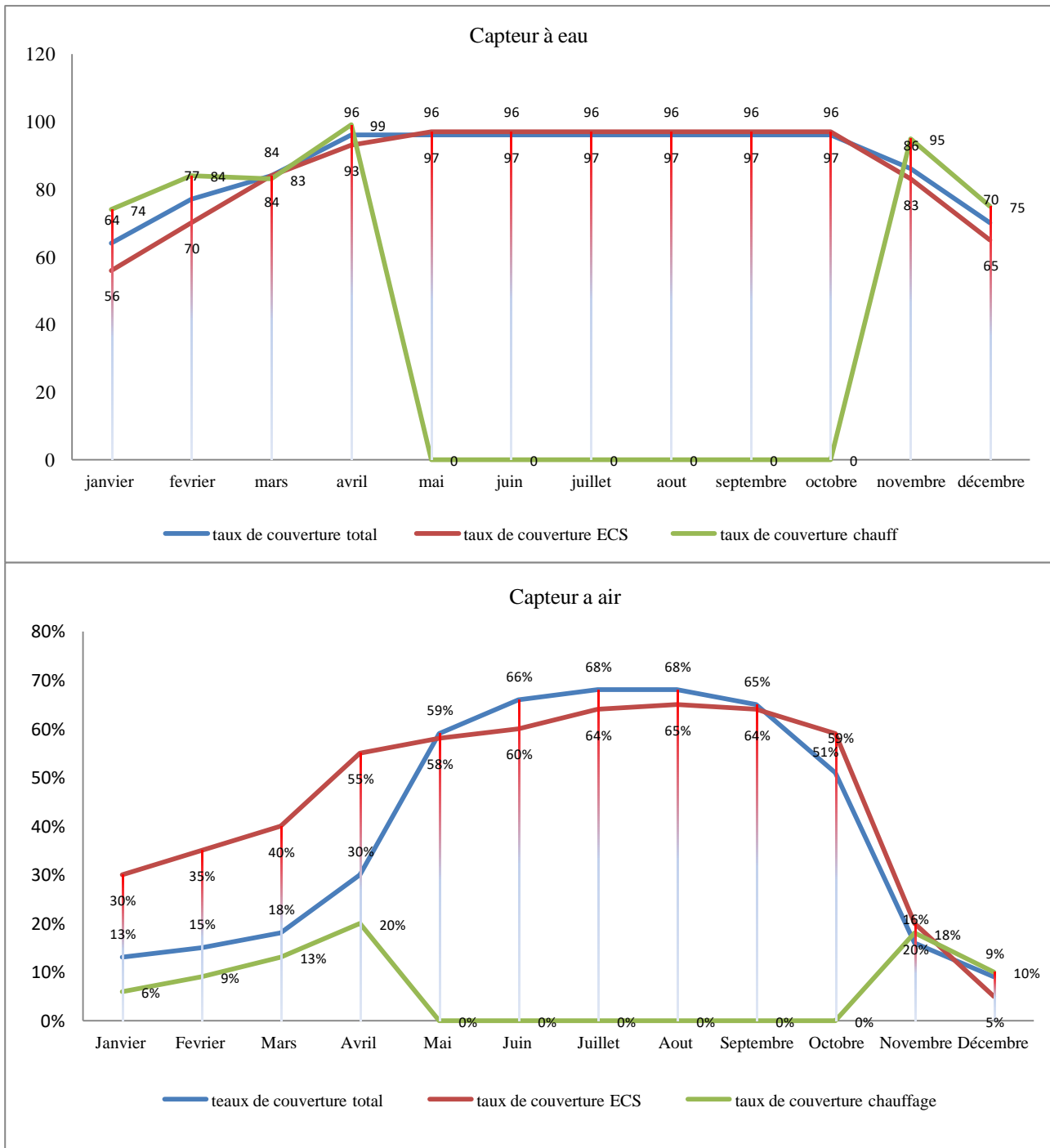


Figure IV.7: Taux de couverture des installations pour capteur à air

- **Observation :**
 - **Capteur à air :** Taux inférieur et forte variabilité saisonnière, avec une chute notable en période froide.
 - **Capteur à eau :** Taux de couverture global annuel élevé (>50%), avec une bonne performance en hiver.
- **Interprétation :**
 - L'analyse met en évidence la supériorité technique du système à capteurs plans à eau, dont les performances thermiques assurent un taux de couverture énergétique stable et élevé tout au long de l'année. Grâce à une meilleure inertie thermique et à un échange efficace entre le capteur et le fluide caloporteur, ce système parvient à répondre de manière régulière aux besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire, même en période de faible ensoleillement.
 - En revanche, le système à capteurs à air se montre beaucoup plus sensible aux variations climatiques. Son rendement chute significativement en basse température, ce qui entraîne une forte diminution du taux de couverture en hiver, réduisant ainsi sa fiabilité.

Le capteur à eau offre une couverture solaire annuelle nettement supérieure, ce qui en fait une solution plus robuste, performante et adaptée aux besoins énergétiques combinés du CCR.

IV.5.4 : Rendement global du système

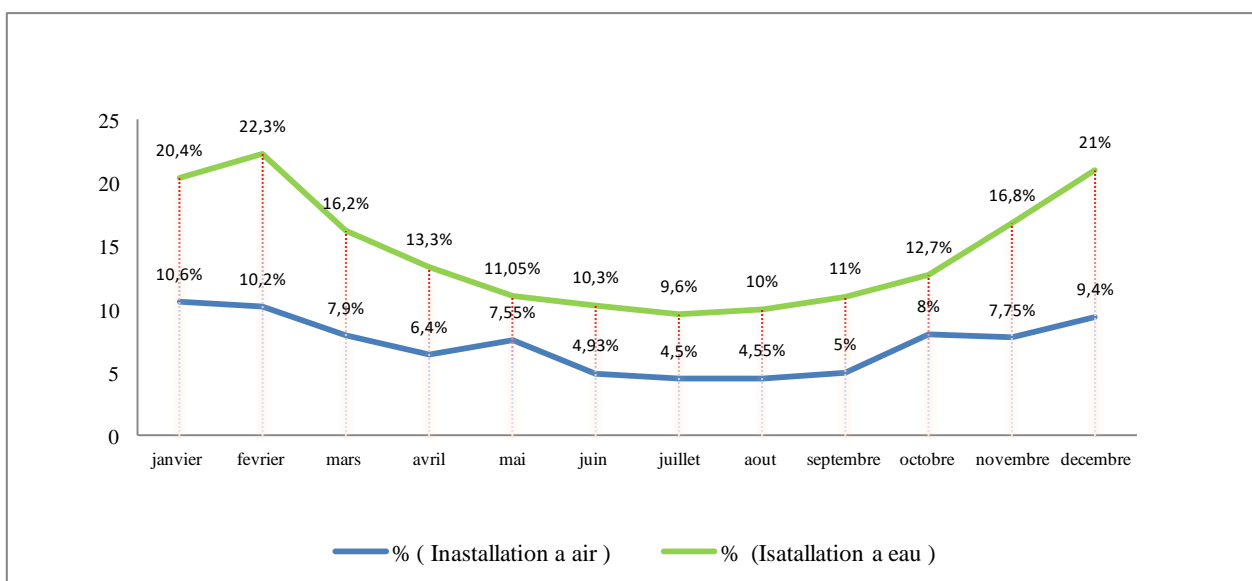


Figure IV.8 : Rendement global mensuelle des installations solaire

- **Observation :**

- **Capteur à eau :** Rendement supérieur et plus stable.
- **Capteur à air :** Rendement plus faible et irrégulier.

- **Interprétation :**

- Sur le plan thermique, le capteur à eau se distingue par une conversion plus efficace de l'énergie solaire, grâce aux propriétés physico-chimiques du fluide caloporteur. La chaleur massique élevée de l'eau, associée à une conductivité thermique favorable, permet non seulement d'absorber une quantité importante de chaleur, mais aussi de la transférer rapidement et efficacement vers le système de stockage. Cette efficacité limite les pertes énergétiques et maximise l'exploitation de l'irradiation disponible. À l'inverse, le système à air est plus exposé aux pertes thermiques, en particulier par convection et rayonnement, du fait de la faible densité et de la faible capacité thermique de l'air. Ces pertes dégradent le rendement global du capteur, notamment en période de faibles températures. En conclusion, le capteur à eau présente un rendement thermique nettement supérieur, garantissant une meilleure valorisation de l'ensoleillement et une performance plus stable du système.

IV.5.5 Économie de gaz naturel

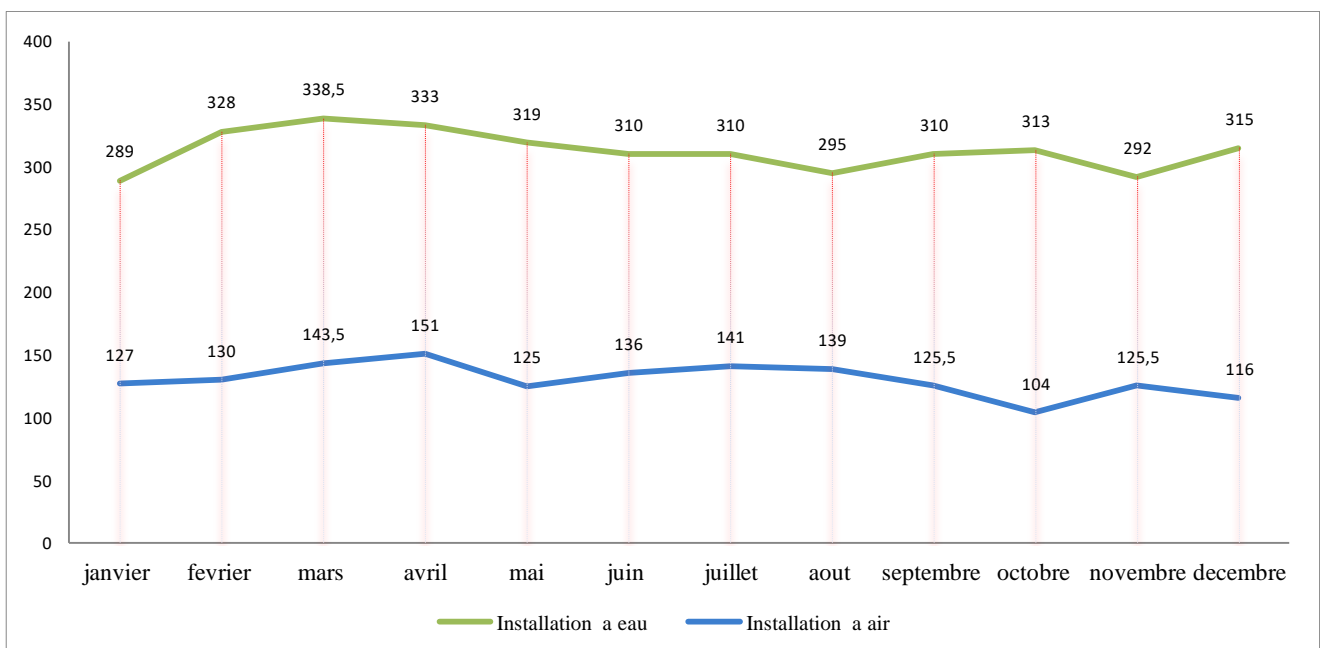


Figure IV.9 : économie de gaz naturel pour chaque installation

- **Observation :**
 - **Le système à eau :** permet une réduction nette de la consommation de gaz.
 - **Le système à air :** engendre une économie plus modeste.
- **Interprétation :**
 - Les résultats obtenus montrent que le système à circulation d'eau permet une diminution significative de la consommation de gaz naturel, contrairement au système à air dont les économies restent plus limitées. Cette différence de performance énergétique s'explique par les rendements supérieurs et les taux de couverture plus élevés associés au système à eau, déjà mis en évidence lors des analyses précédentes. Cela souligne l'efficacité accrue de ce système en matière de récupération et de transfert thermique, justifiant son meilleur comportement énergétique global.

L'installation à eau permet de maximiser les économies de gaz naturel, renforçant son intérêt économique sur le long terme.

IV.5.6 Émissions de CO₂ évitées

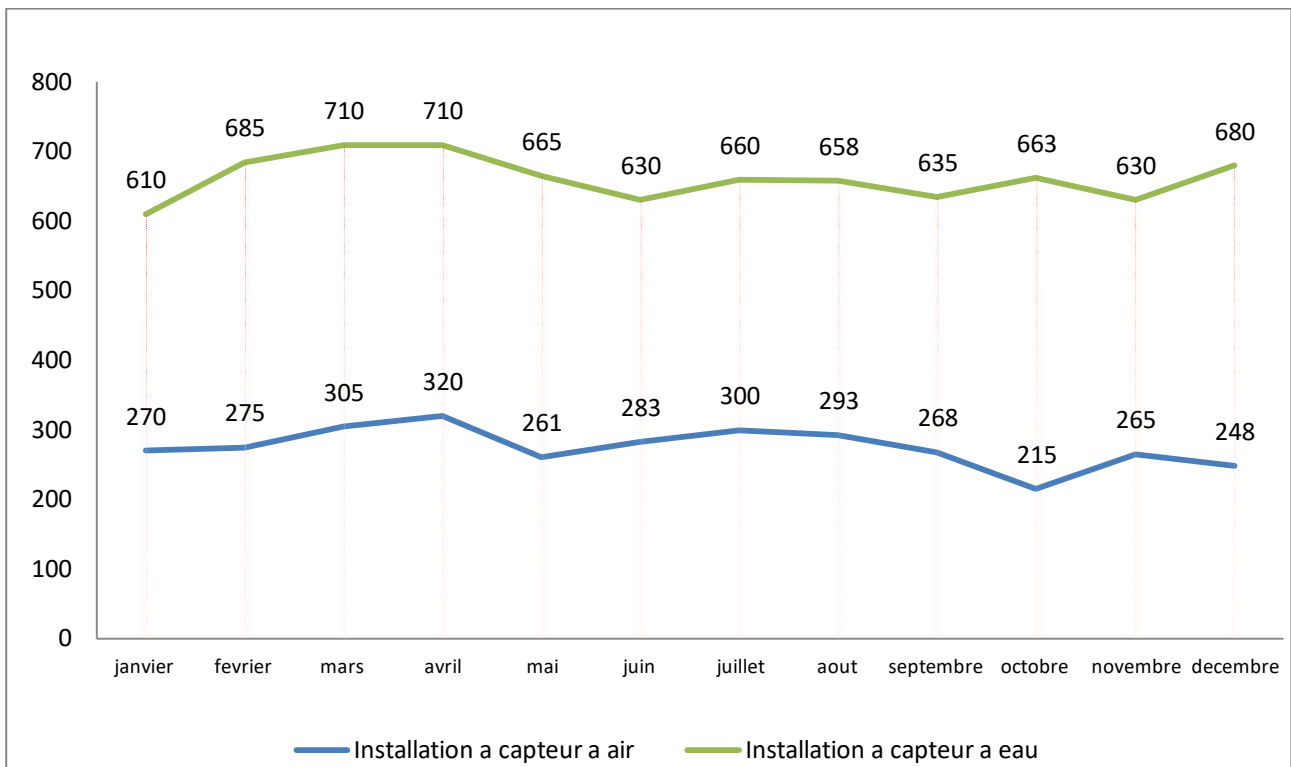


Figure IV.10 : Émissions de CO₂ évitées pour les deux installations

- **Observation :**

- Le **capteur à eau** : permet d'éviter une quantité significative de CO₂ sur l'année.
- Le **capteur à air** : moins performant, induit une réduction plus faible.

- **Interprétation :**

- L'analyse des graphiques révèle que le système à capteurs solaires à eau permet d'éviter une quantité nettement plus importante d'émissions de CO₂ comparé au système à air. Cette différence s'explique principalement par le rendement global supérieur du système à eau, qui assure un meilleur transfert thermique entre le capteur et le fluide caloporteur. Grâce à une conductivité thermique plus élevée de l'eau par rapport à l'air, le système à eau capte et restitue davantage d'énergie solaire utile, réduisant ainsi la quantité d'énergie auxiliaire fournie par le gaz naturel. Cette efficacité accrue entraîne une baisse proportionnelle de la consommation de gaz, et par conséquent, une réduction plus importante des émissions de CO₂. En revanche, le système à air, en raison de la faible capacité calorifique et de la densité réduite de l'air, nécessite un apport complémentaire de gaz plus important pour satisfaire les mêmes besoins thermiques. Ainsi, sur le plan environnemental, le système hydraulique se distingue par un bilan carbone plus favorable, en phase avec les objectifs de réduction des émissions fixés dans le cadre de la transition énergétique.

IV.5.7 Coût d'investissement

Le tableau ci-dessous présente les coûts d'investissement des systèmes solaires pour ECS et chauffage au CCR de Skikda.

Composant	Installation 1 : Capteur à eau	Coût (DA)	Installation 2 : Capteur à air	Coût (DA)
1. Capteurs	GREENoneTEC FK 8207 L4M FL SV (49 capteurs)	5 880 000	Capteurs à air vitrés - type 10 (50 capteurs)	18 800 750
2. Pompe / Ventilation	Pompe primaire Wilo Yonos Para ST 15/7	90 000	Ventilateur	20 000
3. Échangeur	Échangeur KA 1100 W/k	100 000	Échangeur air-eau	80 000
4. Ballon de stockage	Ballon tampon 5,7 m ³	886 229	Ballon ECS bivalent	100 000
5. Circuit ECS	Viessmann Vitotrans 353 PBL	149 348	—	—
6. Chaudière à gaz	Chaudière gaz (88 kW – estimation marché européen)	2 080 000	Chaudière gaz (40 kW – estimation marché européen)	1 042 078
7. Tuyauterie	30 m de tuyauterie	27 000	20 m de tuyauterie	10 000
Total investissement	9 212 577 DA		20 052 828 DA	

Tableau IV.9 : Évaluation économique des systèmes solaires à capteurs à eau et à capteurs à air

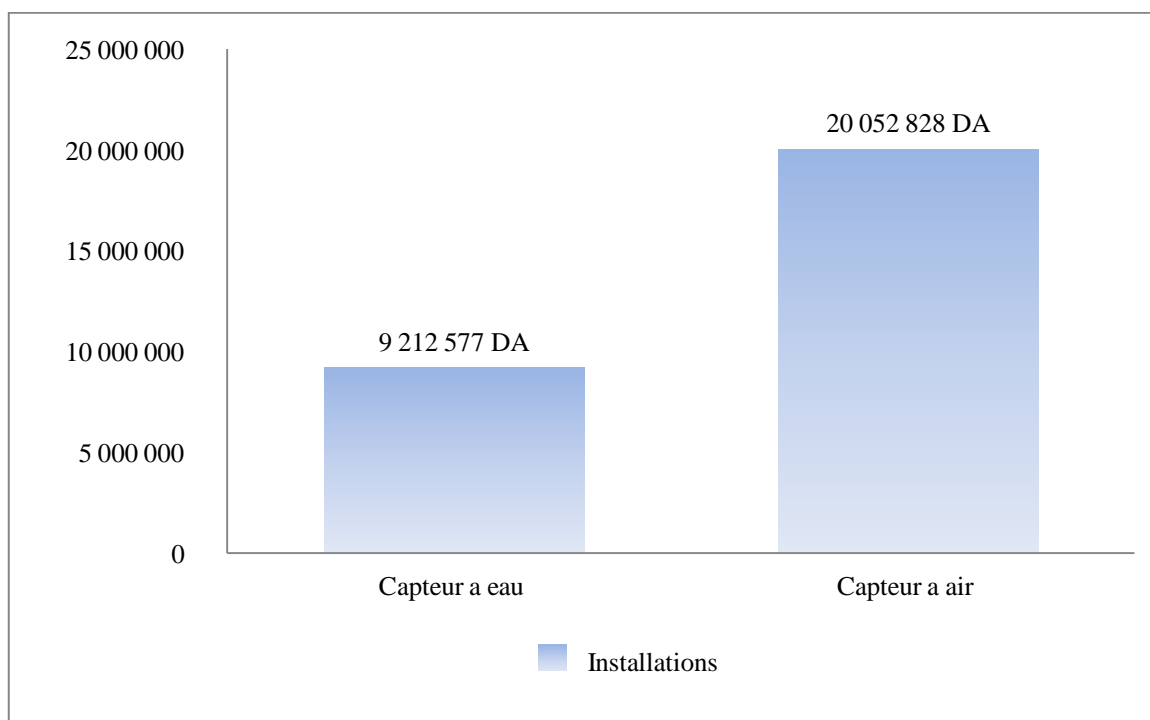


Figure IV.11 : Coût d'investissement pour chaque installation.

- **Interprétation :**

- Sur le plan économique, le capteur à eau présente un net avantage avec un coût d'investissement moins de la moitié de celui du capteur à air. Cette différence notable renforce l'attractivité du système à eau, en plus de ses meilleures performances thermiques.

Alors au final on confirme que le capteur solaire à eau présente des performances nettement supérieures à celles du capteur à air, notamment dans les installations combinées de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire (ECS) comme celle du Centre de Contrôle Régional. Grâce à son fluide caloporteur liquide, qui possède une meilleure capacité de stockage et de transfert de chaleur, le capteur à eau permet une exploitation plus efficace de l'énergie solaire disponible. Cette efficacité se traduit par une meilleure couverture des besoins thermiques du bâtiment, aussi bien pour le chauffage que pour l'ECS, réduisant ainsi considérablement le recours à l'énergie d'appoint. De plus, le système hydraulique associé au capteur à eau permet une régulation plus fine de la température et une distribution plus homogène de la chaleur, ce qui améliore le confort thermique tout en optimisant la consommation énergétique globale. Ces avantages font du capteur à eau une solution plus performante et plus fiable que le capteur à air pour ce type d'application.

IV.6 Conclusion

À travers l'analyse comparative des différentes technologies de capteurs solaires, notamment les capteurs à eau et les capteurs à air, il ressort clairement que le capteur à eau constitue la solution la plus performante et la mieux adaptée aux besoins combinés de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire dans le contexte du Centre de Contrôle Régional (CCR). Les résultats issus de la simulation démontrent une meilleure capacité de captage thermique, une couverture énergétique solaire plus importante, ainsi qu'un recours réduit à l'énergie d'appoint. Ces performances s'expliquent par un rendement global supérieur, une efficacité de transfert thermique plus élevée et une intégration plus harmonieuse au sein des systèmes de chauffage à eau. Ainsi, le choix du capteur à eau s'impose comme une option optimale pour maximiser l'apport solaire et améliorer l'efficacité énergétique globale du bâtiment étudié.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail s'est inscrit dans une démarche scientifique visant à évaluer, de manière rigoureuse et modélisée, la performance énergétique de systèmes solaires thermiques combinés destinés à assurer simultanément le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire (ECS). En s'appuyant sur la simulation numérique à l'aide du logiciel T*SOL, nous avons analysé deux technologies distinctes de capteurs solaires – à air et à eau – appliquées à un bâtiment-type, le Centre de Contrôle Régional (CCR), servant ici de cas d'étude représentatif.

L'ensemble des résultats obtenus met en évidence la supériorité technique des capteurs à circulation d'eau, qui affichent des rendements thermiques plus élevés, une capacité de stockage thermique plus efficace, ainsi qu'une meilleure régularité dans la couverture des besoins énergétiques sur l'ensemble de l'année. Leur couplage avec un ballon de stockage bien dimensionné permet d'optimiser la restitution de l'énergie thermique, notamment en période de faible ensoleillement, assurant ainsi un haut niveau d'autonomie énergétique et un excellent facteur de contribution solaire.

En comparaison, les capteurs à air présentent des limites structurelles liées à leur faible capacité calorifique volumique, leur inertie thermique réduite et leur complexité d'intégration dans les systèmes de chauffage centralisés. Malgré leur potentiel dans des configurations spécifiques (séchage, préchauffage de l'air neuf, etc.), ils s'avèrent globalement moins adaptés aux applications combinées nécessitant une continuité de service thermique et une forte densité de puissance.

Cette étude confirme par ailleurs l'intérêt stratégique des outils de simulation tels que T*SOL, qui permettent une modélisation fine des interactions thermiques, une prise en compte dynamique des paramètres climatiques, ainsi qu'une optimisation multicritère des configurations énergétiques. Ce type d'approche est indispensable pour valider les choix technico-économiques en phase de conception, en particulier dans des contextes à forte variabilité de la demande et de l'ensoleillement.

Enfin, les perspectives d'amélioration identifiées concernent principalement le perfectionnement des matériaux absorbants, l'optimisation des dispositifs de régulation thermique, et l'intégration de solutions hybrides intelligentes combinant le solaire avec des systèmes d'appoint à haute efficacité. L'ensemble de ces axes de développement devra s'appuyer sur une approche systémique

tenant compte à la fois des contraintes d'exploitation, des exigences réglementaires et des objectifs de décarbonations.

En conclusion, l'intégration de capteurs solaires à eau dans des systèmes combinés ECS + chauffage représente aujourd'hui une solution technologiquement mûre, énergétiquement performante et environnementalement responsable. Elle s'inscrit pleinement dans la dynamique de transition énergétique, en particulier pour des bâtiments tertiaires ou industriels dans les régions à fort gisement solaire, telles que l'Algérie.

Références bibliographiques

- [1] TISSOT.M « L'énergie solaire thermique et photovoltaïque ». Livre. France : Éditions Eyrolles, septembre 2012.
- [2] LABOURET.A « Cellule solaire ». **Livre**, paris 2iem édition 2005.
- [3] BELHARRAT.S.A « Production et gestion de l'énergie solaire photovoltaïque adaptée à une maison ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou, 2010.
- [4] LABOURET.A et VILLOZ.M « Énergie solaire photovoltaïque ». Livre, 2006.
- [5] CYTHELIA.S et RICAUD.A « Gisement solaire ». Livre, 2009.
- [6] CAPDEROU.M « Atlas solaire de l'Algérie ». Livre, OPU, Alger, 1985.
- [7] MEFTI.A, BOUROUBI.M.Y et KHELLAF.A « Analyse critique du modèle de l'Atlas de l'Algérie ». Revue des Énergies Renouvelables, 1999.
- [8] Portail Ministère de l'Énergie. [En ligne], février 2025.
- [9] MEFTI.A, BOUROUBI.M.Y et MIMOUNI.H « Évaluation du potentiel énergétique solaire ». Bulletin des Énergies Renouvelables, décembre 2002.
- [10] BENATIALLAH.DJ « Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie ». Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2009.
- [11] « Système de coordonnées équatoriales ». [En ligne] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_coordonn%C3%A9es_%C3%A9quatoriales
- [12] SAYAH.R et OUARGLI.S « Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire hybride photovoltaïque et thermique (PV/T) ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou, 2023.

- [13] ROGET.F « Définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température ». Thèse de doctorat, Université de Perpignan, 2012.
- [14] BELAID.L « Cours Énergie Solaire Photovoltaïque ». Cours, Université de Béjaïa, 2014/2015.
- [15] TOUZANI.L « Les énergies renouvelables au Maroc : énergie solaire ». Mémoire de master, Université Cadi Ayyad – Marrakech, 2023.
- [16] CHABANE.F « Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire ». Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen.
- [17] Programme européen PVSALSA « Guide de l'utilisateur de Toit Solaire Photovoltaïque ». Guide, 2002.
- [18] PEUSER.A, Dr FELIX.F « Installations solaires thermiques : conception et mise en œuvre ». Livre.
- [19] BOUARAOUR.K « Cours de l'énergie solaire thermique ». Cours, Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou, 7 octobre 2020.
- [20] HONGOIS.S « Stockage de chaleur intersaisonnière par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 2011.
- [21] JOHANNES.K « Optimisation des installations solaires collectives d'eau chaude sanitaire : application des techniques des faibles débits et du stockage divisé ». Mémoire de master, Université de La Rochelle, 2005.
- [22] ABDESLAM.B « Étude et expérimentation d'un chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur ». Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2011.
- [23] SAMIR.S « Chauffe-eau thermodynamique à capteur aéro-solaire ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou, 2012.

- [24] AOULI.S et MASSINISSA.A « Simulation d'une installation solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et chauffage pour une maison individuelle ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou, 2013.
- [25] ASIN.A « Production de l'eau chaude sanitaire et de chauffage par le système de chauffage combiné SSC dans un immeuble multifonctionnel ». Mémoire de master, Université Saad Dahlab – Blida, 2016.
- [26] B.R « Étude et dimensionnement d'un système de chauffage solaire : application au logement individuel type F3 ». Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, 2017.
- [27] MEHDI.B et AMAR.M « Calcul et dimensionnement d'une installation solaire pour le chauffage, la climatisation et la production d'eau chaude sanitaire pour le bâtiment de recherche ». Mémoire de master, École Nationale Polytechnique – Alger, 2018.
- [28] OUDRANE.A « Contribution à la modélisation et au développement des systèmes de chauffage solaire à usage individuel ». Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2018.
- [29] YETTOU.F « Étude et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un chauffe-eau solaire ». Mémoire de master, Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella, 2019.
- [30] RAHIMOU.Z et MAROUA.M « Étude et simulation d'une installation de production d'eau chaude sanitaire complexe par l'énergie solaire ». Mémoire de master, Université Belhadj Bouchaïb – Aïn Témouchent, 2020.
- [31] OUHIN.S « Dimensionnement de capteurs solaires thermiques pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire pour une maison Loginov ». Mémoire de master, Université M'Hamed Bougara – Boumerdès, 2020.
- [32] CHAIB.S « Étude thermique d'un hôpital et production d'eau chaude sanitaire ». Mémoire de master, Université Saad Dahlab – Blida, 2021.
- [33] ABDELALI.B « Étude et simulation d'un chauffe-eau solaire ». Mémoire de master, Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella, 2021.

- [34] ZOHIR.B « Étude technique et économique de l'efficacité énergétique dans un réseau d'habitation en Algérie dans une approche de green city ». Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2021.
- [35] COULIDIATI.F « Conception et construction d'un système de production d'eau chaude sanitaire à énergie renouvelable ». Mémoire de master, Université de Montréal – Québec, 2022.
- [36] OUAHID.M « Dimensionnement et optimisation d'une installation solaire collective d'eau chaude sanitaire pour les besoins d'une ferme aquacole ». Mémoire de master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2023.
- [37] ABBASSI.F « Réalisation d'un capteur solaire thermique ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou, 2023.
- [38] MAXENCE.P « Modélisation et optimisation de la consommation énergétique d'un ménage du bâti wallon ». Mémoire de master, Université de Liège – Belgique, 2024.
- [39] ZAYED.DJ et DIF.M.N « Contribution à l'amélioration de production d'eau chaude sanitaire par les capteurs solaires ». Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2024.
- [40] TISSOT.M « L'énergie solaire thermique et photovoltaïque ». Livre, France : septembre 2012.
- [41] TISSOT.M « L'énergie solaire thermique et photovoltaïque ». Livre, France : septembre 2012.
- [42] TISSOT.M « L'énergie solaire thermique et photovoltaïque ». Livre, France : septembre 2012.
- [43] Valentin Software GmbH « Manuel d'utilisation T*SOL ». Logiciel, Allemagne.
- [44] ABBASS.F « Réalisation d'un capteur solaire thermique ». Mémoire de master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2023.
- [45] BENMANSOUR.N « Conversion photothermique – Chapitre III : Capteurs photothermiques». Cours, s.n.
- [46] GuidEnR « Capteur solaire thermique plan ». [En ligne] : http://www.solairethermique.guidenr.fr/I_capteur-solaire-thermique-plan.php (consulté en 2025).
- [47] TALBI.F et BECHEKOUR.R « Étude et dimensionnement d'un système de chauffage solaire

- : application au logement individuel type F3 ». Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, 10/10/2017.
- [48] BOURRET.B « Les échangeurs de chaleur ». Cours, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) – Toulouse.
- [49] Pôle Cristal « Échangeurs thermiques : quels sont les différents types ? » [En ligne] : <https://www.pole-cristal.fr/echangeurs-thermiques-quels-sont-les-differents> (consulté en 2025).
- [50] NOUALI.L « Simulation numérique et expérimentale d'une installation de chauffage solaire collective ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou, 2024.
- [51] REDDAH.T « Étude et dimensionnement d'un système solaire combiné : application au logement individuel type F3 ». Mémoire de master, Université Batna 1, 2015.
- [52] PEUSER.A et REMMERS.K « Installations solaires thermiques : conception et mise en œuvre ». Livre, Paris : 2005.
- [53] NouvÉnergie « Rendement des capteurs solaires thermiques ». [En ligne] : <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-1/rendement-capteurs/> (consulté en 2025).
- [54] ABDERRAHIM.M « Capteur solaire en présence d'un absorbeur muni d'ailettes longitudinales ». Mémoire de master, Université Belhadj Bouchaib – Aïn Témouchent, 2022.
- [55] Lepanneausolaire.net « Les absorbeurs : matériaux et modèles ». [En ligne] : <https://www.lepanneausolaire.net/les-absorbeurs-materiaux-modeles.php> (consulté en 2025).
- [56] ResearchGate « Schéma d'un élément du tube absorbeur ». [En ligne] : https://www.researchgate.net/figure/Schema-dun-element-du-tube-absorbeur-67_fig13_334657455 (consulté en 2025).
- [57] SAYEH.M « Infrastructure qualité dans le secteur de l'énergie solaire thermique ». Rapport, s.n.2019
- [58] GuidEnR « Principe de chauffe-eau solaire monobloc ». [En ligne] (consulté en 2025).
- [59] NouvÉnergie « Cours d'introduction au solaire thermique ». [En ligne] : <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-> (consulté en 2025).
- [60] NouvÉnergie « Chauffe-eau solaire individuel à thermosiphon ». [En ligne] : <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-1/cesi-thermosiphon> (consulté en 2025).
- [61] DualSun « Chauffage solaire pour la maison ». [En ligne] : <https://dualsun.com/guides/chauffage-solaire/chauffage-maison/> (consulté en 2025).
- [62] FHE France « Solutions SSC – Système Solaire Combiné ». [En ligne] : <https://fhe-france.com/solutions/ssc> (consulté en 2025).