

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Réf :.....

Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Institut des Sciences et de Technologies

Département de Génie Mécanique et Electromécanique

**Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de
Master**

Domaine : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

**Étude, conception et réalisation d'un capteur solaire pour le
séchage des produits agroalimentaires**

Présenté par :

- Boubekour chourouk
- Meghzili Imane
- Makhneche Nesrine

Devant le jury :

Président : Dr. Liamena HASSINET	C U M
Promoteur : Dr. Abdelouahab BOUBEGHAL	C U M
Examineur : Dr. Abdelmalek BOUCHOUCHA	C U M
Co-Promoteur : Dr. Salim AOULMIT	C U M

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu et Le remercie pour les bienfaits de la santé, de la persévérance et de la volonté qu'Il nous a accordés, et qui nous ont permis d'achever ce modeste travail.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, Monsieur le Docteur **Abdelouahab Boubeghel**, pour ses orientations, ses précieux conseils, et les efforts qu'il a déployés en nous accompagnant tout au long de cette recherche.*

Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour les remarques enrichissantes qu'ils ont bien voulu nous apporter.

Nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

B. Chourouk

M. Nesrine

M. Imane



Dédicace

*Louange à Dieu, infinie et bénie, comme Il se doit à Sa majesté et Sa grandeur.
Gratitude pour Ses innombrables bienfaits, pour Sa guidance et Son aide à chaque
étape.*

*À mon cher père toi qui m'as appris que lutter est un honneur, que la véritable force
réside dans les actes, et que le silence peut parfois être plus éloquent que les mots... Que
Dieu te récompense pour tout.*

*À ma chère mère source de tendresse et de force... Tes prières furent mon bouclier, ton
amour ma lumière.*

*À mon unique frère, et à mes chères sœurs merci pour votre présence constante et
votre soutien réconfortant à chaque moment difficile.*

*À mes fidèles amies merci pour chaque instant sincère, chaque geste d'encouragement,
chaque mot qui a apaisé mes peines.*

Et à moi-même...

*Pour chaque effort silencieux, chaque doute surmonté, chaque épreuve affrontée avec
dignité...*

Je suis fière de toi. Tu as tenu bon, par la grâce de Dieu, avec force et patience.

M. Imane



Dédicace

À Dieu, d'abord et pour toujours...

À Toi dont le souvenir apaise les cœurs, dont la miséricorde ouvre les chemins, et dont le pardon est sans limites.

Louange à Toi pour tes innombrables bienfaits, pour ton aide constant, et pour ta présence bienveillante à chaque étape du chemin.

À mon cher père Khaled Mon exemple de patience et de force, merci pour tes prières silencieuses, ton amour discret mais profond, et ta présence rassurante.

À ma chère mère Fatiha Toi dont les prières jaillissent du cœur, dont la tendresse est un refuge incomparable, merci pour tout ce que tu donnes sans rien attendre en retour.
Tu es un trésor que je chérirai toute ma vie.

À mes frères et sœurs bien-aimés Vous êtes mon soutien après Dieu, et mon appui dans les épreuves. Merci pour votre présence constante et votre amour inestimable.

À mes neveux chéris Vous êtes la joie de mon cœur, la lumière de mes jours. Vous êtes le soutien de votre tante et son sourire éternel. Merci pour votre amour sincère et vos cœurs purs.

À mes amis fidèles Merci pour votre sincérité, votre affection sans artifice, et votre lumière dans mes moments sombres.

Et à moi-même...

Toi qui as enduré en silence, et avancé malgré l'épuisement, merci pour chaque effort invisible, chaque pas accompli avec foi.

Aide confiance en toi. Tant que tu comptes sur Dieu, tu ne seras jamais seule. Avec Lui, tout ira bien.

M.Nesrine



Dédicace

Louange à Allah, éternelle Louange à Celui qui éclaire les cœurs, fortifie les âmes, et ne délaisse jamais celui qui place en Lui sa confiance.

C'est par Sa grâce que ce rêve est devenu réalité, que ce chemin a été traversé, malgré les doutes, les silences et les nuits blanches.

Je dédie ce mémoire :

À mes parents bien-aimés, source inépuisable d'amour, de prières et de sacrifices. Rien ne serait sans vous.

À ma famille, qui est mon véritable soutien et ma source de force à tout moment.

À mes professeurs, qui ont été des phares de lumière dans mon chemin, m'apportant soutien et inspiration à chaque étape.

À mes amis, pour chaque éclat de rire, chaque parole de réconfort, chaque moment vrai.

À toute âme généreuse qui a touché ce projet d'une manière ou d'une autre.

À moi-même...

Pour avoir tenu bon lorsque tout semblait s'effondrer.

Pour les nuits sans sommeil, les efforts silencieux, les larmes cachées et le courage retrouvé.

Pour avoir cru, lutté, persévéré.

Que ces pages soient le reflet de toutes ces voix.

B.Chourouk

Résumé

Ce mémoire vise à concevoir un capteur solaire à air simple et économique, capable de transformer efficacement l'énergie solaire en chaleur. Destiné aux applications agricoles (séchage des récoltes, chauffage des serres), ce prototype sera testé pour évaluer ses performances et son coût, offrant une solution durable par rapport aux méthodes classiques.

Cette étude théorique porte sur un capteur solaire à air à simple passage, destiné à fournir de l'air chaud à un séchoir solaire pour le séchage de produits agricoles. Après avoir examiné les bases de l'énergie solaire et des transferts thermiques, nous avons comparé les technologies existantes avant de choisir les capteurs à air. Ce choix s'explique par leur simplicité, leur faible coût et leur efficacité pour le séchage.

Le projet a comporté la conception détaillée du prototype avec des outils 3D, puis une analyse thermique basée sur des modèles physiques pour évaluer ses performances.

La modélisation de prototype repose sur la résolution des équations de transfert de chaleur entre les différents composants du capteur, tels que la plaque absorbante, la vitre de couverture et l'air caloporteur. Le code Fortran développé permet de résoudre ces équations. La simulation numérique nous a permis de déterminer les performances thermiques du capteur au cours de l'année.

L'influence de l'inclinaison du capteur sur son efficacité thermique, ainsi que l'intensité du rayonnement solaire global en hiver et en été, ont été étudiées. Notre analyse se limite à trois plans spécifiques : le plan horizontal ($\beta = 0^\circ$), Le plan incliné selon la latitude du lieu ($\beta = 30^\circ$), Un plan incliné arbitraire ($\beta = 70^\circ$).

Mots-clés : Rayonnement solaire, Capteur à air, Modélisation, Conception 3D.

Summary

This thesis aims to design a simple and low-cost solar air collector, capable of efficiently converting solar energy into heat. Intended for agricultural applications such as crop drying and greenhouse heating, the prototype will be tested to evaluate its performance and cost, offering a sustainable alternative to conventional methods.

The theoretical study focuses on a single-pass solar air collector designed to supply hot air to a solar dryer for drying agricultural products. After reviewing the fundamentals of solar energy and heat transfer, existing technologies were compared, leading to the choice of air-based collectors due to their simplicity, low cost, and effectiveness for drying purposes.

The project involved the detailed design of the prototype using 3D tools, followed by a thermal analysis based on physical models to assess its performance.

The prototype modeling is based on solving heat transfer equations between the different components of the collector, such as the absorbing plate, the glass cover, and the heat carrying air. A Fortran code was developed to solve these equations, and numerical simulations were carried out to determine the thermal performance of the collector throughout the year.

The study also investigated the effect of the collector's tilt angle on its thermal efficiency, as well as the global solar radiation intensity during winter and summer. The analysis was limited to three specific tilt angles: Horizontal plane ($\beta = 0^\circ$), Plane inclined at the site's latitude ($\beta = 30^\circ$), Arbitrary inclined plane ($\beta = 70^\circ$).

Keywords: Solar radiation, Air collector, Modeling, 3D design.

ملخص:

تهدف هذه الأطروحة إلى تصميم مجمع شمسي هوائي بسيط واقتصادي، قادر على تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة بكفاءة. هذا النموذج الأولي مخصص للتطبيقات الزراعية (تجفيف المحاصيل، تدفئة البيوت الزجاجية)، وسيتم اختباره لتقييم أدائه وتكلفته، مما يوفر حلاً مستداماً مقارنة بالطرق التقليدية.

ترتكز هذه الدراسة النظرية على مجمع شمسي هوائي أحادي المرور، يهدف إلى توفير الهواء الساخن لمجفف شمسي لتجفيف المنتجات الزراعية. بعد دراسة أساسيات الطاقة الشمسية ونقل الحرارة، قمنا بمقارنة التقنيات الموجودة قبل اختيار أجهزة استشعار الهواء. ويفسر هذا الاختيار ببساطتها وتكلفتها المنخفضة وكفاءتها في التجفيف. وتضمن المشروع التصميم التفصيلي للنموذج الأولي باستخدام أدوات ثلاثية الأبعاد، ثم إجراء تحليل حراري يعتمد على النماذج الفيزيائية لتقييم أدائه.

تعتمد نمذجة النموذج الأولي على حل معادلات نقل الحرارة بين المكونات المختلفة للمستشعر، مثل لوحة الامتصاص وزجاج الغطاء وهواء نقل الحرارة. يسمح كود فورتران المطور بحل هذه المعادلات. أتاحت لنا المحاكاة العددية تحديد الأداء الحراري للمستشعر على مدار العام.

تمت دراسة تأثير ميل المستشعر على كفاءته الحرارية وكذلك شدة الإشعاع الشمسي العالمي في الشتاء والصيف. يقتصر تحليلنا على ثلاث مستويات محددة: المستوى الأفقي ($\beta = 0^\circ$) ، والمستوى المائل وفقاً لخط عرض المكان ($\beta = 30^\circ$) ، والمستوى المائل التعسفي ($\beta = 70^\circ$).

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي، مستشعر الهواء، النمذجة، التصميم ثلاثي الأبعاد.

Sommaire

Sommaire :

Table des matières

REMERCIEMENTS	
Dédicace	
Résumé	
Summary	
ملخص:	
Sommaire :	
Liste des figures :	
Liste des tableaux :	
Liste des symboles :	
Introduction Générale.....	2
 Chapitre I : Généralité sur les capteurs solaires	
Introduction :	
I.1. Energie solaire	5
I.1.1. Mouvement de la terre	6
I.1.2. Repérage du soleil	6
I.1.2.1. Les coordonnées géographiques	6
I.1.2.2. Les coordonnées célestes	7
I.1.2. 3. Coordonnées horizontales	9
I.2. Le rayonnement solaire :	10
I.2.1. Rayonnement extraterrestre	10
I.2.2. Durée d'ensoleillement :	10
I.2.3. Les composants du rayonnement solaire :	10
I.3. Les différents types de rayonnement solaire :	11
I.3.1. Le rayonnement direct (ou rayonnement solaire direct normal)	11
I.3.2. Le rayonnement diffus :	11
I.3.3. Le rayonnement réfléchi (ou albédo) :	12
I.3.4. Rayonnement global :	12
I.4. Les Capteur Solaires :	15
I.5. Le rôle du capteur solaire :	15

I.6. Types de capteurs solaires :	15
I.6.1. Le capteur solaire photovoltaïque :	15
I.6.2. Le capteur solaire thermique :	16
I.7. Les capteurs à concentration :	16
I.8. Les capteurs solaire plans :	17
I.8.1. Composants d'un capteur solaire plan :	17
I.8.2. Types de capteurs solaires plans :	18
I.8.3. Capteur solaire plan à l'air :	20
I.8.3.1. Principe de fonctionnent :	20
I.8.3.2. Classification des capteurs solaires à air :	21
I.8.3.3. Différents types des capteurs solaires à air :	22
I.8.3.4. Applications des Capteurs Solaires Plans à Air	24
I.9. Orientation optimal d'un capteur solaire :	24
I.10. Avantages et inconvénients des capteurs solaires :	25
Conclusion :	29

Chapitre II : Conception et simulation d'un capteur solaire

Introduction	31
II.1. Logiciels de conception	31
II.1. 1. SolidWorks	31
II.1.2. Description du prototype du capteur solaire :	32
II.1.3. Dimensionnement du prototype du capteur :	33
II.2. Modes de transfert dans les capteurs solaires :	35
II.2.1. Transfert thermique par convection	35
II.2.2. Transfert thermique par conduction :	38
II.2.3. Transfert thermique par rayonnement :	38
II.3. Pertes thermiques dans un capteur solaire :	40
II.4. Modélisation :	41
II.5. Hypothèses :	41
II.6. Bilan thermique du capteur solaire :	42
II.7. Calculs particuliers :	44
II.8. Rendement du capteur :	45
Conclusion :	47

Chapitre III : Résultat et interprétation

Introduction :	49
III.1. Le programme :	49
III.1.1. Les étapes du programme :	49
III.1.2. L'organigramme du capteur solaire :	50
III.2. Résultats et discussions :	51
III.2.1. Le comportement thermique du capteur :	51
III.2.2. Influence de l'inclinaison du capteur :	53
III.2.2.1. Rayonnement solaire :	53
III.2.2.2. Performances thermiques du capteur :	54
Conclusion :	56
Conclusion générale :	58
Références bibliographie	60
<i>Annex</i>	64

Liste des figures :

Figure 1: Cycle des saisons	6
Figure 2: Les coordonnées géographiques	7
Figure 3: Les coordonnées horaires.....	8
Figure 4: Les coordonnées équatoriales	8
Figure 5: Les coordonnées écliptiques	9
Figure 6: Coordonnées horizontales.....	9
Figure 7: Spectre solaire.....	10
Figure 8: Les composants du rayonnement solaire	10
Figure 9: Caractéristiques géométriques d'un capteur plan orienté de Q avec le sud.....	13
Figure 10: Panneaux photovoltaïque	15
Figure 11: Capture solaire thermique	16
Figure 12: Composants d'un capteur solaire plan.....	18
Figure 13: Capteur solaire plan non vitré	19
Figure 14: Capteur solaire plan non vitré	19
Figure 15: Capteur solaire à tube sous vitre	20
Figure 16: Capteur solaire à air	20
Figure 17: Principe de fonctionnement	21
Figure 18: Classification des capteurs solaires à air.....	22
Figure 19: Capteurs à absorbeur perméable	23
Figure 20: Capteur solaire à absorbeur à géométrie variable	23
Figure 21: Circulation de l'air dans les capteurs solaire	24
Figure 22: Variation de l'efficacité (%) en fonction de la variation du taux de débit massique (kg/hm ²) a-double vitrage, b-triple vitrage	26
Figure 23: (a) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur les variations horaires de la température de sortie du fluide caloporteur, (b) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur rendement thermique	27
Figure 24: Différents formes d'ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur	28
Figure 25: Capteur avec des chicane rectangulaire sur la plaque inférieure en bois	28
Figure 26: La conception de l'interface SolidWorks	32
Figure 27: Les composants de capteur solaire.....	34
Figure 28: échanges et transferts thermiques entre les éléments d'un capteur plan à air.....	35
Figure 29: Schéma du générateur d'air chaud	42
Figure 30: Variation temporelle de la température des différents composants du capteur, de l'air asséchant et de l'air au cours d'une année.....	52
Figure 31: Variation temporelle du rayonnement solaire global reçu sur une surface à différentes inclinaisons pour deux journées choisies	54
Figure 32: Variation temporelle de la température des différents composants du capteur à différentes inclinaisons pour deux journées choisies	55

Liste des tableaux :

Tableau 1: Quelques valeurs de l'albédo en fonction de la nature du sol.....	14
Tableau 2: Dimensionnement et propriété physique de matériaux du prototype du capteur	33
Tableau 3: Prix et quantités des matériaux.....	34
Tableau 4: Valeur maximales de la température de l'air asséchant	52
Tableau 5: Valeurs maximales de la température des différents composants du capteur à différentes inclinaisons pour deux journées choisies	55

Liste des symboles

Liste des symboles :

Symbole	Désignation	Unité
A	Surface du capteur	m^2
C _p	Capacité thermique massique.	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
D _h	Diamètre hydraulique	m
E	Épaisseur	m
e _{mb}	Tension de vapeur d'eau dans l'air	Mbar
E _u	Energie journalière utile extraite du capteur	J
F'	Facteur d'efficacité du capteur	
G	Débit massique par unité de surface du capteur	$Kg.s^{-1}.m^{-2}$
h _c	Coefficient de transfert convectif	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h _r	Coefficient de transfert radiatif	$W.m^{-2}.K^{-1}$
P _i	Puissance solaire totale incidente sur le capteur	$W.m^{-2}$
K	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ℓ	Largeur du capteur	m
L	Longueur du capteur	m
L _c	Longueur caractéristique du système de couvertures	m
M	Masse par unité de surface du capteur	$Kg.m^{-2}$
m _f	Débit massique du fluide caloporteur	$Kg.s^{-1}$
N _u	Nombre de Nusselt	
P _r	Nombre de Prandtl	
Q _u	Puissance thermique utile	W
R _e	Nombre de Reynolds	
t _c	Instant de coucher du soleil	S
t _l	Instant de lever du soleil	S
T _a	Température ambiante	K
T _f	Température du fluide caloporteur	K
T _p	Température de la plaque absorbante	K
T _v	Température du système combiné de couvertures	K
U _b	Coefficient de pertes thermique vers le bas	$W.m^{-2}.K^{-1}$
U _L	Coefficient global de pertes thermique du capteur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
V _a	Vitesse moyenne du vent	$m.s^{-1}$
x	Coordonnée d'espace dans la direction de l'écoulement du fluide	M
I _{dir}	Le rayonnement direct	(W/m ²)
I _{dif}	Le rayonnement solaire diffus	(W/m ²)
I	Le rayonnement global	(s)
F'	Nombre sans dimension que caractérise l'efficacité thermique du capteur	
C	Constante solaire	W/m ²

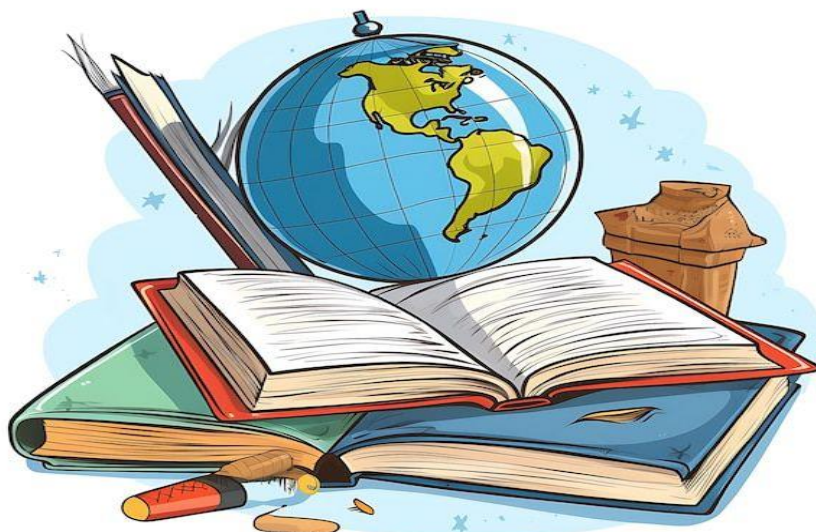
Liste des symboles

C_0	Valeur moyenne de la constante solaire	
-------	--	--

<i>Symboles grecs</i>	<i>désignation</i>	<i>Unité</i>
α_p	Absorptivité de la plaque absorbante	
ε_p	Émissivité de la plaque absorbante	
ε_v	Émissivité du système de couvertures	
η	Rendement thermique journalier du capteur	
ρ_v	Réflectivité du système de couvertures	
ρ_f	Masse volumique du fluide caloporteur	$Kg.m^{-3}$
Σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
T_v	Transitivité du système de couvertures	

<i>Indices</i>	<i>Désignation</i>
V	Vitre
P	Plaque absorbante
A	Milieu ambiant
F	Fluide

Introduction général



Introduction Générale

Le monde connaît actuellement une augmentation continue de la demande énergétique, accompagnée d'une diminution progressive des ressources fossiles traditionnelles, ainsi que de leurs effets environnementaux néfastes, tels que la pollution et le changement climatique. Face à cette réalité, les énergies renouvelables s'imposent comme une alternative incontournable pour atteindre un développement durable, en offrant des solutions propres, sûres et respectueuses de l'environnement. Parmi ces sources, l'énergie solaire occupe une place centrale en raison de sa disponibilité abondante, de sa facilité d'exploitation et de la diversité de ses applications.

Les capteurs solaires à air représentent une technologie prometteuse pour une utilisation efficace et durable de l'énergie solaire. Leur capacité à convertir le rayonnement solaire en chaleur utile pour diverses applications — notamment le séchage des produits agricoles — en fait une solution attrayante pour les producteurs et les industries souhaitant améliorer la durabilité et l'efficacité thermique de leurs procédés [1].

Cependant, ces capteurs font face à deux défis majeurs : la faible capacité thermique de l'air et un coefficient de transfert de chaleur relativement bas entre l'air et l'absorbeur. Ces limitations nécessitent une conception soignée et des solutions de compensation adaptées. Malgré cela, les capteurs solaires à air présentent des avantages notables : ils ne sont pas sujets au gel, ne posent pas de problèmes liés à la pression, et leurs coûts de fabrication sont généralement plus faibles [2].

Avec les avancées des méthodologies numériques, des technologies informatiques et du matériel de calcul, les modèles mathématiques avancés sont devenus des outils incontournables pour l'étude approfondie des capteurs solaires à air. Ces modèles permettent d'obtenir des résultats à moindres coûts, de générer des bases de données étendues, et de réaliser des analyses paramétriques efficaces en vue d'optimiser les performances des systèmes. De plus, les simulations numériques sont particulièrement avantageuses pour étudier des paramètres difficiles à tester expérimentalement, réduisant ainsi de manière significative le coût et la durée des expérimentations physiques [3].

L'utilisation de capteurs solaires à air plans (CSAP) pour fournir de l'air chaud aux séchoirs de produits agricoles s'est largement répandue ces dernières années, en raison des besoins énergétiques élevés du processus de séchage et de l'augmentation des coûts énergétiques qui y sont associés. Pour garantir l'efficacité d'un tel système, il est essentiel d'intégrer un capteur adapté à la chambre de séchage, dont les températures de fonctionnement

permettent de réduire le temps de séchage tout en assurant une qualité optimale du produit final [4, 5].

Les principaux types de CSAP sont : les capteurs à simple passage, avec un flux d'air situé au-dessus ou en dessous de l'absorbeur ; et les capteurs à double passage, avec un flux d'air circulant à la fois au-dessus et en dessous de l'absorbeur.

Ce projet s'appuie sur l'analyse des principes fondamentaux de l'énergie solaire et l'étude du fonctionnement des capteurs solaire à air, avant de passer à la conception d'un modèle tridimensionnel, à l'analyse thermique par simulation numérique, puis à l'évaluation des performances du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Cette étude vise également à développer un modèle mathématique simplifié mais précis afin de simuler les performances thermiques du capteur solaire. Ce modèle permettra de prédire les principaux paramètres de fonctionnement, notamment la répartition des températures au niveau des composants clés (plaque absorbante, vitre de couverture et flux d'air), ainsi que les conditions extérieures dynamiques telles que la température ambiante et l'intensité du rayonnement solaire.

Ce travail représente une contribution modeste dans le domaine des énergies renouvelables, avec une orientation appliquée au secteur agricole. Il vise à encourager des solutions simples, efficaces et accessibles, au service du développement local et de la protection de l'environnement.

Chapitre I

Généralités sur les capteurs solaires



Introduction :

L'énergie solaire représente l'une des sources d'énergie renouvelables les plus prometteuses de notre époque, grâce à son abondance, sa gratuité et son impact environnemental réduit. Parmi les technologies développées pour capter cette ressource, les capteurs solaires occupent une place centrale. Ces dispositifs permettent de convertir le rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, contribuant ainsi activement aux objectifs du développement durable face aux enjeux de pollution et de changement climatique. Issue des réactions thermonucléaires au sein du Soleil, l'énergie solaire est à l'origine de nombreuses formes d'énergies, directes ou indirectes, telles que le bois, le charbon, les hydrocarbures ou encore l'énergie éolienne. Ce rayonnement, après avoir traversé l'atmosphère terrestre – où il subit des atténuations dues notamment à l'ozone et à la vapeur d'eau – atteint la surface terrestre avec une intensité qui varie en fonction de plusieurs facteurs, comme la position du Soleil, la saison et l'inclinaison de l'axe terrestre.

Dans ce contexte, l'étude des capteurs solaires, de leur fonctionnement et des paramètres influençant leur performance est essentielle pour optimiser leur rendement. Une compréhension précise du flux solaire incident au cours du temps permet en effet d'adapter les dispositifs aux conditions réelles d'ensoleillement, renforçant ainsi leur efficacité dans les domaines résidentiels, industriels ou encore agricoles.

I.1. Energie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et traversant l'atmosphère, qui absorbe une partie de l'énergie, et parvenant à la surface de la Terre. Les 98% de l'énergie émise se situent dans la bande de longueur d'onde comprise entre 0.25 et 3 μ m.

L'énergie solaire varie en fonction de :

- La latitude du lieu.
- L'orientation et l'inclinaison du plan de collecte.
- La saison (maxima en été, minima en hiver).
- La situation atmosphérique (ciel clair ou couvert).
- La hauteur du soleil sur l'horizon (maxima à midi solaire).

I.1.1. Mouvement de la terre

La terre est en rotation sur elle-même et tourne autour du soleil en une période $P_t \approx 365,25$ jours. Elle décrit une orbite elliptique. Le mouvement de la terre provoque le cycle des saisons.

En conséquence, selon la position occupée par la Terre par rapport au Soleil, la zone recevant les rayons du Soleil sera différente. Cette inclinaison, assemblée avec la révolution de l'orbite terrestre, va créer les saisons. De ce fait, si l'hémisphère Sud est davantage éclairé que l'hémisphère Nord, il y fera plus chaud car les rayons du Soleil seront plus directs et arriveront de manière perpendiculaire.

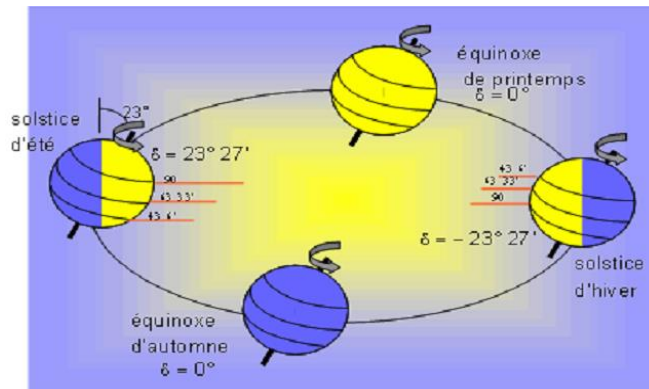


Figure 1: Cycle des saisons

I.1.2. Repérage du soleil

La connaissance de la position du soleil permet d'estimer l'énergie captée par le rayonnement solaire et d'optimiser les systèmes de captation.

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par des systèmes de coordonnées différents :

I.1.2.1. Les coordonnées géographiques [1]

Les coordonnées géographiques sont des angles permettant de localiser précisément un point sur la surface terrestre.

- **Latitude (θ)** : Il s'agit de l'angle formé entre le rayon reliant le centre de la Terre à un point donné et le plan de l'équateur. La latitude varie entre -90° et $+90^\circ$, étant positive dans l'hémisphère nord.
- **Longitude (φ)** : C'est l'angle entre le plan méridien passant par le point considéré et le méridien de référence, appelé méridien de Greenwich.
- **Altitude (Z)** : L'altitude correspond à la hauteur verticale d'un point par rapport à une surface de référence, généralement le niveau moyen de la mer.

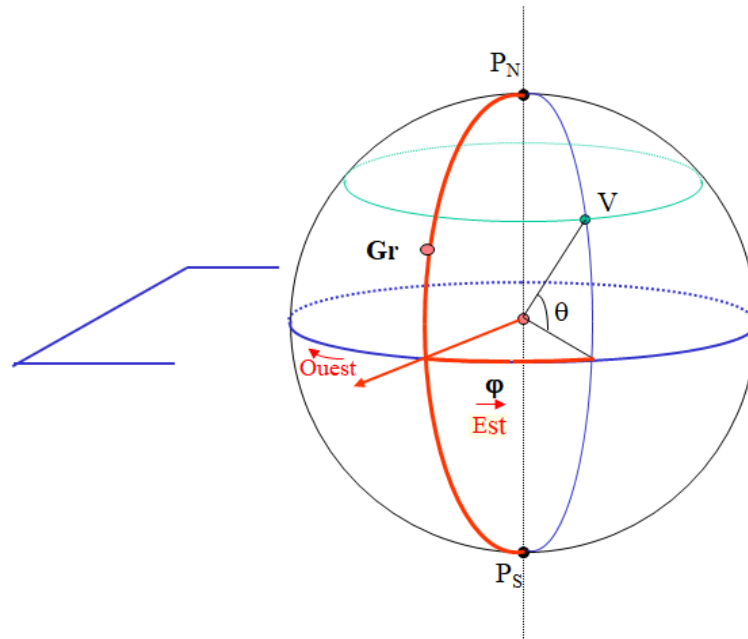


Figure 2: Les coordonnées géographiques

I.1.2.2. Les coordonnées célestes

Les coordonnées célestes servent à localiser les objets dans le ciel, tout comme les coordonnées géographiques (latitude/longitude) permettent de localiser un point sur terre.

Il existe plusieurs sous-systèmes dans ce cadre :

a. Coordonnées horaires [1]

- **Déclinaison solaire (δ)** : C'est l'angle entre le plan de l'équateur terrestre et le plan de l'orbite terrestre autour du Soleil. Elle varie entre $+23,27^\circ$ et $-23,27^\circ$ au cours de l'année, influençant la durée du jour et de la nuit.

- **Angle horaire solaire (ω)** : Il représente la position du Soleil par rapport au midi solaire (le moment où le Soleil est au plus haut dans le ciel). Cet angle permet de suivre le déplacement apparent du Soleil tout au long de la journée.

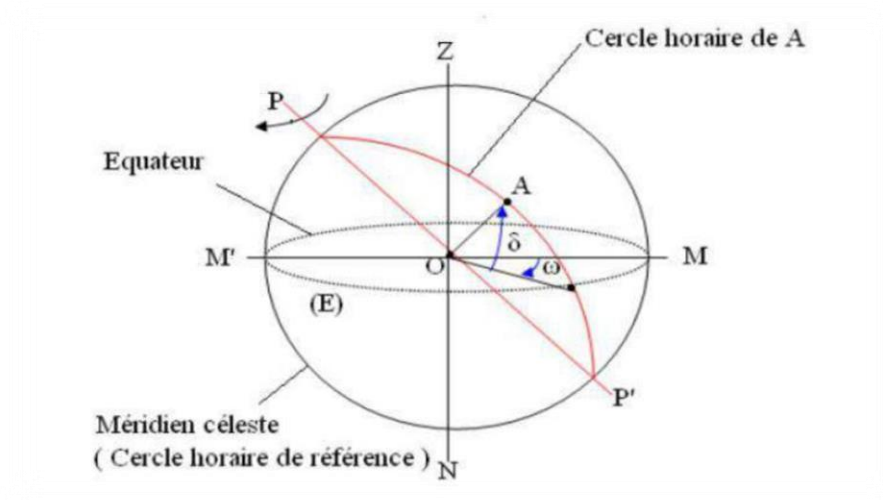


Figure 3: Les coordonnées horaires

b. Coordonnées équatoriales

- **Déclinaison (δ)** : Similaire à la latitude céleste, entre -90° et $+90^\circ$
- **Ascension droite (α)** : équivalent céleste de la longitude, mesurée en heures (0h à 24h).

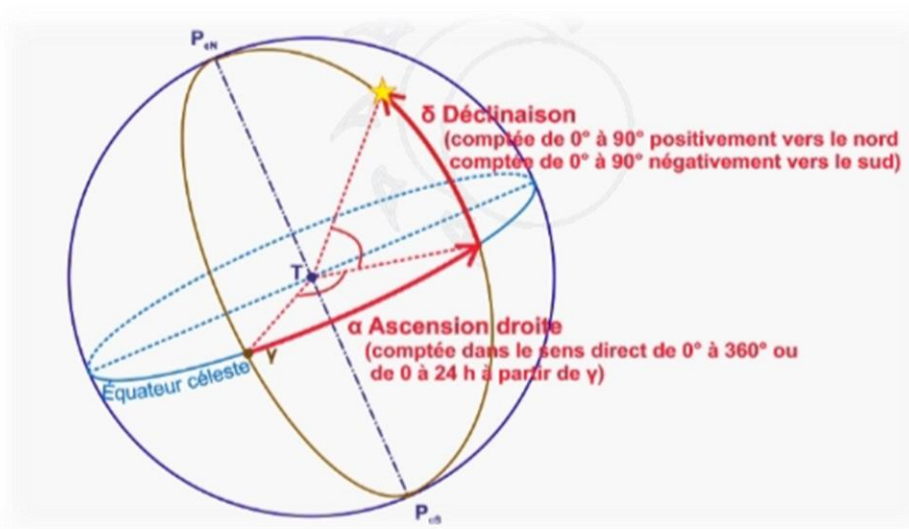


Figure 4: Les coordonnées équatoriales

C. Coordonnées écliptiques

- **Longitude écliptique (λ)** : Angle entre le point vernal et la projection du corps céleste sur le plan de l'écliptique varie de 0° à 360° .
- **Latitude écliptique (β)** : Angle entre le corps céleste et le plan de l'écliptique. De -90° à $+90^\circ$, souvent proche de 0° pour les planètes.

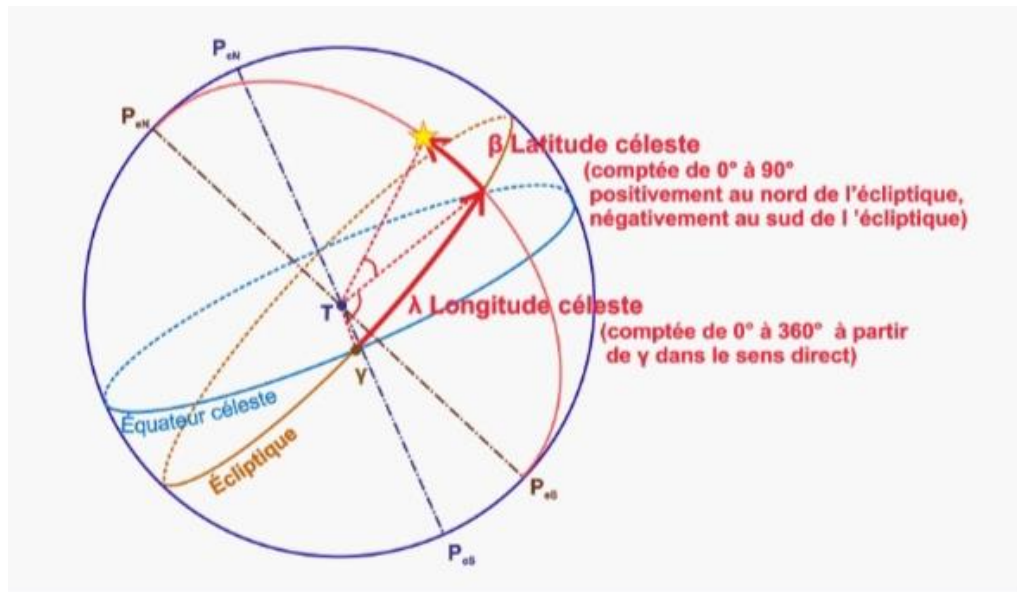


Figure 5: Les coordonnées écliptiques

I.1.2. 3. Coordonnées horizontales [3]

Ce système permet de décrire la position apparente du Soleil dans le ciel à partir d'un lieu donné, en se basant sur deux angles :

- **Hauteur solaire (h) :** C'est l'angle qui indique à quelle hauteur le Soleil se trouve au-dessus de l'horizon. Plus cet angle est grand, plus le Soleil est haut dans le ciel.
- **Azimut solaire (a) :** C'est l'angle entre le sud géographique et la direction du Soleil projetée sur le plan horizontal. Il permet de savoir dans quelle direction (est ou ouest) se trouve le Soleil.

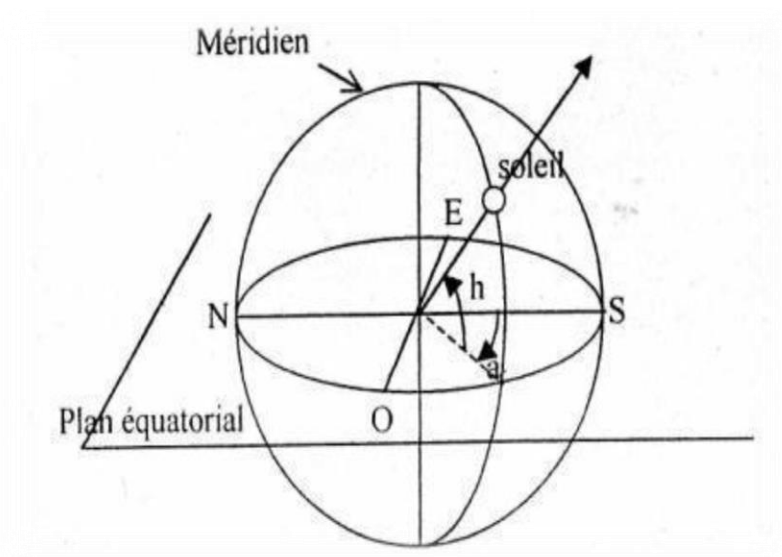


Figure 6: Coordonnées horizontales

I.2. Le rayonnement solaire :

L'énergie solaire reçue dépend de la saison, de la latitude et de l'orientation de la surface.

I.2.1. Rayonnement extraterrestre

Le Soleil, dont la surface (photosphère) est à ~ 5777 K, émet un rayonnement similaire à celui d'un corps noir. Hors atmosphère, le spectre solaire va de 200 à 3000 nm, réparti comme suit :

- Ultraviolet (< 400 nm) : 9 %
- Visible (400–700 nm) : 43 %
- Infrarouge proche (700–3000 nm) : 48 %

Le maximum d'intensité est vers 500 nm. La constante solaire (puissance reçue hors atmosphère) est d'environ 1353 W/m^2 .

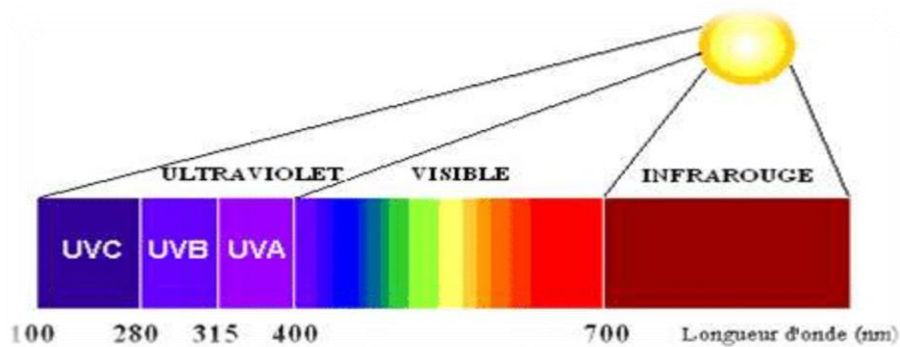


Figure 7: Spectre solaire

I.2.2. Durée d'ensoleillement :

Temps pendant lequel le rayonnement solaire direct dépasse 120 W/m^2 , exprimé en dixièmes d'heure.

I.2.3. Les composants du rayonnement solaire :

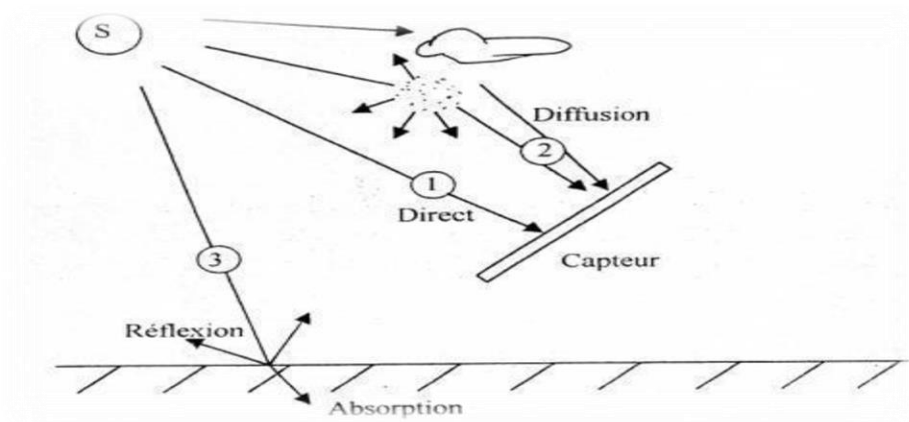


Figure 8: Les composants du rayonnement solaire

- **La constante solaire C [5]**

La constante solaire représente la quantité d'énergie solaire reçue, par unité de surface, au sommet de l'atmosphère terrestre, lorsque cette surface est perpendiculaire au rayonnement solaire.

Cette constante varie légèrement au cours de l'année selon la relation suivante :

$$C = C_0 + x \cos (0.948 \times n) \quad (1)$$

C : Constante solaire

C_0 : 1361 w/m² valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

n : numéro du jour de l'année.

I.3. Les différents types de rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre se compose de **trois composantes principales** : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi (albédo). Ces composantes jouent un rôle essentiel dans les applications de l'énergie solaire, notamment dans le dimensionnement des capteurs solaires.

I.3.1. Le rayonnement direct (ou rayonnement solaire direct normal)

Le **rayonnement direct** est la **partie du rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre sans être diffusée ni déviée** par les constituants de l'atmosphère (gaz, aérosols, nuages...).

✓ Caractéristiques :

- Il suit une trajectoire rectiligne depuis le disque solaire jusqu'à la surface.
- Il est le plus intense parmi les composantes du rayonnement.
- Il projette des ombres nettes.

✓ Influence de la position :

- Sur une surface horizontale, il dépend de l'angle d'incidence du soleil, c'est-à-dire de sa hauteur et de son azimut.
- Sur une surface inclinée, il dépend de l'orientation (azimut) et de l'inclinaison du plan par rapport au soleil.

I.3.2. Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est la partie du rayonnement solaire qui est dispersée dans toutes les directions en raison des interactions avec les molécules d'air, les particules en suspension (aérosols), la vapeur d'eau, etc.

✓ Caractéristiques :

- Il n'a pas de direction précise et provient de l'ensemble du ciel.
- Il est plus uniforme que le rayonnement direct.
- Il existe même en l'absence de rayonnement direct, comme lors des journées nuageuses.

✓ **Distribution :**

- Sur un plan horizontal, il est reçu de manière relativement homogène.
- Sur un plan incliné, sa réception varie légèrement en fonction de l'angle de vue du ciel.

I.3.3. Le rayonnement réfléchi (ou albédo) :

Le rayonnement réfléchi, aussi appelé albédo, est la partie du rayonnement solaire qui est réfléchi par la surface terrestre (sol, mer, neige, etc.) vers le capteur.

✓ **Caractéristiques :**

- Il dépend du type de surface (couleur, texture, matériau).
- Il est généralement faible comparé aux deux autres composantes, mais **non négligeable** dans certaines conditions (présence de neige, sol clair...).

✓ **Valeurs typiques de l'albédo :**

- Neige fraîche : 0,8 – 0,9 (très réfléchissante)
- Sable : 0,3 – 0,4
- Béton : 0,2 – 0,3
- Herbe : 0,2 – 0,25
- Sol humide ou sombre : 0,05 – 0,1

✓ **Application :**

- L'albédo contribue davantage sur les surfaces **inclinées ou verticales**, qui peuvent recevoir une part du rayonnement réfléchi par le sol environnant.

I.3.4. Rayonnement global :

Il s'agit de la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus reçu par une surface. Autrement dit, c'est la quantité totale d'énergie solaire disponible à un instant donné sur une surface horizontale ou inclinée.

Cette grandeur est essentielle dans l'évaluation du potentiel solaire d'un site, car elle représente l'énergie solaire effectivement captée par un système.

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$I = I_{diff} + I_{dir} \quad (2)$$

L'énergie solaire totale reçue peut être déterminée par l'équation suivante :

$$\phi_g = I_{dn} + D_c(\beta) + D_s(\beta) \quad (3)$$

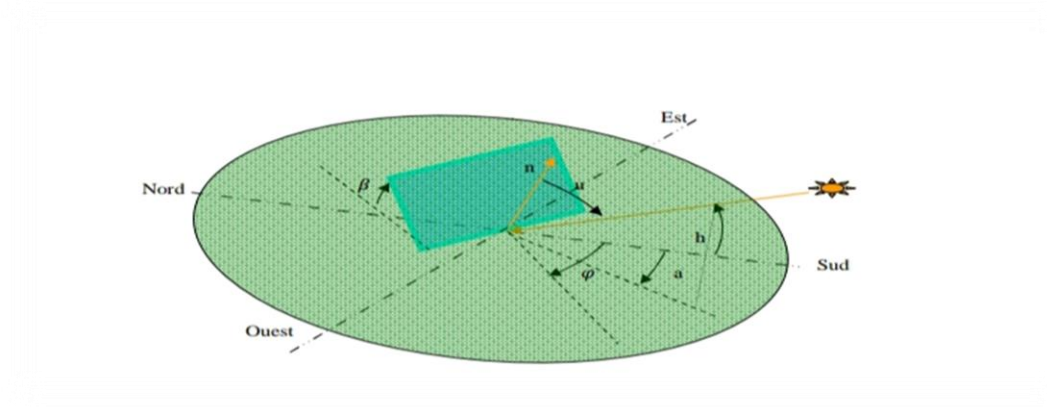


Figure 9: Caractéristiques géométriques d'un capteur plan orienté de Q avec le sud

(a: azimuth)

Cette relation exprime la somme du rayonnement direct et diffus, permettant d'estimer l'énergie solaire captée par toute surface inclinée.

Le rayonnement solaire reçu par une surface inclinée dépend de plusieurs facteurs. L'intensité du rayonnement normal incident (I_{dn}) sur une surface inclinée d'un angle (β) est donnée par :

$$I_{dn} = I_d \cos(u) \quad (4)$$

Où (u) représente l'angle entre la normale à la surface du capteur et la direction des rayons solaires.

Le rayonnement direct provenant du ciel (I_d) s'exprime en W/m^2 et peut être déterminé à l'aide de relations semi-empiriques selon les conditions atmosphériques :

- **Ciel très clair (CTC) :**

$$I_d = 1210 \exp\left(-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right) \quad (5)$$

- **Conditions normales de ciel clair (CNCC) :**

$$I_d = 1230 \exp\left(-\frac{1}{3.8 \sin(h+1.6)}\right) \quad (6)$$

- **Ciel clair pollué (CCP) :**

$$I_d = 1230 \exp\left(-\frac{1}{2.3 \sin(h+3)}\right) \quad (7)$$

Où (h) représente la hauteur du soleil en degrés. Ces relations permettent d'estimer l'intensité du rayonnement en fonction des conditions météorologiques et de la position du soleil.

Le rayonnement diffus provenant du ciel atteint une surface inclinée d'un angle (β) et peut être Calculé à l'aide de la relation suivante :

$$D_c(\beta) = \frac{1+\cos(\beta)}{2} D_h \quad (8)$$

Où (D_h) représente l'intensité du rayonnement diffus reçu par une surface horizontale, exprimée en W/m². Sa valeur dépend des conditions atmosphériques et peut être estimée selon les cas suivants :

- **Ciel très clair (CTC) :**

$$D_h = \frac{3}{4} 125 \sin(h)^{0.4} \quad (9)$$

- **Conditions normales de ciel clair (CNCC) :**

$$D_h = 125 \sin(h)^{0.4} \quad (10)$$

- **Ciel clair pollué (CCP) :**

$$D_h = \frac{3}{4} 125 \sin(h)^{0.4} \quad (11)$$

Quant au rayonnement diffus réfléchi par le sol et capté par la surface inclinée, il est donné par :

$$D_s(\beta) = \alpha_{sol} \frac{1-\cos(\beta)}{2} (I_d \sin(h) + D_h) \quad (12)$$

Où (α_{sol}) désigne l'albédo du sol, qui dépend de la nature de la surface réfléchissante.

Tableau 1: Quelques valeurs de l'albédo en fonction de la nature du sol

Nature du sol	Albédo
Sol enneigé	0.70
Sol recouvert de feuilles mortes	0.30
Herbe verte	0.26
Forêt en automne ou champs dorés	0.26
Galets de pierres blanches	0.20
Herbe sèche	0.20
Sol argileux	0.17
Forêt en hiver (arbres conifères sans neige)	0.07
Plan d'eau (soleil haut $h > 30^\circ$) à	0.07

I.4. Les Capteur Solaires :

Un capteur solaire ou panneau solaire est un élément d'une installation solaire destiné à recueillir l'énergie solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur (air, eau) ou en énergie électrique [6].

I.5. Le rôle du capteur solaire :

Le capteur solaire est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en une forme d'énergie utile, soit thermique, soit électrique, selon son type. Les capteurs solaires thermiques absorbent le rayonnement solaire pour produire de la chaleur, utilisée notamment pour chauffer de l'eau ou de l'air. Les capteurs photovoltaïques, quant à eux, transforment directement la lumière du soleil en électricité. Grâce à leur capacité à exploiter une source d'énergie propre, gratuite et renouvelable, les capteurs solaires jouent un rôle essentiel dans les systèmes énergétiques durables.

I.6. Types de capteurs solaires :

Il existe principalement deux types de capteurs solaires [6].

- Capteur solaire thermique.
- Capteur solaire photovoltaïque.

I.6.1. Le capteur solaire photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en courant continu, qui peut être utilisé via un onduleur pour répondre aux besoins électriques de la maison de l'immeuble. Ces capteurs solaires photovoltaïques ont plusieurs utilisations, en premier lieu l'autoconsommation, mais également la revente sur le réseau public. Par ailleurs, ce type d'énergie renouvelable est directement liée à la notion de stockage d'énergie. L'association des capteurs solaires et des systèmes de stockage permet de répondre efficacement aux variations de la demande énergétique.

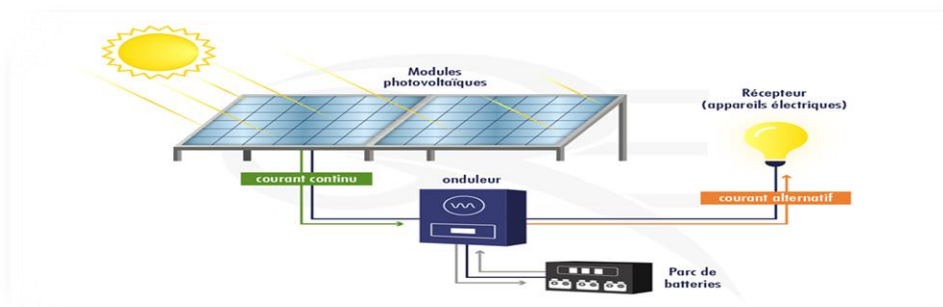


Figure 10: Panneaux photovoltaïque

I.6.2. Le capteur solaire thermique :

Il est constitué d'un panneau noir absorbant la chaleur du soleil pour la transmettre à de l'eau circulant dans le capteur solaire. Il existe principalement deux types de capteurs solaires thermiques. Le capteur plan le plus simple et le moins cher et le capteur à tubes sous vide ayant un meilleur rendement solaire car il récupère plus efficacement le rayonnement solaire. Le capteur solaire thermique est principalement utilisé pour le réchauffage de l'eau chaude sanitaire ou le complément au chauffage de la maison ou de l'immeuble. Dans le premier cas l'installation est dite chauffe-eau solaire individuel (CESI) ou système solaire centralisé (SSC). À noter qu'il existe une version simplifiée du chauffe-eau solaire individuel, c'est le CESI optimisé. Plus petit, et moins adapté à une demande appropriée au marché de la basse consommation.



Figure 11: Capture solaire thermique

Il existe deux principaux types de capteur solaire [7] :

- Les capteurs à concentration.
- Les capteurs plans.

I.7. Les capteurs à concentration :

Ces capteurs solaires utilisent des miroirs réfléchissants de forme parabolique ou cylindro-parabolique pour concentrer les rayons du soleil, soit en un point focal, soit le long d'une ligne focale, en fonction de la géométrie du miroir. Des récepteurs (ou absorbeurs) sont placés au niveau de ces foyers afin de capter la chaleur solaire ainsi concentrée. Afin d'assurer un rendement optimal, ces concentrateurs doivent suivre en permanence la trajectoire du soleil tout au long de la journée [2].

I.8. Les capteurs solaire plans :

Les capteurs solaires plans à air servent à convertir l'énergie du soleil en chaleur, récupérée par de l'air circulant à l'intérieur du système. Cette chaleur peut ensuite être utilisée dans divers domaines, tels que le séchage agricole, le chauffage de bâtiments ou même la réfrigération. Différents modèles ont été développés à travers le monde, dans le but d'optimiser la capture de l'énergie solaire tout en réduisant les coûts. Il existe deux types de capteur solaire plans : Le capteur solaire à eau et le capteur solaire à air [8].

I.8.1. Composants d'un capteur solaire plan :

Le capteur plan est un système essentiellement composé de 4 éléments principaux :

- **L'absorbeur**

Est un élément clé d'un capteur thermique, tel qu'un panneau solaire, il a pour rôle de Capturer le rayonnement solaire et de le convertir en chaleur afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie. Généralement conçu dans un matériau de couleur noir pour maximiser l'absorption, il est intégré à un circuit contenant un fluide caloporteur, souvent de l'eau. L'absorbeur peut se présenter sous différentes formes : une plaque métallique, un serpentín avec ou sans vitrage, un tube sous vide, une bâche en plastique ou encore un réservoir en métal ou en plastique.

Il remplit deux fonctions essentielles :

- Capturer le maximum de rayonnement solaire possible.
- Transférer efficacement la chaleur produite au fluide caloporteur tout en minimisant les pertes thermiques [9] [10].

- **Le vitrage :**

La couverture transparente joue un double rôle : elle protège l'absorbeur et contribuant à amélioration du rendement thermique en limitant les pertes de chaleur. Le verre est le matériau de couverture le plus couramment utilisé.

Ce vitrage agit comme un piège pour le rayonnement solaire, optimisant ainsi la captation de l'énergie. L'efficacité du capteur peut être encore améliorée en ajoutant une deuxième couche de vitrage [9] [11].

- **L'isolant thermique**

L'isolant thermique joue un rôle essentiel dans la réduction des pertes de chaleur, son efficacité dépend de coefficient de conductivité thermique : plus ce coefficient est faible, plus l'isolation est performante. Parmi les matériaux isolants les plus utilisés dans les capteurs thermiques, on retrouve la laine de roche, la laine de verre, la mousse de polyuréthane et la résine de mélamine, ainsi que certains isolants d'origine naturelle.

Dans les capteurs solaires vitrés, l'air peut être utilisé comme isolant entre la vitre et l'absorbeur, suivant le même principe que le double vitrage. Pour améliorer encore davantage l'isolation, certains fabricants utilisent des gaz comme l'argon ou le xénon. Dans les conceptions les plus avancées, la technologie du vide est utilisée pour minimiser au maximum les pertes thermiques [9].

• Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur a pour fonction de transférer la chaleur au sein d'un capteur thermique. Il permet d'évacuer l'énergie thermique captée par l'absorbeur et de la transporter vers le point d'utilisation. Pour être efficace, un fluide caloporteur doit répondre à plusieurs critères :

- Stabilité chimique, même haute températures en cas de stagnation du capteur.
- Propriétés antigel adaptées au climat local.
- Compatibilité anticorrosion avec les matériaux du circuit.
- Haute chaleur spécifique et bonne conductivité thermique pour un transfert de chaleur optimal.
- Non-toxique et faible impact environnemental.
- Faible viscosité afin de limiter l'effort de la pompe de circulation.
- Accessibilité et coût raisonnable.

Un mélange d'eau et de glycol est souvent privilégié, comme dans les systèmes de refroidissement automobiles, car il répond à un bon compromis entre ces exigences. Cependant selon l'application, certains systèmes peuvent n'utiliser que de l'eau voire de l'air comme fluide caloporteur.

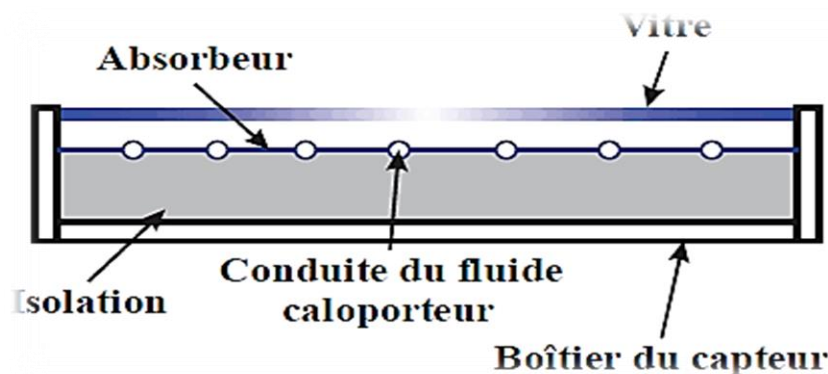


Figure 12: Composants d'un capteur solaire plan
[12]

I.8.2. Types de capteurs solaires plans :

a. capteurs non vitrés

Des tubes remplis d'eau, fabriqués en plastique noir ou en métal, permettent aux capteurs d'absorber la chaleur. Cependant, ce type de système est moins performant et s'altère plus rapidement que les modèles vitrés, car il ne bénéficie pas de la protection d'un vitrage [13].

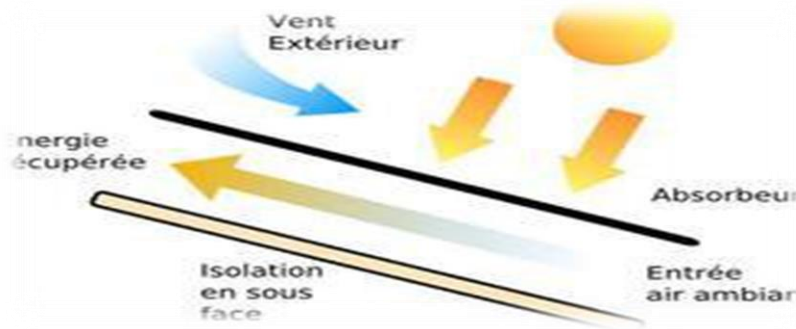


Figure 13: Capteur solaire plan non vitré
[14]

b. capteurs plans vitrés

Ce sont les plus couramment utilisés. Une plaque en métal noir leur permet d'absorber les rayons du soleil. Celle-ci est directement en contact avec le fluide caloporteur. La chaleur est conservée à l'intérieur des tubes grâce à un matériau isolant.

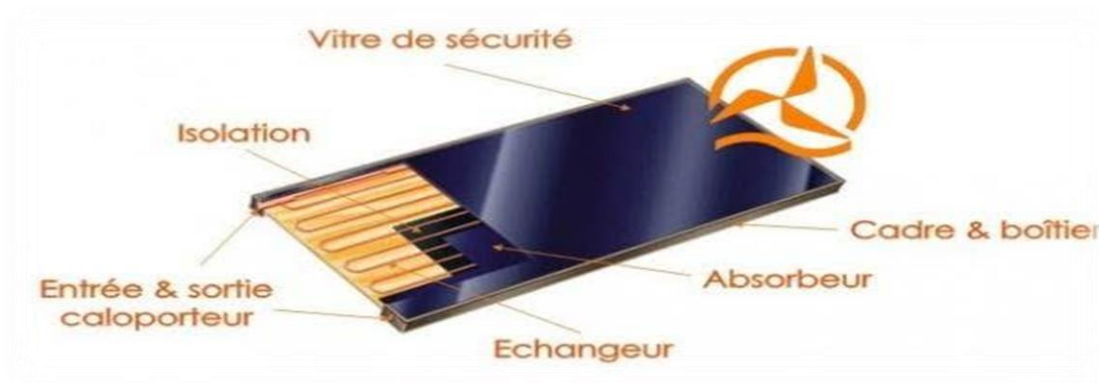


Figure 14: Capteur solaire plan vitré
[15]

c. Les capteurs à tubes vitrés sous vide :

Il s'agit de tubes en verre placés les uns à côté des autres. Les rayons du soleil sont absorbés par une plaque noire. On parle de tubes vitrés « sous vide », car l'air résiduel est ensuite retiré des tubes, afin de créer une meilleure isolation et de limiter les pertes de chaleur. Ils sont plus performants, puisqu'ils permettent d'obtenir une température plus élevée, plus rapidement. Ils sont généralement utilisés dans l'industrie. Cependant, ils sont plus chers.



Figure 15: Capteur solaire à tube sous verre
[14]

I.8.3. Capteur solaire plan à l'air :

Le capteur solaire à air est un dispositif utilisé dans les systèmes solaires thermiques pour convertir le rayonnement solaire en énergie thermique. Ce système repose sur un collecteur solaire qui absorbe l'énergie du soleil et la transforme en chaleur, laquelle est ensuite transmise à l'air en tant que fluide caloporteur. L'air chaud ainsi produit peut être utilisé pour chauffer des espaces intérieurs, sécher des matériaux ou être stocké dans des systèmes de stockage thermique afin d'être exploité ultérieurement, notamment la nuit ou pendant les jours nuageux [16].

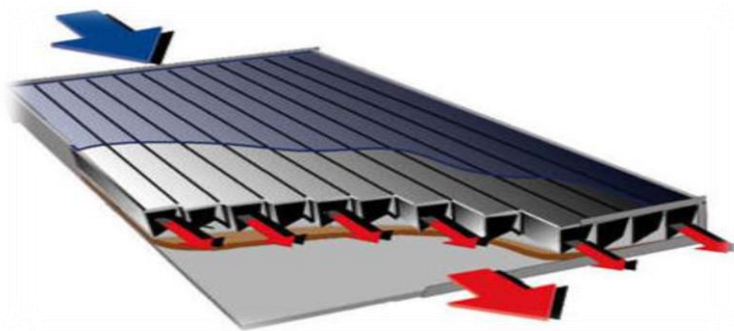


Figure 16: Capteur solaire à air

I.8.3.1. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement du capteur solaire à air repose sur l'effet de serre. Le verre laisse passer la majeure partie du rayonnement solaire. Une fois à l'intérieur, ce rayonnement chauffe la plaque absorbante, qui émet à son tour un rayonnement thermique (IR) piégé dans le capteur. L'énergie du rayonnement se transforme en chaleur à la surface de l'absorbeur,

augmentant sa température, puis cette énergie est transmise à l'air (le fluide caloporteur) par contact thermique.

Le rayonnement solaire représenté par les flèches jaunes, ne traverse pas complètement le vitrage externe du capteur. Une petite partie de ce rayonnement (P_{r1}) est réfléchi par le verre, surtout lorsque l'angle d'incidence est élevé. Malgré la grande transparence du verre, une fraction de l'énergie (P_{v1}) est absorbée par celui-ci. Le rayonnement qui atteint l'absorbeur voit une partie (P_d) être réémise ou transmise à l'air ambiant par convection. Une fraction de P_d (P_{r2}) traverse le vitrage et est définitivement perdue, tandis qu'une autre (P_{v2}) est absorbée par le verre, et le reste retourne vers l'absorbeur (P_{a2}). Les pertes à travers l'isolant ne seront pas prises en compte [17].

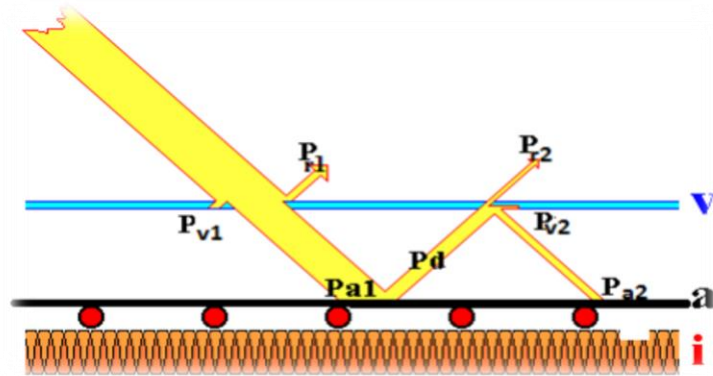


Figure 17: Principe de fonctionnement

I.8.3.2. Classification des capteurs solaires à air :

Les capteurs solaires utilisant l'air comme fluide caloporteur peuvent être classés en trois catégories principales selon leur mode de fonctionnement : **actifs**, **hybrides** et **passifs**.

- Les capteurs actifs utilisent des dispositifs auxiliaires comme des ventilateurs pour assurer la circulation de l'air.
- Les capteurs passifs fonctionnent grâce au mouvement naturel de l'air, sans intervention mécanique.
- Les capteurs hybrides, quant à eux, combinent les caractéristiques des deux types précédents.

Ces capteurs peuvent également être différenciés selon la présence ou non d'un système de stockage thermique. Certains ne possèdent aucun stockage, tandis que d'autres sont équipés de systèmes de stockage utilisant, par exemple, des pierres ou des matériaux à changement de phase (MCP).

Par ailleurs, certains capteurs intègrent des chicane internes pour améliorer l'échange thermique, alors que d'autres en sont dépourvus. Le vitrage constitue un autre critère de classification : il peut être absent, simple, double ou multiple.

Enfin, les capteurs peuvent être fixes ou équipés de systèmes de suivi solaire, permettant un suivi sur un axe ou sur deux axes, afin d'optimiser la captation de l'énergie solaire [18] [19].

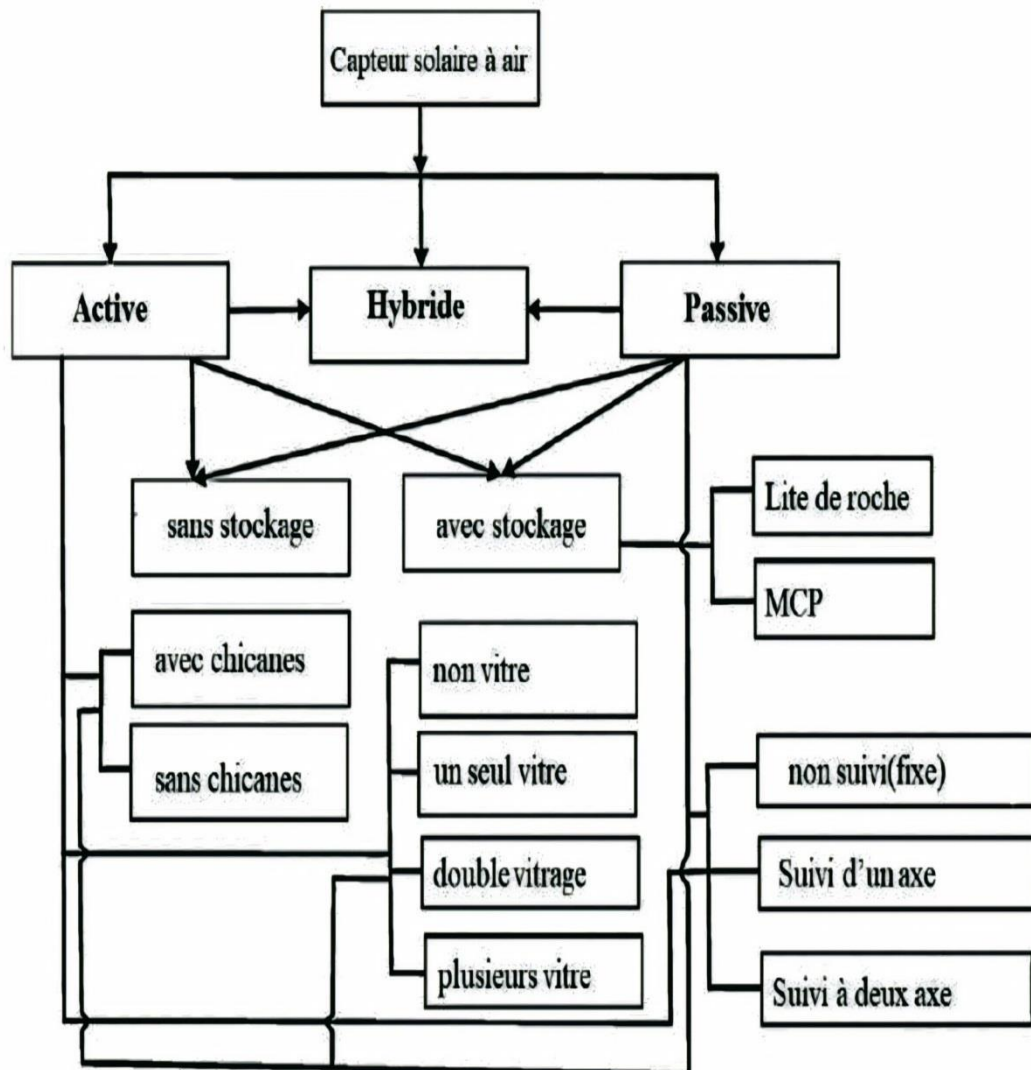


Figure 18: Classification des capteurs solaires à air

I.8.3.3. Différents types des capteurs solaires à air :

On peut regrouper les capteurs solaires plans à air en trois grandes classes :

- Les capteurs à absorbeur perméable.
- Les capteurs à absorbeur à géométrie variable.

- Les capteurs à absorbeur plan.
- **Les capteurs à absorbeur perméable**

Dans ce type de capteur, la surface absorbante est constituée d'un matériau poreux appelé matrice perméable, une structure qui permet à l'air de circuler à travers elle. Cette matrice capte l'énergie solaire incidente qui la traverse, ce qui permet de chauffer directement l'air à l'intérieur. Le système est généralement composé d'un caisson isolé dans lequel l'air pénètre et circule entre le vitrage et l'absorbeur, où il commence à se réchauffer par convection. Ensuite, l'air poursuit son trajet à l'intérieur de la matrice absorbante, où il continue à se réchauffer avant d'être dirigé vers son utilisation.

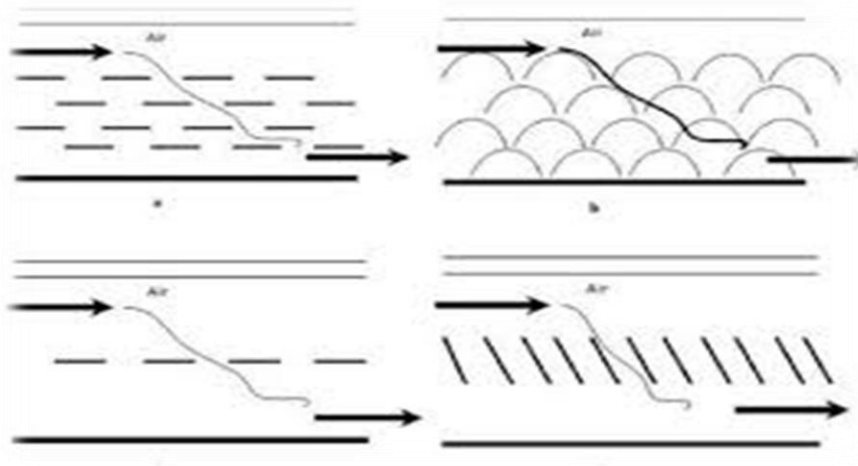


Figure 19: Capteurs à absorbeur perméable

- **Capteur solaire à absorbeur à géométrie variable**

Ces capteurs existent sous différentes formes et conceptions. Leur principe fondamental repose sur la modification de la géométrie de l'absorbeur afin d'augmenter la surface d'échange thermique avec le rayonnement solaire, comme illustré dans la figure (I.11).

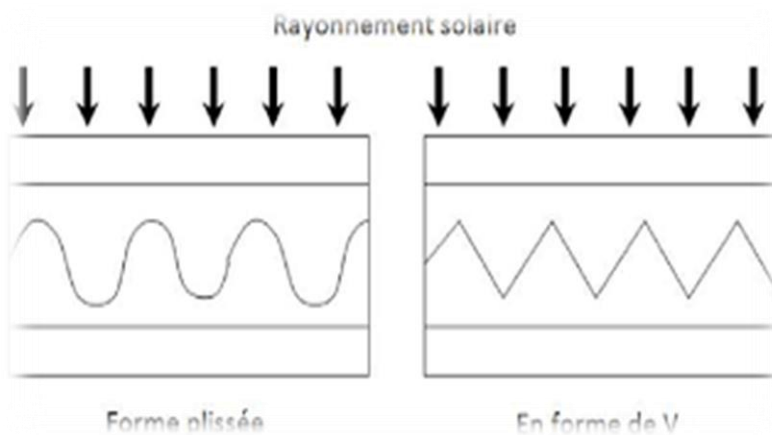


Figure 20: Capteur solaire à absorbeur à géométrie variable

• Capteur solaire à absorbante plan

Ce type de capteur utilise une plaque plane comme surface absorbante. Les différences entre les modèles résident principalement dans le nombre de vitrages utilisés ainsi que dans le mode de circulation de l'air à l'intérieur du capteur.

Plusieurs configurations de circulation de l'air sont possibles :

- Circulation de l'air au-dessus de l'absorbeur [20] [21].
- Circulation de l'air en dessous de l'absorbeur [22].
- Circulation de l'air des deux côtés de l'absorbeur [23].

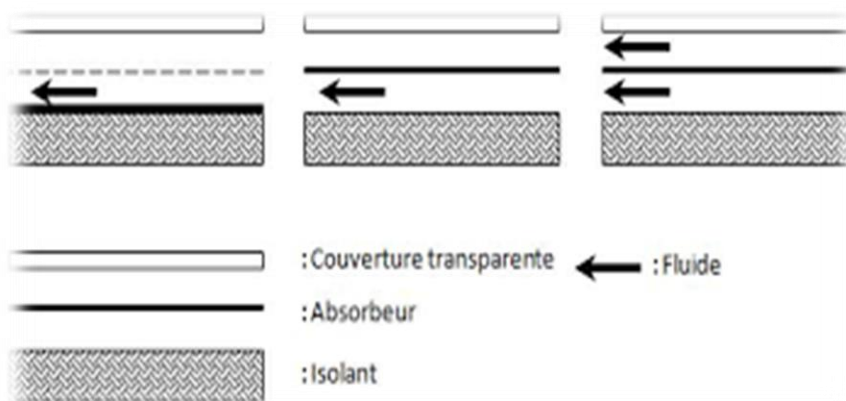


Figure 21: Circulation de l'air dans les capteurs solaire

I.8.3.4. Applications des Capteurs Solaires Plans à Air [24]

L'énergie solaire peut être directement convertie en chaleur grâce à différents types de capteurs thermiques. Cette technologie est utilisée dans plusieurs domaines, tels que le chauffage des bâtiments, le séchage des produits agricoles comme le fourrage, les céréales et les fruits, ainsi que dans le fonctionnement de moteurs thermiques.

Les principales applications de ces capteurs incluent :

- **Le séchage solaire** : utilisé pour la conservation des récoltes en réduisant leur taux d'humidité.
- **Le chauffage des habitations** : permettant d'exploiter l'énergie solaire pour assurer un confort thermique.
- **La cheminée solaire** : utilisée pour améliorer la ventilation naturelle des bâtiments, en créant un tirage thermique grâce à l'air chauffé par le soleil.

I.9. Orientation optimal d'un capteur solaire : [25]

Pour une efficacité maximale, le capteur solaire à air doit être orienté de manière à ce que sa surface absorbante soit perpendiculaire aux rayons du soleil à midi solaire, en particulier durant la période de séchage.

L'orientation dépend de l'emplacement géographique :

- **Dans l'hémisphère nord** : orienté vers le sud.
- **Dans l'hémisphère sud** : orienté vers le nord.

L'angle d'inclinaison optimal :

- **Pour une utilisation annuelle** : équivaut environ à la latitude du lieu.
- **En hiver** : ajouter 10 à 15 degrés.
- **En été** : soustraire 10 à 15 degrés.

L'efficacité peut être améliorée grâce à des systèmes de suivi solaire ou des structures à inclinaisons ajustables.

I.10. Avantages et inconvénients des capteurs solaires :

- **Avantage :**

- Source d'énergie renouvelable et propre, sans pollution.
- Conception simple, facile à installer et à entretenir.
- Bon rendement dans les régions à ensoleillement moyen ou élevé.
- Idéal pour le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage central.
- Longue durée de vie (plus de 20 ans).
- Réduction de la consommation d'énergie conventionnelle et des factures.

- **Inconvénient :**

- Rendement réduit par temps froid ou nuageux.
- Nécessitent une surface suffisante et une bonne orientation (sud + inclinaison).
- Certaines pièces peuvent se détériorer avec le temps (isolation, tuyauterie).
- Coût initial relativement élevé (amorti à long terme).
- L'installation peut affecter l'esthétique du bâtiment ou du toit.

I.11. Étude bibliographique : [26]

De nombreuses recherches ont été consacrées à l'analyse des facteurs influençant les performances thermiques des capteurs solaires plans à air. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'aspect thermique de ces dispositifs, en menant principalement des études énergétiques visant à évaluer leur efficacité globale. Dans ce qui suit, nous présentons un aperçu de quelques travaux scientifiques portant sur les performances thermiques de ce type de capteurs.

Dans le cadre des recherches visant à améliorer les performances des capteurs solaires munis de couvertures simples, doubles ou triples, le chercheur **S. Youcef-Ali et al** ont mené une étude expérimentale qui a démontré que l'utilisation d'une couverture triple permet

d'obtenir de meilleures performances par rapport à une couverture double, grâce à la réduction des pertes thermiques vers l'extérieur.

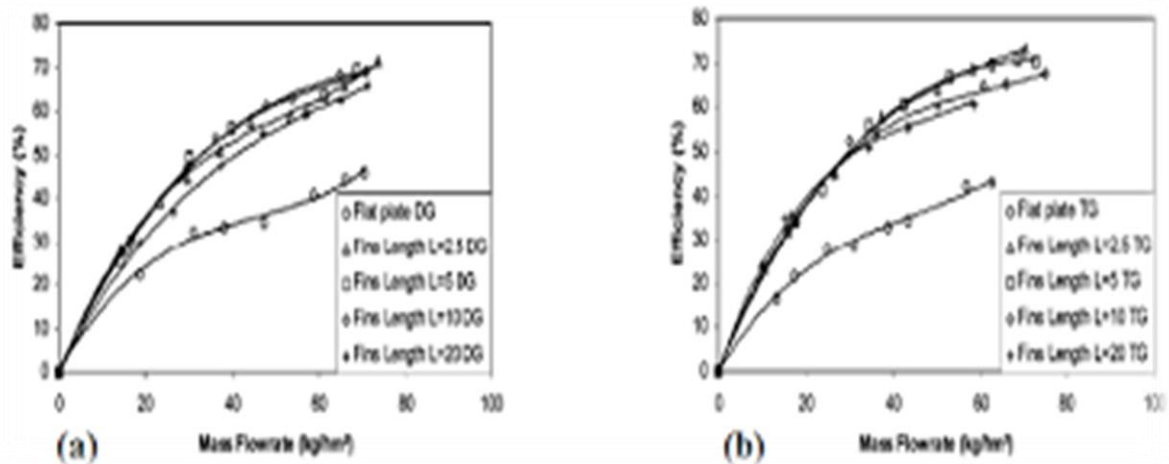


Figure 22: Variation de l'efficacité (%) en fonction de la variation du taux de débit massique (kg/hm²) a-double vitrage, b-triple vitrage

Le chercheur **Turhan Koyuncu et al** a démontré que le nombre de couvertures dans les capteurs solaires a un impact significatif sur leur efficacité thermique. Le verre s'avère efficace grâce à sa capacité à retenir le rayonnement infrarouge, ce qui améliore les performances thermiques. Toutefois, son coût élevé et sa fragilité constituent des inconvénients majeurs, ce qui a conduit à l'utilisation de couvertures plastiques transparentes comme alternative, plus économique et plus résistante.

Donation Njomo et al ont montré qu'un capteur solaire muni d'une double couverture composée de matériaux différents offre de meilleures performances thermiques qu'un capteur avec deux couvertures identiques. Leur étude a révélé que le rendement du capteur ainsi que la température de sortie du fluide caloporteur diminuent avec l'augmentation du débit d'air et de la température d'entrée, en raison de l'accroissement des pertes thermiques. De plus, l'élévation de la hauteur du canal d'écoulement du fluide entraîne une baisse continue des performances thermiques.

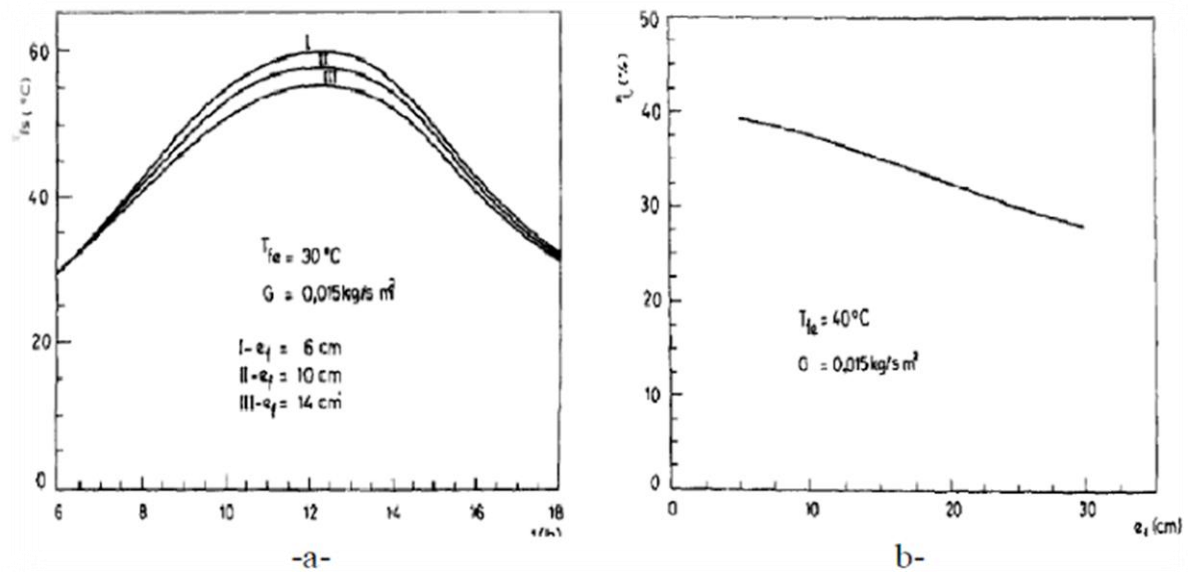


Figure 23: (a) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur les variations horaires de la température de sortie du fluide caloporteur, (b) : Influence de la hauteur du canal d'écoulement sur rendement thermique

Ho-Mig Yeh et Tong-Tshien Lin ont rapporté que l'augmentation de la surface du capteur améliore l'absorption du rayonnement solaire et le transfert de chaleur, mais elle augmente également les pertes thermiques vers l'extérieur.

Suleyman Karsali a montré que l'augmentation de la longueur du capteur solaire a un impact significatif sur son efficacité. En conséquence, plusieurs chercheurs ont proposé d'améliorer le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur en ajoutant des ailettes (obstacles thermiques) sur la face inférieure de l'absorbeur, sans modifier les dimensions du capteur. Selon **A. Abene et al**, **S. Youcef-Ali** ces obstacles permettent d'accroître la surface d'échange, de réduire les zones mortes et de générer de la turbulence. **A. Abene et al** ont également démontré que la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition de ces obstacles influencent fortement la performance du capteur, comme l'ont aussi souligné **K. R. Ahrwal** et **B. K. Gandhi**.

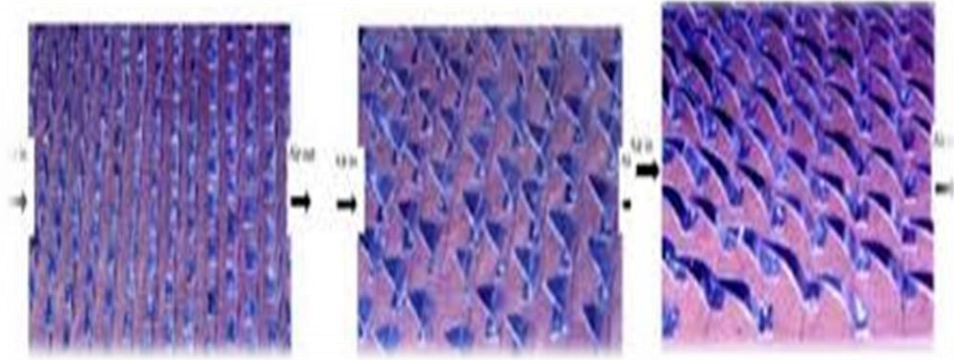


Figure 24: Différents formes d'ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur

N. Moumni et al a étudié l'effet de l'ajout d'obstacles dans les capteurs solaires à air. Il a démontré que ces obstacles, placés perpendiculairement à l'écoulement de l'air, provoquent une turbulence bénéfique qui améliore le transfert thermique entre les composants internes, ce qui conduit à une meilleure performance par rapport aux capteurs dépourvus d'obstacles.

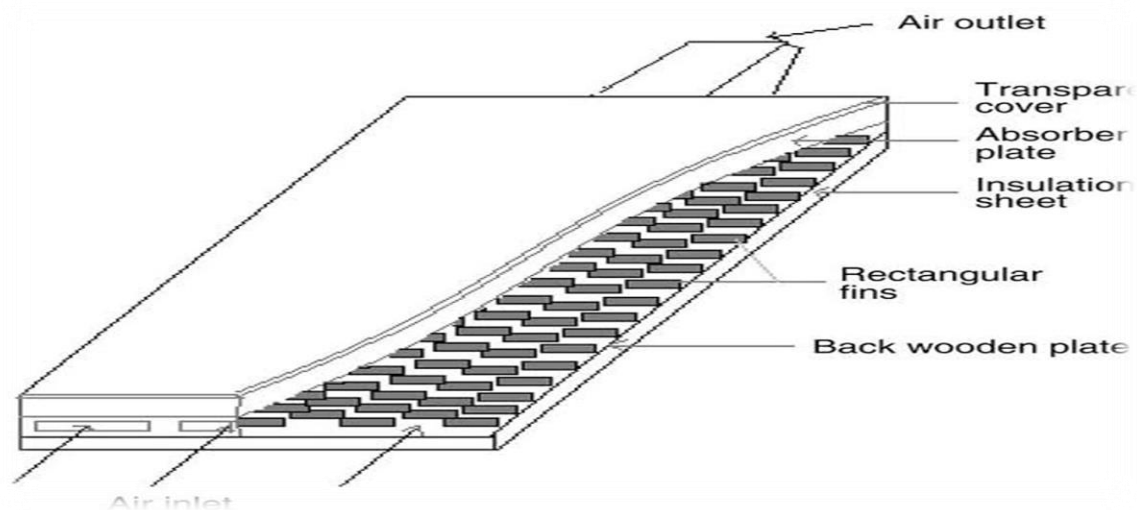
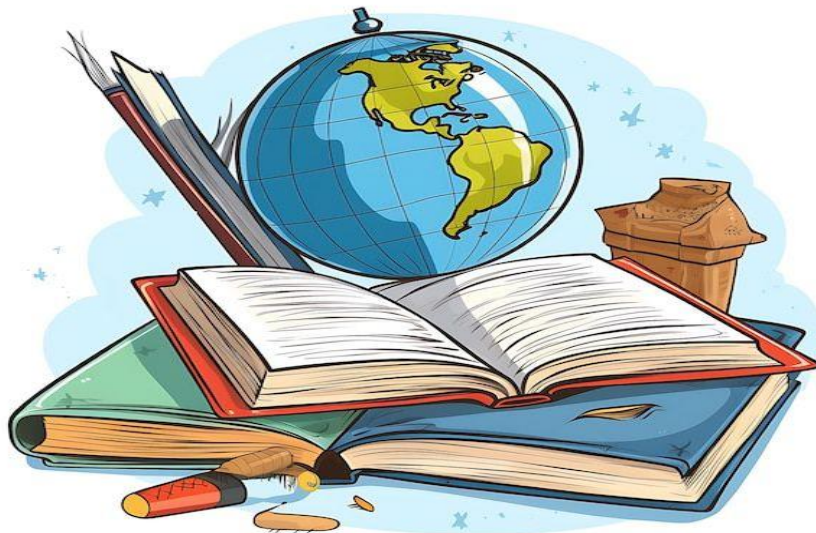


Figure 25: Capteur avec des chicanes rectangulaire sur la plaque inférieure en bois

Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, nous avons présenté de manière globale les principes fondamentaux des capteurs solaires, leurs différents types, leurs composants et leurs fonctions, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons également abordé les divers domaines d'application qui témoignent de leur importance dans la transition vers les énergies renouvelables.

Chapitre II :
Conception et simulation numérique d'un
capteur solaire



Introduction

L'énergie solaire est l'une des principales sources d'énergie renouvelable, offrant des alternatives propres et efficaces. Cette étude a pour objectif la conception d'un capteur solaire à air, capable de transformer l'énergie solaire en chaleur. Des matériaux à bonnes propriétés thermiques ont été choisis pour optimiser le rendement et limiter les pertes.

Le modèle mécanique du capteur a été réalisé à l'aide du logiciel **SolidWorks**, ce qui a permis une conception précise et une simulation. Un modèle thermique fondé sur la méthode nodale a également été développé pour estimer le rendement instantané et analyser les performances du système. Ce projet a pour objectif de réaliser un système durable, performant et à faible impact environnemental.

II.1. Logiciels de conception

II.1.1. SolidWorks

SolidWorks est l'un des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) les plus réputés, largement utilisé dans le secteur de l'ingénierie industrielle grâce à sa capacité à offrir des solutions innovantes et efficaces en matière de conception et de modélisation 3D. Le programme propose une large gamme d'outils et de fonctionnalités spécifiquement développés pour répondre aux besoins des ingénieurs et des concepteurs, ce qui en fait un outil essentiel dans divers domaines de l'ingénierie.

Parmi les principales caractéristiques et avantages offerts par SolidWorks, on peut citer :

- Une large utilisation dans divers secteurs industriels en raison de ses multiples applications en conception et fabrication.
- La capacité de créer des modèles tridimensionnels d'une grande précision, permettant aux ingénieurs de développer des conceptions détaillées de pièces, d'assemblages et de systèmes mécaniques.
- L'utilisation du concept de conception paramétrique, facilitant l'ajustement des paramètres et l'amélioration des conceptions avec une grande flexibilité, permettant ainsi la répétition et le perfectionnement des modèles.
- La génération de documents techniques précis comprenant des dessins d'ingénierie, des schémas et des nomenclatures de matériaux (BOM), facilitant la transmission organisée des informations techniques.
- L'inclusion de fonctionnalités avancées de gestion des versions et des configurations, ainsi que le support de la collaboration entre équipes d'ingénierie, renforçant la coordination et l'efficacité.

- Une intégration étroite avec les systèmes de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) et les technologies d'impression 3D, assurant une transition fluide de la conception virtuelle à la production réelle tout en garantissant précision et conformité entre le modèle numérique et le produit final.

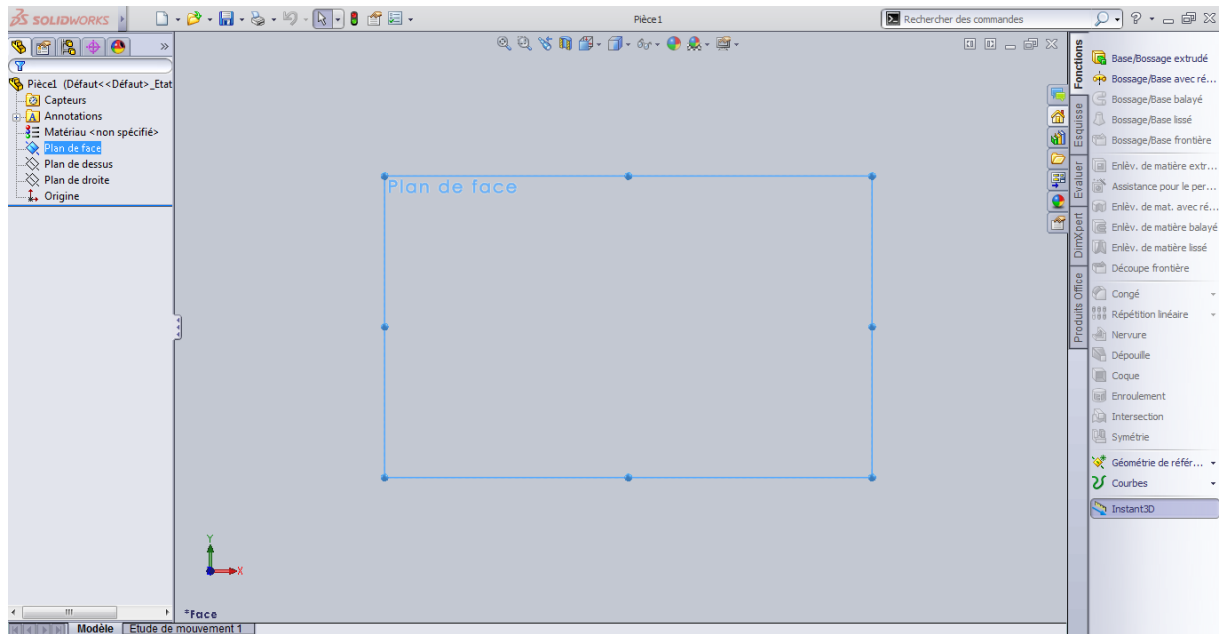


Figure 26: La conception de l'interface SolidWorks

II.1.2. Description du prototype du capteur solaire :

Le capteur solaire adopté dans ce projet est un capteur à air plan à passage unique. Il est constitué d'un caisson de 2 mètres de hauteur, 1 mètre de largeur et 0.45 mètre d'épaisseur (épaisseur air + vitre). La structure est fabriquée en bois traité pour assurer la durabilité et la résistance aux conditions environnementales. Les côtés et l'arrière sont isolés avec du polystyrène d'une épaisseur 0.05 mètre afin de minimiser les pertes thermiques.

Les principaux composants du capteur sont les suivants :

- **Couvercle transparent en polycarbonate :** le polycarbonate a été choisi comme matériau de couverture en raison de ses excellentes propriétés physiques, de sa résistance aux chocs et de sa capacité à transmettre efficacement la lumière solaire. L'épaisseur de la vitre est de 0.003 mètre.
- **Plaque absorbante métallique :** une plaque métallique peinte en noir mat, d'une épaisseur de 0.003 mètre est utilisée pour absorber le rayonnement solaire et chauffer l'air circulant à l'intérieur du capteur.

- **Plaques isolantes en polystyrène** : placées sur les côtes et à l'arrière du capteur, avec une épaisseur de 0.05 mètre, elles améliorent l'isolation thermique et réduisent les pertes de chaleur.

- **Structure en bois** : le cadre en bois, traité contre l'humidité et la chaleur, constitue la base de soutien du capteur et garantit une longue durée de vie.

II.1.3. Dimensionnement du prototype du capteur :

Nous pouvons illustrer cela dans tableaux :

Tableau 2: Dimensionnement et propriété physique de matériaux du prototype du capteur

N° Article	Désignation	Dimension	Matériaux	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (j/kg.k)	Remarque
1	Vitrage	$e_v=0.003$ m	Polycarbonate sheet	~1200	0.19-0.22	~1200	Bonne transmission lumineuse, résistant aux chocs
2	Plaque absorbante	$e_p=0.003$ m	Plaque métallique peinte en noir mat (Aluminium)	~2700	~205	~900	Forte absorption grâce à la peinture noire mate
3	Plaque Isolation	$e_{is}=0.005$ m	Plaque polystyrène	~20-40	~0.03-0.04	~1300	Excellent isolant thermique
4	La Structure	$1 \times 2 \text{ m}^2$	Bios traité	~ 500-700	~0.12-0.15	~1600	Résistant à l'humidité s'il est bien traité

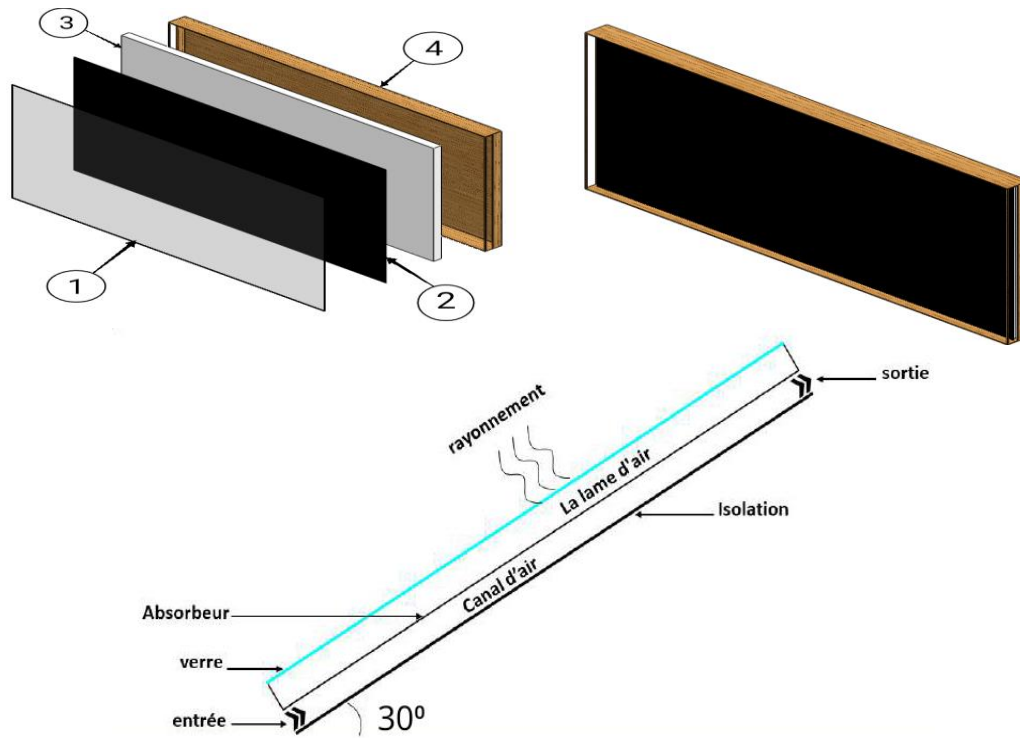


Figure 27: Les composants de capteur solaire

Tableau 3: Prix et quantités des matériaux

Composant	Matériau	Dimensions / Qté	Prix estimé (DZ)
Structure extérieure	Bois traité contre l'humidité	2m × 1m × 45mm	8,000
Couvercle transparent	Feuille de polycarbonate (3 mm)	2m × 1m × 3mm	9,000
Plaque absorbante	Aluminium noir mat	2m × 1m × 3mm	10,000
Isolation thermique	Plaques de polystyrène (5 cm)	Côtés + arrière	3,000
Ventilateurs (optionnel)	Ventilateur 12V	1 à 2	4,000
Capteurs thermiques (optionnel)	Capteurs de température simples	1 – 2	3,000
Accessoires divers	Vis, peinture, silicone...	Divers	3,000

- Coût total estimé : 40000 DZ (hors main d'œuvre).

II.2. Modes de transfert dans les capteurs solaires :

Un capteur solaire fonctionne grâce à l'interaction simultanée des trois mécanismes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

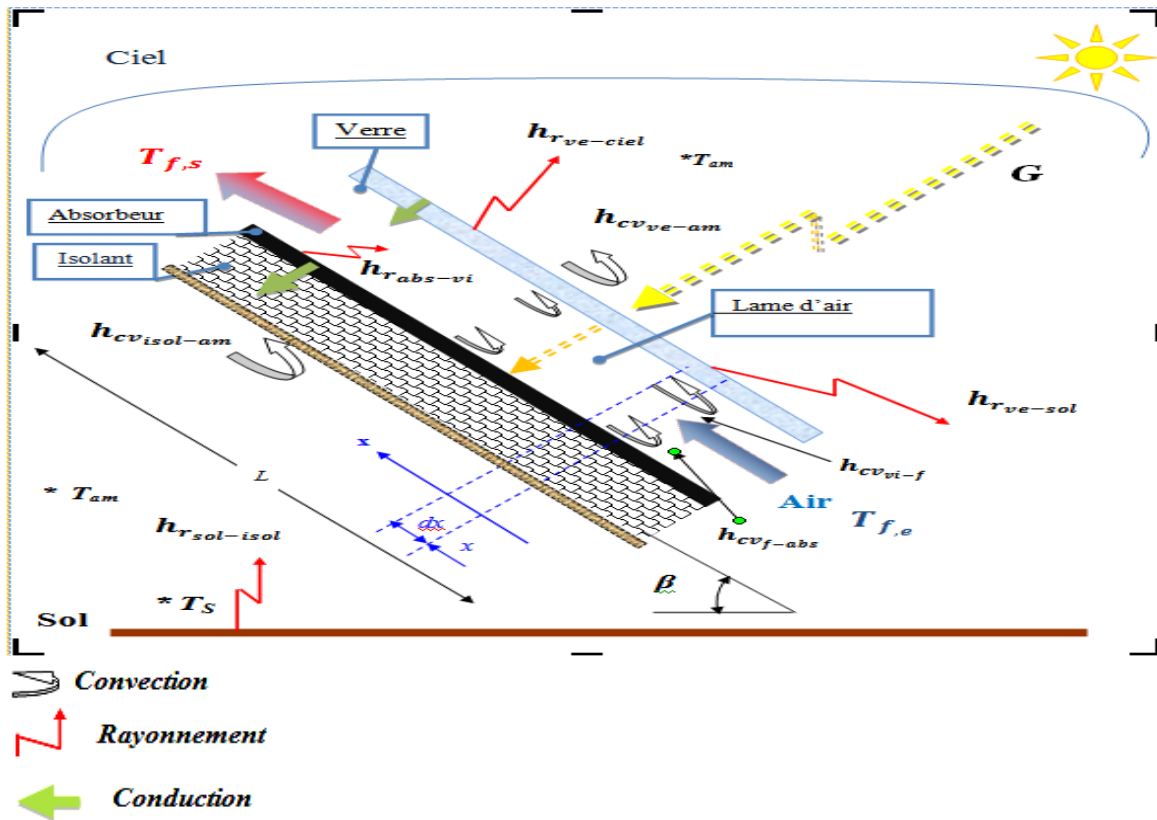


Figure 28: échanges et transferts thermiques entre les éléments d'un capteur plan à air

II.2.1. Transfert thermique par convection [27,28]

Le transfert de chaleur par convection se produit dans plusieurs zones à l'intérieur et à l'extérieur du capteur solaire. Ce phénomène intervient dans les cas suivants :

- ✓ À l'extérieur du capteur : La chaleur est échangée entre la surface du capteur et l'environnement ambiant, où la vitesse du vent influence le taux de perte thermique.
- ✓ À l'intérieur du capteur : Le transfert thermique a lieu entre l'absorbeur et l'air confiné dans l'espace entre la vitre et l'absorbeur, ainsi qu'entre cet air et la vitre elle-même.

On distingue deux types de convection :

- **La convection forcée :**

Le mouvement du fluide est induit par une source externe telle que le vent, une pompe, un ventilateur ou tout autre dispositif générant un écoulement forcé.

- **La Convection naturelle :**

L'écoulement du fluide résulte des variations de densité causées par les différences de température à l'intérieur du fluide, un phénomène connu sous le nom de circulation thermique.

Le transfert de chaleur par convection est régi par la loi de Newton :

$$Q = h \times S \times (T_p - T_f) \quad (13)$$

Avec :

Q : le flux échange par convection.

h : coefficient de convection.

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p : Température de la paroi solide.

T_f : Température du fluide.

Dans un capteur solaire plan, les transferts thermiques par convection se produisent à différents niveaux :

- Entre la vitre et l'air ambiant, sous l'effet de la convection naturelle ou du vent.
- Entre la vitre et la plaque absorbante, via un mouvement de convection naturelle.
- Entre le fluide caloporteur et le tube qui le contient, par convection naturelle.
- Entre le fluide et l'isolant, à travers un échange convectif naturel.
- Entre l'isolant et l'environnement extérieur, influencé par la convection naturelle ou le vent.

• **Evaluation du coefficient de convection forcée entre le verre (ou l'isolant) et le vent**

De nombreuses études expérimentales ont permis de proposer plusieurs expressions pour calculer le coefficient de convection entre le verre (ou l'isolant) et le vent. Parmi celles-ci, on trouve l'expression proposée par MACADAMS [10] :

$$h_{cva} = 5,7 + (3,8 \times V) \quad (14)$$

Avec

h_{cva} : Coefficient de convection entre la vitre et le vent.

V : la vitesse du vent

Si l'on considère que l'équation prend en compte les effets du rayonnement, Watmuff (1977) propose la corrélation suivante :

$$h_{vent} = 2.8 + 3.V_{vent} \quad (15)$$

Plus tard, en 1980, Lunde établit une autre relation :

$$h_{cvent} = 4.5 + 2.9.V_{vent} \quad (16)$$

Par ailleurs, d'autres expressions reposent sur le nombre de Nusselt ou sur une dimension Caractéristique de la surface. Toutefois, leur utilisation requiert une connaissance précise du régime d'écoulement du vent, qu'il soit laminaire, turbulent ou mixte.

• **Evaluation du coefficient de convection forcée entre l'absorbeur et le fluide caloporteur :**

Différentes relations empiriques ont été développées par plusieurs chercheurs pour évaluer le coefficient de convection forcée entre l'absorbeur et le fluide caloporteur. Parmi celles-ci, on peut mentionner les expressions établies dans la source [29], qui sont formulées en fonction des nombres de Reynolds (R_e) et de Graetz (G_z).

Écoulement laminaire ($R_e < 2100$) :

$$N_u = 1,86 \times G_z^{0.33} \quad (17)$$

Si $R_e < 100$ le nombre de Nusselt est donné par :

$$N_u = 3.66 \quad (18)$$

Écoulement turbulent ($R_e > 10000$) :

$$N_u = 0.0155 \times Re^{0.83} \times Pr^{0.5} \quad (19)$$

Dans la région de transition, correspondant à des valeurs du nombre de Reynolds comprises entre 2000 et 10000, écoulement devient instable et l'évaluation des coefficients de transfert thermique manque de précision. Il est donc conseillé d'éviter d'opérer dans cette plage de Reynolds [30].

$$R_e = \frac{\rho f \times d_i \times V_e}{\mu_f} \quad (20)$$

μ_f : viscosité dynamique du fluide.

d_i : diamètre intérieur du conduit.

L : longueur du conduit.

ρ_f : Masse volumique du fluide caloporteur.

V_e : vitesse de l'écoulement.

II.2.2. Transfert thermique par conduction :

La conduction thermique est le transfert d'énergie à l'intérieur d'un matériau sans déplacement de celui-ci, et elle est régie par la loi de Fourier [31].

$$q = -k \times A \times \text{grad } T \quad (21)$$

q : flux de chaleur.

K : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange.

Dans un capteur solaire plan, les transferts thermiques par conduction se manifestent principalement à travers :

- La vitre, entre ses faces supérieure et inférieure (hcv).
- L'isolant, entre ses deux surfaces opposées (his).
- La liaison entre l'absorbeur et l'isolant (hcvai).

II.2.3. Transfert thermique par rayonnement :

Le transfert thermique par rayonnement se produit lorsque de l'énergie, sous forme d'ondes électromagnétiques, est émise par une surface et absorbée par une autre. Ce type d'échange peut avoir lieu que les corps soient séparés par le vide ou par un milieu intermédiaire suffisamment transparent aux ondes électromagnétiques [10].

La principale loi régissant le rayonnement est celle de **Stefan-Boltzmann**.

$$q = \sigma \times \varepsilon \times T^4 \quad (22)$$

q : densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : émissivité thermique du matériau.

σ : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6.10^{-8} \text{ W/m}^2.k^4$.

T : température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan, l'échange thermique par rayonnement se produit principalement entre :

- L'absorbeur et la vitre.
- La vitre et l'atmosphère.
- L'isolant et la surface au sol.
- **Evaluation du coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur :**

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur est déterminé à l'aide de la relation (23), en tenant compte des hypothèses appropriées et des simplifications mathématiques requises.

$$h_{rav} = \sigma \times \frac{(T_{ab}^2 + T_v^2) \times (T_{ab} + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (23)$$

h_{rav} : Coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la plaque de l'absorbeur et la vitre.

T_{ab} : Température de l'absorbeur.

T_v : Température de la face intérieure de la vitre.

ε_{ab} : Émissivité de l'absorbeur.

ε_v : Émissivité de la vitre.

• **Evaluation du coefficient de transfert thermique par rayonnement entre La vitre et le ciel (ou l'isolant et le sol) :**

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel (ou entre l'isolant et le sol) dépend de la température du ciel (ou du sol) ainsi que de la température de la face extérieure de la vitre (ou de l'isolant).

Différentes corrélations permettent d'estimer la température du ciel [28].

En 1932, BRUNT a établi une relation entre la température du ciel et la pression de la vapeur d'eau :

Dans l'équation (34), l'auteur utilise les expressions suivantes :

$$T_c = T_a - 12 \quad (24)$$

$$T_c = T_a - 6 \quad (25)$$

En 1963, SWINBANK a proposé une formule établissant un lien entre la température du ciel et la température ambiante. Cette relation sera adoptée dans cette étude :

$$T_c = 0.0552 \times T_a^{1.5} \quad (26)$$

Cette corrélation a ensuite été remplacée par une nouvelle expression [2] :

$$T_c = 0.037536 \times T_a^{1.5} + 0.32 + 0.32 \times T_a \quad (27)$$

T_c : température du ciel.

T_a : température de l'ambiance.

De son côté, URSULA EIKER a défini la température du ciel en fonction de la température du point de rosée :

$$T_c = T_a \times \left(0.8 + \frac{T_r - 273}{250} \right)^{0.25} \quad (28)$$

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel (ou entre l'isolant et le sol) est donné par les relations suivantes :

$$h_{rvc} = \sigma \times \varepsilon_v (T_{ve} \times T_c) \times (T_{ve}^2 \times T_c^2) \quad (29)$$

$$h_{ric} = \sigma \times \varepsilon_i \times (T_{ie}^2 + T_c^2) \times (T_{ie} + T_c) \quad (30)$$

T_v : Température de la face extérieure de la vitre.

ε_v : Émissivité de la vitre.

h_{rvc} : Coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel.

ε_i : Émissivité de l'isolant.

T_i : Température de la face extérieure de l'isolant.

h_{ric} : Coefficient de transfert thermique par rayonnement entre l'isolant et le ciel.

II.3. Pertes thermiques dans un capteur solaire :

Les pertes de chaleur dans un capteur solaire résultent principalement de trois mécanismes de transfert thermique :

- **Convection** : ce type de transfert thermique se manifeste généralement entre le vitrage du capteur et l'environnement extérieur, entre l'absorbeur et la couche d'air, ainsi qu'entre cette dernière et le vitrage.
- **Conduction** : elles se produisent lorsque la distance entre les éléments du capteur est réduite, comme entre l'absorbeur et la vitre, ou en cas de mauvaise isolation des côtés et de l'arrière, ce qui provoque une fuite de chaleur.
- **Rayonnement** : les couvertures du capteur solaire réduisent les pertes de chaleur par rayonnement en laissant passer le rayonnement solaire tout en bloquant l'infrarouge réémis.

Cela diminue les pertes de moitié, et l'ajout de plusieurs couches permet de les réduire davantage.

II.4. Modélisation :

Dans cette étude, nous avons opté pour l'approche dite globale, cette approche repose sur l'hypothèse d'un fonctionnement en régime quasi-stationnaire, ou chaque composant du capteur solaire est considéré comme étant à une température moyenne constante, ce qui permet d'ignorer les effets liés à l'inertie thermique [32].

II.5. Hypothèses :

La modélisation d'un capteur solaire plan à air prend en compte plusieurs facteurs liés au mode de circulation du fluide, tels que l'interaction avec l'absorbeur, le nombre de vitrages, la présence d'une plaque métallique inférieure associée à l'isolation, ainsi que les matériaux employés pour la construction du capteur solaire, entre autres [33].

Avant d'élaborer les modèles mathématiques, certaines hypothèses sont formulées afin de simplifier le cadre théorique :

- Le régime thermique est de type instationnaire.
- On suppose que l'absorbeur et les couches transparentes sont chacun maintenus à une température homogène.
- Les pertes thermiques sont principalement dues à la face vitrée supérieure.
- L'écoulement de l'air dans le conduit dynamique se fait de manière unidirectionnelle avec une vitesse moyenne constante (U).
- La perte thermique due au vent est considérée comme constante.
- Les propriétés physiques de l'air ainsi que des matériaux sont supposées constantes.
- On néglige l'impact de la poussière et de la saleté sur la surface du capteur.

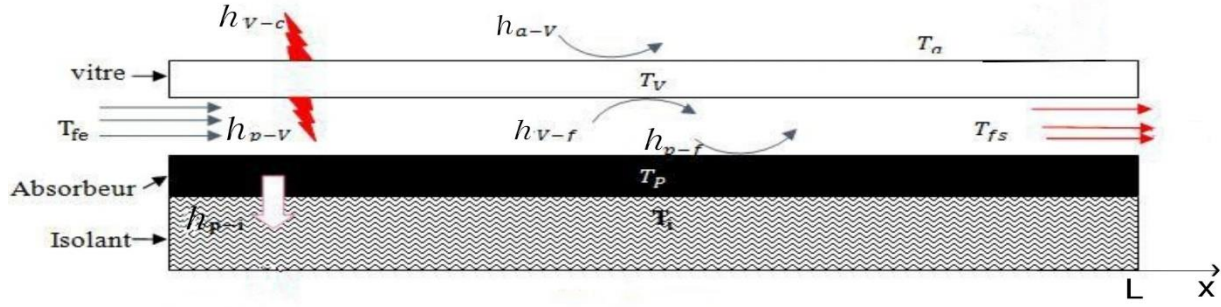


Figure 29: Schéma du générateur d'air chaud [34]

II.6. Bilan thermique du capteur solaire :

Supposons de plus que le système combine verre- vitre à une température uniforme. Les équations de bilan thermique des divers composants du capteur s'écrivent, par unité de surface A du capteur :

- Pour le système combine vitre :

$$m_v C p_v \frac{\partial T_v}{\partial t} = \alpha_v I + h_{rpv}(T_p - T_v) + h_{cvf}(T_f - T_v) - (h_{cva} + h_{rva})(T_v - T_a) \quad (31)$$

- Pour la plaque absorbante :

$$m_p C p_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = (\tau \alpha) I - h_{cpf}(T_p - T_f) - h_{rpv}(T_p - T_f) - U_b(T_p - T_a) \quad (32)$$

- Pour le fluide caloporteur :

$$\rho_f e_f C p_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \frac{\dot{m}_f C p}{l} \frac{\partial T_f}{\partial t} = h_{cpf}(T_p - T_f) - h_{cvf}(T_f - T_v) \quad (33)$$

Dans la vitre, les variations dans le temps de l'enthalpie des composants du capteur sont faibles, c'est à-dire que les termes en $m C p \frac{dT}{dt}$ peuvent être négligés.

Nous pouvons donc raisonnablement faire l'hypothèse d'un fonctionnement quasi stationnaire du capteur. Cette hypothèse a pour conséquence de simplifier les équations sans toutefois masquer l'évolution temporelle des phénomènes qui restent liés au flux solaire I variable dans le temps. De plus nous négligerons l'absorptivité α_v du système combine plastique-vitre. En éliminant T_p et T_v des équations simplifiées ainsi obtenues, il vient :

$$\dot{m}_f C p_f \frac{dT_f}{dx} = \ell F' [(\tau \alpha) I - U_L (T_f - T_a)] \quad (34)$$

Avec :

$$F' = \frac{h_{rpv}h_{cvf}+h_{cpf}(h_{rva}+h_{cva}+h_{cpf}h_{rpv}+h_{cvf}h_{cpf})}{(h_{rva}+h_{cva}+h_{rpv}+h_{cvf})(U_b+h_{cpf}+h_{rpv})-h_{rpv}^2} \quad (35)$$

Et :

$$U_L = \frac{(U_b+h_{rva}+h_{cva})(h_{cvf}h_{cpf}+h_{cvf}h_{rpv}+h_{cpf}h_{rpv})}{h_{cvf}h_{rpv}+h_{cpf}(h_{rva}+h_{cva})+h_{cpf}h_{rpv}+h_{cvf}h_{cpf}} + \frac{U_b(h_{rva}+h_{cva})(h_{cvf}+h_{cpf})}{h_{cvf}h_{rpv}+h_{cpf}(h_{cva}+h_{rva})+h_{cpf}h_{rpv}+h_{cvf}h_{cpf}} \quad (36)$$

F' est un nombre sans dimension que caractérise l'efficacité thermique du capteur, tandis que U_L représente le coefficient global de pertes thermiques du capteur et s'exprime en $W.m^{-2}.K^{-1}$.

L'équation différentielle de premier ordre (50) est soumise à la condition aux limites :

$$T_f(x = 0) = T_{fe} \quad (37)$$

En supposant que F' et U_L ne dépendent pas de la position x , la solution de l'équation

$$(50) \text{ est : } \frac{T_f(x,t)-T_a-(\tau\alpha)I/U_L}{T_{fe}-T_a-(\tau\alpha)I/U_L} = \exp \left[-\frac{\ell x F' U_L}{\dot{m}_f C p_f} \right] \quad (38)$$

Soit L la longueur du capteur dans le sens de l'écoulement. En remplaçant x par L dans (38) et tenant compte de ce que ℓL n'est rien d'autre la surface A du capteur, on obtient la température T_{fs} de sortie de l'air chaud à partir de l'expression :

$$\frac{T_{fs}-T_a-(\tau\alpha)I/U_L}{T_{fe}-T_a-(\tau\alpha)I/U_L} = \exp \left[-\frac{F' U_L}{G C p_f} \right] \quad (39)$$

Avec

$$G = \frac{\dot{m}_f}{A} \quad (40)$$

La puissance thermique utile $\dot{Q}_u$ extraite du capteur est donnée par :

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_f C p_f (T_{fs} - T_{fe}) \quad (41)$$

Quand cette expression est intégrée sur toute la journée depuis l'instant t_1 de lever jusqu'à l'instant t_c de coucher du soleil, on obtient l'énergie utile E_u fournie par le capteur :

$$E_u = \int_{t_1}^{t_c} \dot{m}_f C p_f (T_{fs} - T_{fe}) dt \quad (42)$$

Le rendement thermique journalier η du capteur est alors donné par la relation :

$$\eta = \frac{E_u}{A \int_{t_1}^{t_2} I dt} \quad (43)$$

II.7. Calculs particuliers :

Coefficient de transfert convectif h_{cva} entre le système de couvertures et l'air ambiant est déterminé à partir de la relation :

$$h_{cva} = \frac{N_u K_a}{L_v} \quad (44)$$

Dans laquelle N_u est le nombre de Nusselt établi par avec Sparrow [35] pour des surfaces planes rectangulaires :

$$N_u = 0.84 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (45)$$

Valable pour des nombres de Reynolds Re tels que :

$$1,5 \cdot 10^4 < Re < 8,7 \cdot 10^4$$

Avec :

$$Re = \frac{V_a L_v}{\nu_a} \quad (46)$$

$$L_v = \frac{2\ell L}{\ell + L} \quad (47)$$

La vitesse V_a , du vent est prise égale à 6 m.s^{-1} dans tous nos calculs ; c'est une valeur moyenne observée sur le site de **Tombouctou** ($16^\circ 46' \text{ N}$; $3^\circ 00' \text{ W}$; altitude 265 m). D'après **Kouyaté et sagna** [36], la corrélation reste valable pour des nombres de Reynolds atteignant $(1,1 \cdot 10^6)$.

Le coefficient de transfert radiatif h_{cva} entre le système de couvertures et la voûte céleste est donné par :

$$h_{rva} = \frac{\epsilon_v (T_v^4 - T_{ci}^4)}{T_v - T_a} \quad (48)$$

La température du ciel T_{ci} étant calculée à partir de la corrélation de Clark [37], déjà utilisée avec succès en zone tropicale aride par d'autres auteurs [38, 39].

$$T_{ci} = T_a [0.775 + 0.0029(T_d - 273)]^{0.26} \quad (49)$$

Dans cette relation T_d est la température du point de rosée de l'air ambiant reliée à sa tension de vapeur d'eau e_{mb} (en mbar) par la relation :

$$e_{mb} = \frac{1010,10}{760} \exp \left(20,430 - \frac{5170}{T_d} \right) \quad (50)$$

Les coefficients de transfert convectif h_{cvf} et h_{cpt} entre le fluide chaud et les parois de la conduite d'air sont calculés à partir de la relation :

$$h_{cpf} = h_{cvf} = \frac{N_u K_f}{D_h} \quad (51)$$

Dans laquelle le nombre de Nusselt N_u est donné :

- En régime laminaire ($Re < 2100$), par la corrélation de **Mercer** [40] :

$$N_u = 4,85 + \frac{0,0060 (Re Pr D_h / L)^{1,2}}{1 + 0,0040 \left(Re Pr \frac{D_h}{L} \right)^{\frac{2}{3}} Pr^{0,16}} \quad (52)$$

- En régime turbulent ($Re > 2100$), par la corrélation de Kays, dont l'expression de Kays, dont l'expression mathématique a été déterminée par **Koyaté et Sagna** [36]

$$N_u = 0.0270 Re^{0.81} \quad (53)$$

$$Re = \frac{\dot{m}_f D_h}{\ell e_f \mu_f} \quad (54)$$

$$D_h = \frac{2 \ell e_f}{\ell + e_f} \quad (55)$$

La valeur du coefficient de pertes thermiques vers le bas U_b est fixée à $1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ dans nos programmes de calcul, ce qui correspond à 5 cm d'épaisseur de laine de verre.

Enfin le coefficient de transfert radiatif h_{rpv} entre la plaque absorbante et le système combine de couvertures est donné par la relation :

$$h_{rpv} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_v^2) (T_p + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (56)$$

II.8. Rendement du capteur :

La méthode des tracés optiques [41] permet, en comptabilisant les réflexions multiples entre l'absorbeur et le vitrage, de déterminer le rendement optique $\tau\alpha$ du capteur. On obtient

$$\tau\alpha = \frac{\tau_v \alpha_p}{1 - (1 - \alpha_p) \rho_v} \quad (57)$$

Relation dans laquelle les coefficients de transmission T_v et de réflexion ρ_v du système combine verre-vitre sont donnés par :

$$T_v = \frac{T_1 T_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad (58)$$

$$\rho_v = \rho_1 + \frac{\rho_2 T_1^2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad (59)$$

- L'indice 1 et 2 se rapportant respectivement au verre (première couche de verre) et à la vitre.
- L'absorptivité α_v du système de couvertures s'obtient en effectuant l'opération :

$$\alpha_v = 1 - \rho_v - T_v \quad (60)$$

En raison de la faible valeur du coefficient d'absorption de l'air α_v (~ 0.1), le terme $\alpha_v I$ est souvent négligé, notamment face au terme $h_{rpv}(T_p - T_v)$ dans le flux radiatif net reçu par le système de couvertures.

Pour une prise en compte plus rigoureuse de ce terme, on peut se référer à l'article de jonnot et coulibaly [39]. Cependant, cet article ne quantifie pas les performances thermiques des capteurs à air, et l'influence du terme $\alpha_v I$ n'y est pas clairement précisée.

Conclusion :

À l'issue de ce chapitre, nous avons abordé les aspects essentiels liés à la conception, la modélisation et la simulation thermique du capteur solaire à air. Une approche détaillée a été adoptée, prenant en compte les différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

Un modèle thermique basé sur les équations différentielles du bilan énergétique a été développé afin d'étudier les performances instantanées et saisonnières du système. La phase de conception, appuyée par des outils avancés comme SolidWorks, a permis de définir avec précision les dimensions et les matériaux, assurant ainsi un équilibre entre rendement thermique et coût. Cette étape théorique constitue une base indispensable avant de passer à la phase de réalisation pratique et de validation expérimentale, présentée dans le chapitre suivant.

chapitre III

Résultat et interprétation



Introduction :

Dans cette section, les résultats issus de la modélisation et de la simulation sont présentés et analysés. L'objectif est de comprendre le comportement thermique et énergétique du capteur solaire étudié, en tenant compte des variations temporelles des grandeurs physiques telles que la température, le flux solaire incident et la production thermique.

Les calculs et simulations ont été réalisés à l'aide du logiciel FORTRAN, reconnu pour sa précision et sa rapidité dans le traitement des équations différentielles associées aux modèles thermiques.

Les résultats sont présentés sous forme de courbes et de graphiques représentatifs, permettant d'évaluer l'influence de différents paramètres internes (matériaux, dimensions, isolation) et externes (conditions climatiques, orientation, inclinaison) sur les performances du système. Une attention particulière est portée à la comparaison entre le fonctionnement avec et sans préchauffage, afin d'évaluer son impact sur le rendement global du capteur solaire.

III.1. Le programme :

FORTRAN est un langage de programmation ancien et de haut niveau, spécialement conçu pour les calculs scientifiques et l'ingénierie. Son nom signifie « **FOR**mula **TRAN**slation » (traduction de formules). Il s'agit de l'un des premiers langages permettant de transformer facilement des équations mathématiques en programmes informatiques. Il est encore utilisé aujourd'hui dans des domaines nécessitant de hautes performances, tels que la simulation numérique, l'analyse technique et la recherche scientifique.

III.1.1. Les étapes du programme :

- **Première étape : déclaration des variables**

A cette étape, on définit toutes les variables et constantes qui seront utilisées dans le programme telles que : $T, T_{amb}, I, t, t_f, m, C_p, A, h, \sigma, \varepsilon$.

- **Deuxième étape : entrée des données et calcul des constants**

_Saisit les données initiales (propriétés des matériaux, dimensions, constantes thermiques.

_Calcule les valeurs constantes : A, v, m, Q .

- **Troisième étape : utilisation de la méthode de global**

On choisit un temps ΔT , puis on :

_Applique les équations d'énergie (bilan thermique)

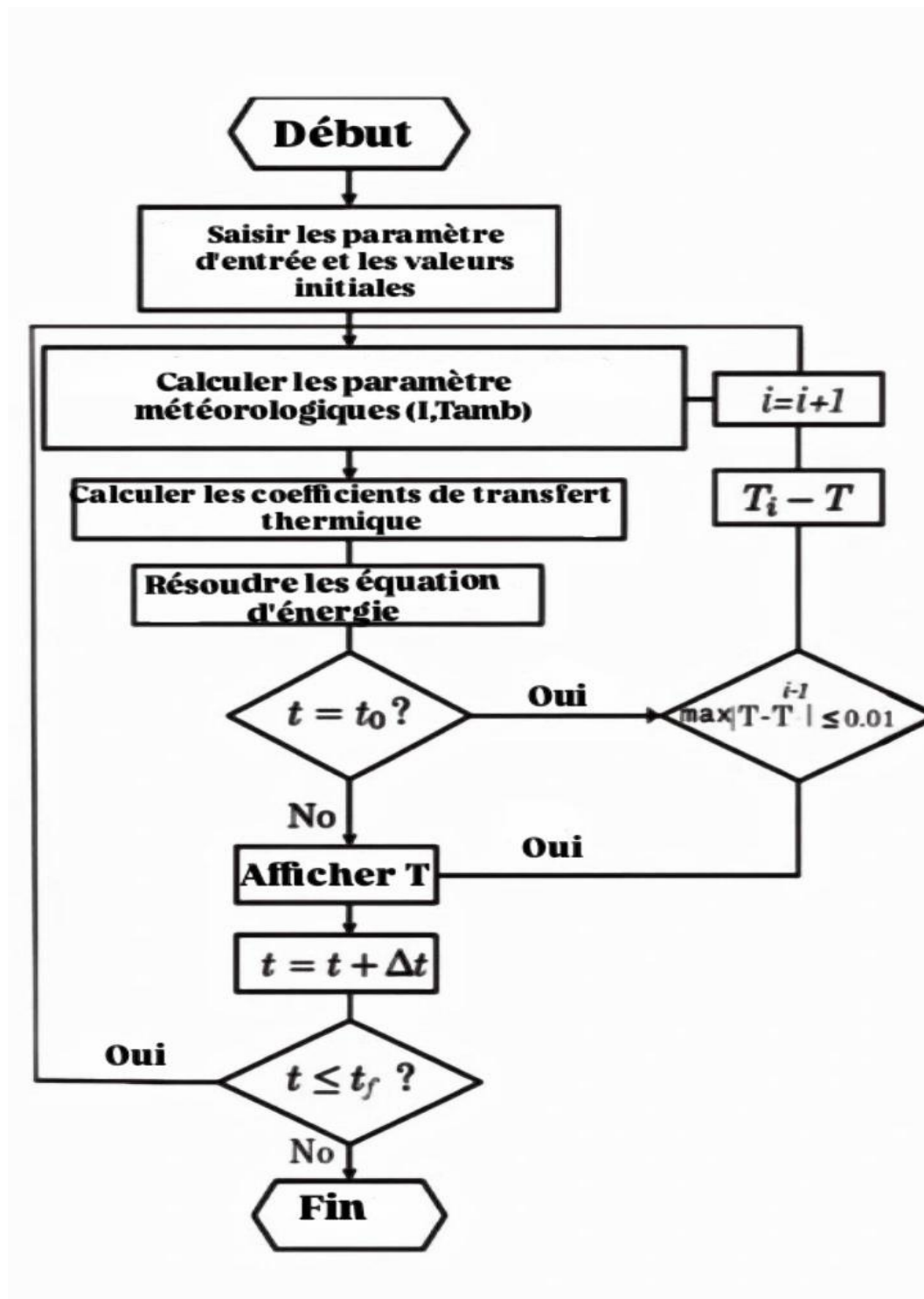
_Calcule les gains ou pertes d'énergie à chaque pas de temps

_Met à jour les températures

- **Quatrième étape : Calcul thermique complet**

Calcul de la température ambiante, de la température du ciel, de l'angle horaire, du flux solaire, des propriétés thermo physiques du fluide caloporteur, des coefficients thermiques échangés par convection et par rayonnement (faire cette étape pour chaque coefficient de la méthode de global).

III.1.2. L'organigramme du capteur solaire :



III.2. Résultats et discussions :

Dans cette étude, une attention particulière a été accordée à la variation temporelle des températures des différentes parties du capteur solaire, ainsi qu'à l'effet des paramètres internes et externes sur le fonctionnement du capteur solaire.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte les considérations suivantes :

- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial t_0 qui représente le lever du soleil pour chaque composant du capteur solaire, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une minute.
- Nous avons choisi quatre jours dans l'année, chacun correspondant à une saison, dans le but d'étudier l'influence des conditions climatiques saisonnières sur la performance du système.
- L'étude est effectuée sur un capteur solaire plan d'une surface de bac $A = 2 \text{ m}^2$, un vitrage d'épaisseur de 3 mm et d'un isolant d'épaisseur 5 cm. Le capteur solaire plan est incliné de 30° à 70° à par rapport à l'horizontale et orienté vers le sud.
- Les résultats ont été reproduits à l'aide d'un graphe grâce au logiciel Origin.

III.2.1. Le comportement thermique du capteur

L'analyse des courbes présentées dans la figure (III.1) montre que l'évolution temporelle des températures des différentes composantes du capteur – à savoir l'absorbeur, la vitre, l'air de séchage, ainsi que l'air ambiant – au cours de quatre journées représentatives des saisons de l'année, suit une tendance en cloche. Les températures maximales sont généralement atteintes vers 13h, avec un pic remarquable observé le 20 Juillet.

Par ailleurs, après le coucher du soleil, on constate que les courbes de température pour chaque journée tendent à se superposer, ce qui indique que les températures de l'absorbeur, de la vitre et de l'air de séchage se rapprochent de celle de l'air ambiant. Ce phénomène traduit l'établissement d'un équilibre thermique entre les éléments du capteur et leur environnement.

Les températures maximales de l'air à la sortie du capteur, consignées dans le Tableau 4, révèlent des valeurs nettement supérieures à celles de l'air ambiant pendant les journées étudiées.

Ces résultats confirment que le capteur est capable de fournir une température de sortie suffisante, voire optimale, pour assurer le séchage efficace des produits agricoles.

Tableau 4 : Valeurs maximales de la température de l'air asséchant

	20 janvier	20 Avril	20 juillet	20 Octobre
Air chauffé	65	80	103	85
Ecart($T_{chf} - T_{amb}$)	52	48	53	55

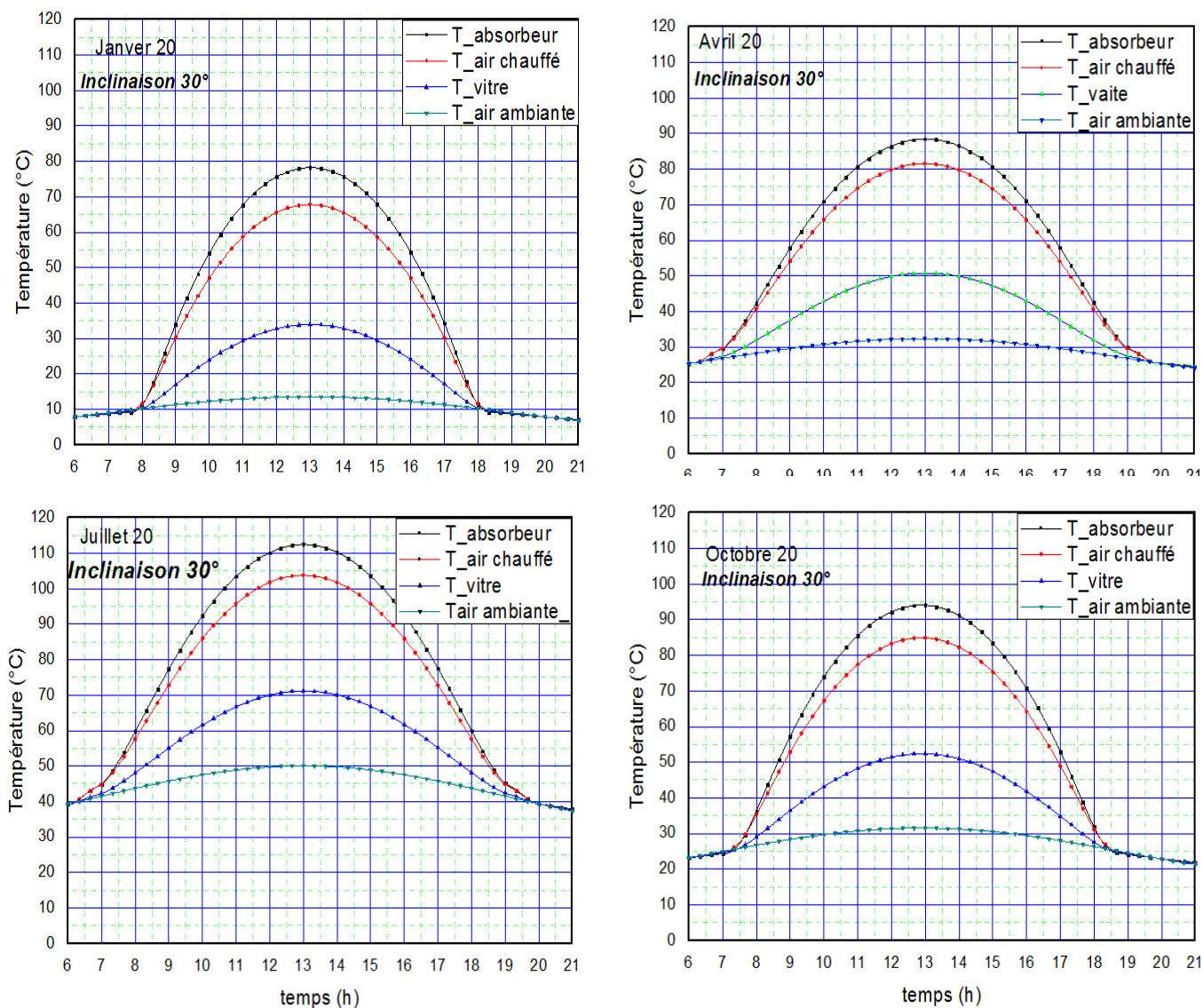


Figure 30: Variation temporelle de la température des différents composants du capteur, de l'air asséchant et de l'air au cours d'une année

III.2.2. Influence de l'inclinaison du capteur :

L'effet de l'inclinaison du capteur sur ses performances thermiques ainsi que sur l'intensité du rayonnement solaire global a été étudié durant les périodes hivernale et estivale.

L'analyse a été limitée à trois configurations : une position horizontale ($\beta = 0^\circ$), une position verticale, et une inclinaison égale à la latitude du site ($\beta = 30^\circ$). Une seconde configuration inclinée avec le même angle ($\beta = 70^\circ$) a également été considérée à des fins comparative.

III.2.2.1. Rayonnement solaire :

L'analyse des courbes de la figure 31 montre que, durant la saison hivernale, le rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale est minimal, tandis qu'il est plus élevé sur une surface inclinée.

En été, la situation s'inverse : le rayonnement est plus important sur une surface horizontale que sur une surface inclinée. Il diminue nettement, tant en intensité qu'en durée, sur un plan incliné à 70° .

Ce phénomène s'explique par la variation saisonnière de la déclinaison solaire, qui est négative en hiver et positive en été. Par conséquent, en hiver, les rayons du soleil arrivent presque perpendiculairement sur les surfaces inclinées, alors qu'ils sont très obliques sur les surfaces horizontales.

En été, en revanche, les rayons solaires deviennent presque perpendiculaires aux surfaces horizontales, en raison de la déclinaison positive du soleil.

Malgré ces variations saisonnières, une inclinaison correspondant à la latitude du site s'avère plus avantageuse, car elle permet une réception optimale du rayonnement solaire tout au long de l'année

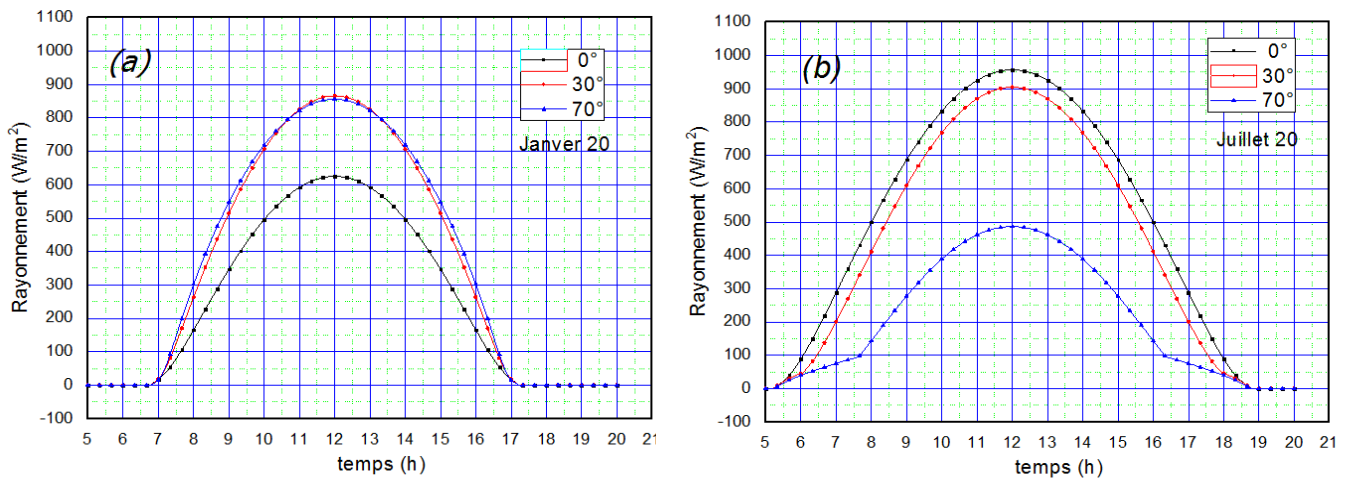


Figure 31: Variation temporelle du rayonnement solaire global reçu sur une surface à différentes inclinaisons pour deux journées choisies

III.2.2.2. Performances thermiques du capteur :

Les figures (32, A et B) ainsi que les Tableau (5, A et B) montrent qu'en hiver, les températures maximales des composants du capteur solaire sont enregistrées pour des inclinaisons de $\beta = 30^\circ$ et $\beta = 70^\circ$, comparativement à l'inclinaison horizontale ($\beta = 0^\circ$).

En été, les températures les plus élevées sont observées pour l'inclinaison horizontale ainsi que pour $\beta = 30^\circ$.

Ces résultats indiquent que l'angle d'inclinaison optimal du capteur solaire au cours de l'année correspond approximativement à la latitude du site ($\beta = 30^\circ$).

Cette conclusion est confirmée par les résultats précédents relatifs au rayonnement solaire.

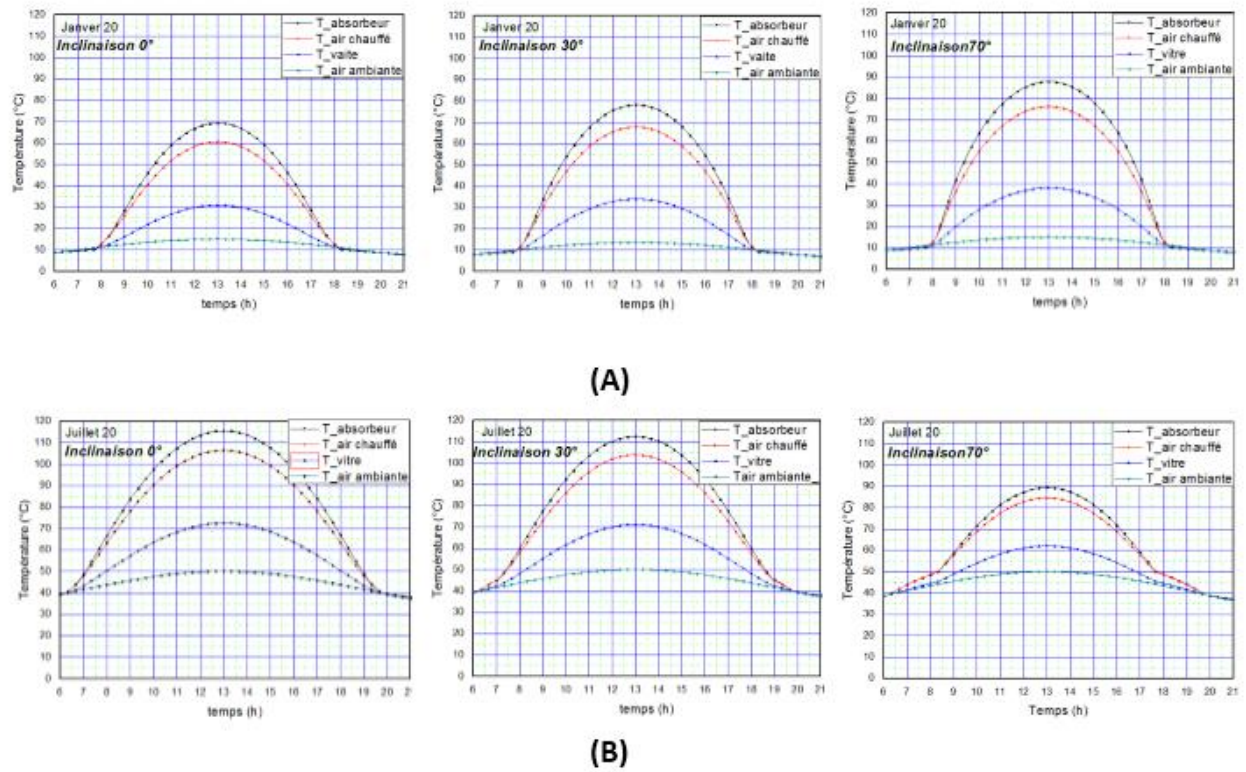


Figure 32: Variation temporelle de la température des différents composants du capteur à différentes inclinaisons pour deux journées choisies

Tableau 5 : Valeurs maximales de la température des différents composants du capteur à différentes inclinaisons pour deux journées choisies

(A)	20 janvier		
Inclinaison(β)	$\beta=0^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=70^\circ$
$T_{Absorbeur}(^\circ\text{C})$	70	78	88
$T_{Air chauffé}(^\circ\text{C})$	60	65	75
$T_{Vitre} (^\circ\text{C})$	30	35	38
$T_{Air ambiant}$	15	15	15

(B)	20 juillet		
Inclinaison(β)	$\beta=0^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=70^\circ$
$T_{Absorbeur}(^\circ\text{C})$	115	113	80
$T_{Air chauffé}(^\circ\text{C})$	105	103	85
$T_{Vitre} (^\circ\text{C})$	70	70	60
$T_{Air ambiant}$	48	48	48

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons analysé les résultats expérimentaux issus de la modélisation du capteur solaire à air à l'aide du logiciel FORTRAN. Les données obtenues ont montré la capacité du système à produire des températures adaptées au séchage, avec une influence marquée de plusieurs facteurs tels que l'angle d'inclinaison, les variations saisonnières et la vitesse de l'air. L'étude a également souligné l'importance de choisir un angle d'inclinaison proche de la latitude du site afin d'optimiser le rendement annuel. Les expériences ont confirmé que le design adopté offre de bonnes performances thermiques, malgré sa simplicité et son faible coût, ce qui en fait une solution pratique et économique pour le séchage solaire dans les zones rurales. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour l'amélioration de ce type de systèmes, notamment par l'intégration de technologies de stockage thermique ou de régulation automatisée.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Au terme de ce travail, nous avons pu étudier, concevoir et réaliser un capteur solaire fonctionnant à l'aide d'une énergie propre et renouvelable, destiné principalement au séchage des produits agroalimentaires de manière économique et efficace. À travers l'analyse théorique et la modélisation thermique basée sur les équations de bilan énergétique, un modèle numérique a été développé et programmé en langage Fortran, nous permettant de simuler les performances thermiques du système et d'évaluer l'influence de différents paramètres tels que l'angle d'inclinaison, sur les performance thermique du prototype.

L'étude a démontré que l'angle d'inclinaison influence considérablement les performances : en hiver, celles-ci s'améliorent avec l'augmentation de l'angle, alors que l'effet inverse est observé en été. Une inclinaison de 30° s'est révélée optimale pour une utilisation tout au long de l'année, permettant d'atteindre des écarts de température air entrée/sortie remarquables : 52°C le 20 janvier, 48°C le 20 avril, 53°C le 20 juillet et 55°C le 20 octobre. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité du capteur dans diverses conditions climatiques.

Les résultats obtenus à partir des simulations ont montré la capacité du capteur solaire à atteindre des températures appropriées pour le séchage des produits agricoles, tout en réduisant les pertes thermique grâce à l'utilisation de matériaux isolants efficaces et à un design optimisé.

Modèle s'est également montré capable de s'adapter aux variations climatiques journalières, ce qui en fait une solution idéale pour les zones rurales dépourvues de sources d'énergie conventionnelles.

Sur le plan théorique, un code informatique a été développé pour résoudre les équations énergétiques et prédire les performances thermiques du système. Les températures des différents composants (plaque absorbante, vitre et air chauffé) ont été analysées au fil des saisons. L'étude a démontré que l'angle d'inclinaison influence considérablement les performances : en hiver, celles-ci s'améliorent avec l'augmentation de l'angle, alors que l'effet inverse est observé en été. Une inclinaison de 30° s'est révélée optimale pour une utilisation tout au long de l'année, permettant d'atteindre des écarts de température air entrée/sortie remarquables : 54°C le 20 janvier, 50°C le 20 avril, 56°C le 20 juillet et 53°C le 20 octobre. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité du capteur dans diverses conditions climatiques.

Ce projet ouvre de larges perspectives dans le domaine des énergies renouvelables et de leurs applications dans le développement agricole durable, et prépare la voie à la mise au point de systèmes encore plus performants, fiables et autonomes, à travers l'amélioration du design, l'intégration de systèmes de stockage thermique ou l'automatisation du contrôle du flux d'air.

Références

Bibliographique

Références bibliographie

- [1] **U, Eiker.** Solar technologies for buildings, John Wileysans Sons, England. (2001). Les Centrales Solaires à Concentration « Université de Liège Faculté des sciences appliquées Mai 2007 Quoilin Sylvain Ingénieur Civil Electromécanicien/Energéticien ».
- [2] **J, Bernard.** Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [3] **C, Fröhlich.** 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and méthode of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [4] **A. Labed, N. Moumami, K. Aoués, M. Zellouf, A. Moumami.** Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561. (2009).
- [5] **A. Guedira, A. Benallou,** Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement naturel au Maroc, Revue des Energies Renouvelables, journées de thermique, p 79-84. (2001).
- [6] **Perlin, J.** (2005). L'histoire de l'énergie solaire. Terre Vivante.
- [7] Mémoire étude technico-économique et environnementale de capteur solaire hybride photovoltaïque thermique.
- [8] **M. DAGUENET,** « Les séchoirs solaires : théorie et pratique », 1985. Méthode de séchage.
- [9] **Gicquel, R. (2001).** *Énergie solaire : Conversion, stockage et applications.* Éditions Eyrolles.
- [10] **A, Sfeir, G, Guarracino.** Ingénierie des systèmes solaires, Technique et documentation, Paris. (1981).
- [11] **A, H, Khedim.** Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [12] **Benkhelifa, M.** (2020). Étude et simulation thermique d'un capteur solaire à air (Mémoire de Master). Université Ibn Khaldoun Tiaret

[13] **ARBIA Aissa et CHAOUBI Ouafa**, mémoire master académique « Contribution à la simulation des transferts thermiques dans un capteur solaire plan pour application de séchage », université kasdi merbah Ouargla (2015).

[14] **LePanneauSolaire.net. (S.d.)**. *Les différents types de capteurs solaires*. Consulté le 27 mai 2025, à l'adresse : <https://www.lepanneausolaire.net/les-differents-types-capteurs.php>

[15] **Menasria F.**, (2009), « Modélisation des capteurs solaires plans à air destinés au séchage (convection forcée) », mémoire de magister, université Ibn khaldoun tiaret,

[16] **Mohamed ALIA**. « Modélisation des capteurs solaires plans à air destinés au séchage (convection forcée) », mémoire de magister, université Ibn Khaldoun tiaret, 2005.

[17] **N, Bellel**. Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur ; thèse de magistère, Université de Constantine, (1989).

[18] **Ekechukwu, O.V. and B. Norton**, Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management, 1999.

[19] **Kalogirou, S.A.** Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 2004.

[20] **Sandali, M. et al**, A simulation study of a solar collector using phase change materials for air heating application needs, AIP Conference Proceedings, 2017.

[21] **Benhamza, A. and B. Settou**, SIMULATION NUMERIQUE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN UTILISANT DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE, in Département de Génie Mécanique. 2016, Université Kasdi merbah Ouargla.

[22] **Hadibi, T. et al**, 3E analysis and mathematical modelling of garlic drying process in a hybrid solarelectric dryer. Renewable Energy, 2021.

[23] **Aissaoui, F.** Contribution à l'étude du transfert de chaleur d'un capteur solaire placé dans un climat aride-cas de la région de Biskra. Université Mohamed Khider de Biskra, Département de Génie M.

[24] **SANDALI Messaoud** « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux ». Mémoire de Magister en génie mécanique, université Abou baker belkaid telemesen Algérie, 2014.

- [25] **SEBAGH khadidja et CHERFAOUI Imane.** (2017) Etude du séchage des produits agricoles dans un séchoir solaire-cas de poivron rouge, USTHB.
- [26] **F, Ahmed Taha.** Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans.
- [27] **W. H. Macadams,** « Heat transmission », 3^{ème} Ed., McGraw-Hill, New York (1954).
- [28] **J, A, Duffie, W, A, Beckman.** L'énergies solaires des processus thermiques, John Wiley et sons, New York. (1980).
- [29] **N, Bellel.** Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux Géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).
- [30] **A, Guedira ; A, Benallou.** Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement naturel au Maroc, Revue des Energies Renouvelables, journées de thermique (2001).
- [31] **Tahir SEDDIK.** Etude numérique d'un capteur solaire plan à air à double passe.
- [32] les séchoirs solaires : théorie et pratique, Michel Dague net.
- [33] **L. TANET.** Etude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire. Thèse de doctorat universités Mentouri de constantine(2016).
- [34] **Source adaptée. (2025, 27 mai).** Schéma du générateur d'air chaud, adapté d'une source internet et modifié par l'auteure.
- [35] **Sparrow E.M., Ramsey J.W., Mass E.A.,** Effect of finite width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate, J. Heat Trans.-T. ASME 101 (1979) 199-204.
- [36] **sagna, A., Koyaté, M** (2004). Etude thermique d'un capteur solaire à air à simple vitrage [Mémoire de fin d'études, Ecole supérieure polytechnique de Dakar, université chikh Anta Diop]
- [37] **Clark C.,** Passive/hybrid comfort cooling by thermal radiation, in: Passive/Hybrid Cooling Conference, Miami, 1981.
- [38] **Njomo D.,** Modelling the heat exchanges in a solar air heater with a cover partially transparent to infrared radiation, En. Convers. Mgmt. 31(5) (1991) 495-503.

[39] Gannot Y., Coulibaly Y., Radiative heat transfer in a solar air heater covered with a plastic film, Solar Energy 60 (1) (1997) 35-40.

[40] Mercer W.E., Pearce W.M., Hitchcock J.E., Laminar forced convection in the entrance region between parallel flat plates, J. Heat Trans.-T. ASME 89 (1967) 251-257.

[41] Siegel R., Howell J.R., Thermal radiation heat transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1981.

Annex

