

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : DES SCIENCES

DEPARTEMENT : PHYSIQUE

N° : .....



DOMAINE : SCIENCE DE LA MATIERE

FILIERE : PHYSIQUE

OPTION : ENERGIE SOLAIRE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par : BOUSSAG Aicha

Intitulé

**Etude expérimentale de l'effet de l'isolant sur le  
fonctionnement du capteur thermique**

Soutenu le 23/05 /2017 devant le jury composé de:

BOURAS Abdelkarim	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Président
TALOUB Djedid	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Rapporteur
HADDAD Zakaria	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016/2017



## Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Je remercie le docteur TALOUB Djedid d'avoir accepté d'être mon encadreur de mémoire, ses conseils et son soutien ont été pour moi un vrai support scientifique et personnel.

J'adresse mes remerciements à monsieur le président de jury et messieurs les membres de jury d'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury de ce mémoire.

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre Promoteur «Dr. Salmi. M ».

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à tous les professeurs de l'énergétique, pour ses encouragements, et les conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet.

Tous mes remerciements et mon estime a tous les professeurs et enseignants du département de physique.

Sans omettre bien sur de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

M<sup>elle</sup> BOUSSAG AICHA



---

## Dédécace

Avec l'aide de dieu tout puissant, j'ai pu achever ce modeste travail.

Je dédie ce travail à:

Mes très chers parents, pour leur soutien et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

A mes frères et ma chère soeur.

A toute les familles Boussag.

A mes très chers amies : Siham, Cillia, Souhila, Khadidja , Hadjer, Maroua, et Missipssa.

A toute la promotion physiqu énergétique sans exception.

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

## Résumé

En raison des préoccupations environnementales croissantes, un fort accent est mis sur les sources d'énergies renouvelables.

Les capteurs solaires thermiques permettent aux utilisateurs de générer de l'eau chaude de façon économique (ou pas cher) et de réduire la quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage domestique. Etant donné que l'utilisation des capteurs solaire thermique augmente, les producteurs sont confrontés à une demande constante d'amélioration de la qualité, de la performance, de la productivité et des prix compétitifs. Et c'est là que l'isolation joue un rôle important.

L'isolant est nécessaire dans les capteurs solaires thermiques pour emprisonner et concentrer l'énergie du soleil. En évitant les pertes thermiques au dos et sur les côtés du capteur, l'isolation va permettre d'optimiser son efficacité et de recueillir le maximum de chaleur qui sera ensuite transférée au fluide caloporteur. Cependant plusieurs matériaux (isolants) ont été installés (utilisés) pour mesurer les données relatives à la performance thermique, nous avons traité l'effet de des isolants sur les performances thermiques de ce capteur, qui ont été analysées.

Mots clés: Energie solaire, Capteur plan, Transfert thermique, chauffe – eau solaire, performance.

## Abstract

Due to growing environmental concerns, there is a strong emphasis on renewable energy sources.

Solar thermal collectors allow users to generate hot water economically (or cheap) and reduce the amount of energy required for domestic heating. As the use of solar thermal collectors is increasing, producers are faced with a constant demand for improved quality, performance, productivity and competitive prices. And that's where insulation plays an important role.

Insulation is needed in thermal solar collectors to trap and concentrate the sun's energy. By avoiding thermal losses at the back and sides of the sensor, the insulation will optimize its efficiency and collect the maximum heat that will then be transferred to the heat transfer fluid. However, several materials (insulators) have been installed (used) to measure the data on thermal performance, we have treated the effect of insulation on the thermal performance of this collectors, which have been analyzed.

Keywords: Solar energy, flat collector, heat transfer, solar water heater, performance.

## ملخص :

نظرا لتزايد المخاوف البيئية، هناك تركيز قوي على مصادر الطاقة المتجددة.

لواقط الطاقة الشمسية الحرارية تسمح للمستخدمين بتوليد المياه الساخنة بطريقة اقتصادية (أو رخيصة) وتقلل من كمية الطاقة اللازمة لأغراض التدفئة المنزلية. منذ استخدام الطاقة الشمسية تزايد استعمال أجهزة اللاقط الحراري، يواجه المنتجين طلب مستمر لتحسين الجودة والأداء والإنتاجية وبأسعار تنافسية. وهنا يلعب العزل دورا هاما.

العزل ضروري في جمع الطاقة الشمسية الحرارية لحبس و تركيز طاقة الشمس. تجنب فقدان الحرارة في الظهر والجانبين من أجهزة الاستشعار، والعزل لتحسين الكفاءة ولجمع أقصى قدر من الحرارة التي يتم بعد ذلك نقلها إلى المبرد. لذلك تم تركيب العديد من المواد (العوازل المستخدمة) لقياس البيانات عن الأداء الحراري، كنا نعالج تأثير العزل على الأداء الحراري لهذا الاستشعار، والتي تم تحليلها.

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية، لاقط حراري، الأداء، تحويل حراري، تسخين المياه بالطاقة الشمسية.

## Table des Matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Table des Matières.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Nomenclature.....	ix
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Généralité sur les capteurs thermiques</b> .....	<b>5</b>
1.1. Utilisation directe de l'énergie solaire.....	5
1.2. Energie solaire thermique.....	5
1.3. Définition et principe d'un capteur solaire.....	6
1.4. Diversité des capteurs solaires et leur application dans la reconversion d'énergie.....	7
1.4.1. Capteurs solaires thermique à basse température .....	7
1.4.2. Capteurs solaires à haute température.....	7
1.5. Différents types des capteurs solaires thermiques.....	8
1.5.1. Capteurs solaires plans.....	8
1.5.1.1. Capteurs plans non vitrés.....	9
1.5.1.2. Capteurs plans vitrés.....	10
1.5.1.3. Capteurs à tubes sous vide.....	11
1.5.2. Capteurs à concentration.....	12
1.6. Définition des différentes caractéristiques des capteurs solaires.....	13
1.7. Conclusion.....	15
Référence bibliographique du chapitre 1.....	15
<b>Chapitre 2 Etude théorique du capteur solaire plan thermique</b> .....	<b>16</b>
2.1. Différent composants des systèmes solaires plans.....	16
2.2. Etude descriptive des capteurs solaires plans.....	16
2.2.1. Composants d'un capteur solaire plan.....	16
2.2.2. Absorbeur.....	17
2.2.3. Couche sélective de l'absorbeur.....	17
2.2.4. Couverture transparente (vitrage).....	18
2.2.5. Fluide caloporteur.....	18
2.2.6. Isolation thermique.....	18
2.2.7. Cadre.....	19
2.3. Principes de fonctionnement d'un capteur solaire.....	19
2.3.1. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires .....	20
2.4. Conclusion.....	21
Référence bibliographique du chapitre 2.....	21
<b>Chapitre 3 Bilan énergétique d'un capteur thermique plan</b> .....	<b>22</b>
3.1. Différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan.....	22
3.1.1. Paramètres externes.....	22
3.1.2. Paramètres internes.....	23
3.1.3 Performances d'un capteur solaire plan.....	23
3.2. Etat de l'art des capteurs plans à eau .....	24
3.2.1. Etude des capteurs solaires plans à eau.....	24

3.3. Rayonnement solaire.....	25
3.3.1. Rayonnement solaire hors atmosphère.....	25
3.3.2. Constante solaire.....	25
3.3.3. Rayonnement solaire au sol.....	26
3.4. Rayonnement solaire sur un plan donné (plan horizontal et plan incliné).....	26
3.4.1. Rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	26
3.4.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné.....	27
3.5. Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire.....	29
3.5.1. Conduction.....	29
3.5.2. Convection.....	30
3.5.3. Rayonnement.....	31
3.6. Différentes pertes thermiques dans un capteur solaire.....	31
3.6.1. Pertes par convection.....	32
3.6.2. Pertes par conduction.....	32
3.6.3. Pertes par rayonnement.....	33
3.7. Bilan énergétique du capteur.....	33
3.8. Définitions et calcul des performances de capteurs plans.....	34
3.8.1. Rendements.....	34
3.8.1.1. Rendement optique.....	34
3.8.1.2. Rendement Thermique (Ou Instantané).....	35
3.8.2. Puissances absorbées par un capteur solaire plan avec simple vitrage.....	35
3.8.2.1. La puissance absorbée par la vitre.....	35
3.8.2.2. Puissance absorbée par l'absorbeur.....	35
Référence bibliographique du chapitre 3.....	36
<b>Chapitre 4 Etat de l'art sur les isolants thermique d'un capteur solaire plan.....</b>	<b>37</b>
4.1. Isolation est-elle nécessaire.....	37
4.2. Critères hygrothermiques principaux.....	38
4.3. Qualités recherchées.....	41
4.4. Différents matériaux éligibles sont les suivants.....	42
4.4.1 isolants végétaux.....	42
4.4.2. Isolants végétaux.....	46
4.4.3. Isolants d'origine animale.....	47
4.4.4. Isolants minéraux.....	48
4.4.5. Isolants synthétiques.....	49
4.5. Conclusion.....	51
Référence bibliographique du chapitre 4.....	52
<b>Chapitre 5 Résultats et discussions.....</b>	<b>53</b>
5.1. Présentation du banc d'essais.....	54
5.1.1. Élément constitue du capteur plan.....	55
5.1.2. Description des essais expérimentaux fait sur le capteur plan thermique.....	56
5.2. Analyse théorique.....	57
5.3 . Conception et expérimentation.....	58
5.4. Résultats et discussions.....	59
5.4.1. Evolution des températures.....	60
5.4.1.1 Evolution de température de sortie $T_{fs}$ .....	60

---

5.4.1.2. Évolution de température de réservoir $T_{f \text{ réservoir}}$ .....	61
5.4.1.3. Evolution de l'écart de température de sortie et d'entrée .....	62
5.5. Evolution de la puissance utile $\varphi_u$ .....	63
5.6. Evolution de la puissance de perte $\varphi_p$ .....	64
5.7. Évolution de coefficient de perte U.....	65
5.8. Evolution de rendement .....	66
5.9. Influence de température de sortie sur le rendement du capteur.....	67
6. Conclusion .....	68
Référence bibliographique du chapitre 5.....	69
<b>Conclusion générale</b> .....	70

**Annexe****Résumé**

## Liste des figures

Fig. 1-1	Capteur solaire thermique de fixation .....	6
Fig. 1-2	Différents types des capteurs solaires thermique .....	8
Fig. 1-3	Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif .....	9
Fig. 1-4	Principe de fonctionnement de capteur solaire non vitré à revêtement sélectif	
Fig. 1-5	Capteurs solaires plans vitrés .....	10
Fig. 1-6	Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.....	11
Fig. 1-7	Capteurs à tube sous vitrage .....	12
Fig. 1-8	Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.....	12
Fig. 1-9	Concentrateur cylindro-parabolique .....	13
Fig. 2-1	Composants d'un capteur solaire plan .....	17
Fig. 2-2	Principe de fonctionnement du capteur solaire plan .....	20
Fig. 3-1	Formes géométriques des plaques absorbantes .....	24
Fig. 3-2	Rayonnement solaire au sol .....	26
Fig. 3-3	Schéma de transfert par conduction .....	30
Fig. 3-4	Différents échanges thermiques dans un capteur plan .....	32
Fig. 3-5	Bilan thermique du capteur .....	33
Fig. 4-1	Cellulose .....	42
Fig. 4-2	Laine de coton .....	43
Fig. 4-3	Chanvre .....	43
Fig. 4-4	Bois .....	44
Fig. 4-5	Laine de coco .....	45
Fig. 4-6	Lin .....	46
Fig. 4-7	Liège .....	47
Fig. 4-8	Laine de mouton .....	48
Fig. 4-9	Laine de verre .....	48
Fig. 4-10	Laine de roche .....	49
Fig. 4-11	Polystyrène .....	50
Fig. 4-12	Polyuréthane .....	51
Fig.4-13	terre de paille.....	51
Fig. 5-1	Schéma de l'installation du capteur plan .....	54
Fig. 5-2	Vue globale de l'installation .....	56
Fig. 5-3	Coupe d'un capteur solaire plan à eau .....	57
Fig. 5-4	Evolution de la température sortie fluide en fonction de temps pour les isolants testés .....	61
Fig. 5-5	Evolution de Température d'eau dans le réservoir en fonction de temps pour les différents isolants testés .....	62
Fig. 5-6	Evolution de l'écart de la température entrée sortie eau en fonction de temps pour Les différents isolants testés .....	63
Fig. 5-7	Evolution de la puissance utile en fonction de temps pour les différents isolants testés .....	64
Fig. 5-8	Evolution de la Puissance perdue en fonction de temps pour les différents isolants testés .....	65
Fig. 5-9	Evolution de Coefficient de perte global en fonction de temps pour les 4 isolants.	66
Fig. 5-10	Evolution de rendement en fonction de temps pour les 4 isolants .....	67
Fig. 5-11	Evolution du rendement de capteur en fonction de la température de sortie..	68

## Liste des tableaux

Tableau 1-1	Valeur du facteur k pour les différents capteurs solaires plans .....	A
Tableau 2-1	Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur Tableau .....	A
Tableau 2-2	Propriétés de quelques revêtements sélectifs .....	A
Tableau 2-3	Propriétés de différentes surfaces transparentes .....	A
Tableau 2-4	Propriétés thermiques de quelques matériaux isolant .....	A
Tableau 3-1	Répartition spectrale du rayonnement thermique .....	B
Tableau 3-2	Albédo pour différentes surfaces .....	B
Tableau 4-1	Avantages et inconvénients de chaque type d'isolant .....	C
Tableau 4-2	Propriétés et caractéristiques de polystyrène expansé .....	C
Tableau 4-3	Propriétés et caractéristiques de polystyrène Extrudent.....	C
Tableau 4-4	Représente plusieurs propriétés physiques et des caractéristiques Hygrothermiques pour certains isolants .....	C
Tableau 5-1	Paramètre caractéristiques du capteur solaire.....	56
Tableau 5-2	Caractéristiques des éléments du capteur à eau .....	58

## Nomenclature

### *Symboles latins*

$I_0$	Constante solaire	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$G$	Flux solaire incident	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$S$	Le rayonnement direct	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$S_H$	Rayonnement direct horizontal	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$S_H(i)$	Flux direct horizontal d'indice $i$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$S_B$	Flux direct pour un plan incliné	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$\varphi_G$	Rayonnement global	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$\varphi_{GH}$	Flux global horizontal.	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$D$	Le rayonnement diffus	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$R$	Rayonnement réfléchi	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$D_H$	Rayonnement diffus sur un plan horizontale	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$P_{ab}$	Puissance absorbée par l'absorbeur	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$P_v$	Puissance absorbée par la vitre.	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$Q_{sa}$	L'énergie absorbée par le capteur.	$[W]$
$Q_u$	L'énergie utile.	$[W]$
$P_u$	La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur	$[W]$
$Q_p$	L'énergie perdue.	$[W]$
$Q_{st}$	L'énergie stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur.	$[W]$
$q$	Densité de flux de chaleur émis par le corps	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$q_{icda}$	Quantité de chaleur échangée par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.	$[W]$
$T_{fs}$	Température de sortie du fluide.	$[^{\circ}C]$
$T_{fe}$	Température d'entrée du fluide.	$[^{\circ}C]$

$T$	température absolue du corps.	[°C]
$T_p$	Température de la paroi solide.	[°C]
$T_{ab}$	Température de l'absorbeur.	[°C]
$T_{ii}$	Température de la face intérieure de l'isolant.	[°C]
$T_{il}$	Température de l'isolant latéral.	[°C]
$T_f$	Température du fluide.	[°C]
$T_c$	Température du ciel.	[°C]
$C(j)$	La correction de la distance terre soleil.	[ ]
$h(i)$	Hauteur du soleil d'indice $i$ .	[m]
$T_L$	Facteur de trouble atmosphérique du lieu.	[ ]
$M(i)$	Nombre d'aire masse.	[Kg]
$K_T(i)$	Coefficient de sérénité.	[ ]
$L$	Latitude de lieu.	[ °]
$R_b$	Rapport de flux direct.	[ ]
$R$	Rapport du flux global.	[ ]
$W$	Angle horaire du soleil.	[ °]
$i$	Angle d'incidence du rayon direct par rapport au rayon incliné.	[ °]
$A_v$	Surface de la vitre.	[m <sup>2</sup> ]
$A_c$	Surface du capteur.	[m <sup>2</sup> ]
$A$	Surface d'échange.	[m <sup>2</sup> ]
$A_{ab}$	Surface de l'absorbeur.	[m <sup>2</sup> ]
$S$	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide.	[m <sup>2</sup> ]
$S_{abi}$	Surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.	[m <sup>2</sup> ]
$h$	Coefficient de convection.	[ $\frac{W}{m^2}$ ]
$k$	Coefficient de conductivité thermique.	[ $\frac{W}{m^2}$ ]
$k_{ab}$	Conductivité thermique de l'absorbeur.	[ $\frac{W}{m^2}$ ]
$k_{il}$	Conductivité thermique de l'isolant latéral.	[ $\frac{W}{m^2}$ ]
$k_i$	Conductivité thermique de l'isolant horizontal.	[ $\frac{W}{m^2}$ ]
$e_{ab}$	Épaisseur de l'absorbeur.	[ $\frac{W}{m^2}$ ]

$e_i$	Épaisseur de l'isolant horizontal.	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$e_{il}$	Épaisseur de l'isolant latéral.	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$q_m, \dot{m}$	Débit massique du fluide caloporteur.	$[kg\ s^{-1}]$
$R$	La résistance thermique.	$\left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}\right]$
$U_T$	Coefficient de déperdition du capteur.	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
$U$	Le coefficient de transmission surfacique.	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
$C_p$	Chaleur spécifique.	$[J/kg \cdot K.]$
$ef$	Effusivité thermique.	$[J/(m^2 \cdot K \cdot s)^{1/2}]$

### *Symboles grec*

$\beta$	Angle d'inclinaison.	$[^\circ]$
$\delta$	Déclinaison du soleil.	$[^\circ]$
$\zeta$	Albédo du sol.	$[ ]$
$\varepsilon$	Émissivité thermique du matériau.	$[ ]$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6 \cdot 10^{-8}$ .	$[W/m^2 \cdot K^4]$
$\tau_v$	Transmissivité de la vitre.	$[ ]$
$\alpha_v$	Absorptivité de la vitre.	$[ ]$
$\alpha_{ab}$	Absorptivité de l'absorbeur.	$[ ]$
$\alpha_p$	Facteur d'absorption du capteur.	$[ ]$
$n_i$	Rendement instantané du capteur.	$[ ]$
$(\lambda)$	Conductivité thermique.	$[W/m \cdot ^\circ C]$
$\mu$	Diffusivité thermique.	$[m^2/s]$

### *Indices et exposants*

$H$	Horizontal
$G$	Global
$ab$	Absorbeur
$sa$	Absorbé
$u$	Utile
$p$	Pert
$f_s$	Fluide sortie

---

$f_e$	Fluide entrie
$p$	Paroi
$ii$	Isolant Interne
$il$	Isolant latéral
$f$	Fluide
$c$	Ciel
$L$	Lieu
$i$	Instantané
$m$	Massique
$am$	Ambiant
$c$	Capture



---

## *Introduction générale*

---

Depuis la révolution industrielle du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de l'énergie d'origine fossile a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles énergies est devenue nécessaire pour subvenir aux besoins actuels de l'humanité.

En effet, le besoin en énergie à multiplier par 10 avec un accroissement à partir des années 40 du siècle dernier, ce qui a pour conséquence l'épuisement des ressources habituelles en matière d'énergie. Les énergies renouvelables notamment le gisement solaire (Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée) ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contrechoc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 après la signature du protocole de Kyoto qui prévoit une baisse de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre des pays riches sur la période de 2002-2012 par rapport à 1990. L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes. L'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde. Il est la plus simple et la plus directe il se trouve dans des plusieurs application thermiques de l'énergie solaire, telles que le dessalement, le séchage des produits agro-alimentaires et le chauffage des habitations ou de l'eau sanitaire.

Un des outils utilisés pour exploiter l'énergie solaire est le capteur solaire thermique, le capteur solaire joue un rôle de convertisseur du rayonnement solaire incident en chaleur.

Les capteurs solaires thermiques permettent aux utilisateurs de générer de l'eau chaude de façon économique (ou pas cher) et de réduire la quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage domestique. Etant donné que l'utilisation des capteurs solaire thermique augmente, les producteurs sont confrontés à une demande constante d'amélioration de la qualité, de la performance, de la productivité et des prix compétitifs. Et c'est là que l'isolation joue un rôle important.

L'isolant est nécessaire dans les capteurs solaires thermiques pour emprisonner et concentrer l'énergie du soleil. En évitant les pertes thermiques au dos et sur les côtés du capteur, l'isolation va permettre d'optimiser son efficacité et de recueillir le maximum de chaleur qui sera ensuite transférée au fluide caloporteur.

En général, le capteur solaire thermique est constitué d'un couvert transparent, absorbeur, d'une ou plusieurs vitres et isolant sur la partie non réceptrice. L'évacuation de la chaleur reçue par l'absorbeur se fait par utilisation de divers fluides caloporteurs. Il ya plusieurs types des capteurs utilisé : les capteurs à concentration, les capteurs sous vide, les capteurs non vitré, les capteurs vitré.

Les performances de l'installation à laquelle appartient ce convertisseur dépendent essentiellement du rendement de ce dernier. En pratique, ce rendement est fonction de l'énergie utile qu'on cherche toujours à augmenter :

- par augmentation de la chaleur reçue par l'absorbeur en augmentant la part du rayonnement absorbé (revêtement de l'absorbeur d'une teinture noire mate)
- par diminution des pertes par conduction de chaleur vers les zones non réceptrices conduction (nécessité d'une bonne isolation) perte par convection et vers l'avant du capteur (nécessité d'un doublage des vitre).

[2]

Pour réaliser un bon isolant en doit utiliser les isolants a ayant les qualités suivantes :

- ✓ une faible conductivité thermique.
- ✓ une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- ✓ la chaleur massique doit être basse.
- ✓ une grande résistance thermique
- ✓ Masse volumique
- ✓ Température maximale d'utilisation.
- ✓ Son coût.

On distingue trois types d'isolants : isolants minéraux, isolants d'origine végétale, isolants organiques. Généralement les matières isolantes utilisées elles doivent résister aux hautes températures qui peuvent être atteintes à l'intérieur d'un capteur.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation des différents isolants thermiques et on va faire une comparaison entre eux pour déterminer le bon isolant de but d'optimiser la performance des capteurs solaires plans et d'améliorer leurs rendements. Dans ce sens, plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude des capteurs solaires plans et ayant surtout pour but l'amélioration son rendement qui est la performance la plus significative. [1]

Le rendement du capteur varie avec la géométrie du capteur, l'ensoleillement, les conditions extérieures, et les matériaux isolants.

L'objectif de ce travail est l'amélioration des matériaux (isolants), c'est à dire la recherche de matériaux isolants qui permettent de capter le rayonnement avec un minimum de pertes thermiques, et on va voir l'effet de ces isolants sur le rendement du capteur solaire plan.

La présente mémoire se répartit en cinq chapitres. Le premier chapitre consiste à une généralité sur l'énergie solaire thermique et une description sur les capteurs thermiques plans. Puis dans le deuxième chapitre on présente une étude théorique du capteur plan thermique. Le troisième chapitre est consacré au bilan énergétique d'un capteur thermique Plan. Le quatrième chapitre contient une synthèse bibliographique sur les isolants thermique d'un capteur solaire plan.

Le dernier chapitre présente une étude expérimentale sur l'effet des isolantes thermiques sur le rendement d'un capteur thermique plan. Quelques matériaux (isolants) ont été utilisés pour avoir ces effets sur le rendement d'un capteur thermique plan. Les profils de la puissance utile, la puissance perdue, le rendement et le coefficient de perte sont représentés pour différentes isolants.

Nous terminerons cette mémoire par une conclusion générale sur les résultats obtenus au cours de cette étude et par l'énoncé des perspectives à venir.

---

## Référence

- [1] M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [2] R. Kharchi, N. Aït Messaoudène, M. Belhamelet, A. Hamid, Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct, Revue Energie Ren. Journées de Thermique, pp 115-119. (2001).

---

# Chapitre

# 1

## *Généralités sur les capteurs thermiques*

---

### **1.1. Utilisation directe de l'énergie solaire**

L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie et anime les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. Mais elle peut aussi être réutilisée directement pour produire de la chaleur à différents niveaux de température pour divers usages : chauffage et climatisation de locaux, séchage de produits agricoles, production d'eau chaude et de vapeur, et production d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques.

Pour toutes les applications directes de l'énergie solaire, le gisement solaire local doit être caractérisé soigneusement puisqu'il présente des variations géographiques et saisonnières importantes.

### **1.2. Energie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. La chaleur utilise une onde électromagnétique propulsée par des photons lesquels sont des quantas d'énergie résultant de l'interaction électrons-protons. La conversion thermique s'effectue dans un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou panneaux solaires thermiques). C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil en convertissant la lumière en chaleur et la transmettre à un fluide caloporteur liquide (eau ou antigel ou air).

Le rayonnement se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur (basse température): chauffe-eau, chauffages solaires, cuisson solaire, séchage solaire.
- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : climatisation solaire, centrales solaires thermodynamiques.
- Concentration solaire (haute température), fours solaires.

### 1.3. Définition et principe d'un capteur solaire

Un capteur solaire figure (1-1) est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide "fluide caloporteur". Ce système de captage pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre  $(0.3\mu_m$  et  $3\mu_m)$ ), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante [1].

L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible entre  $(4\mu_m$  et  $30\mu_m)$ . Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur.

Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur [2].

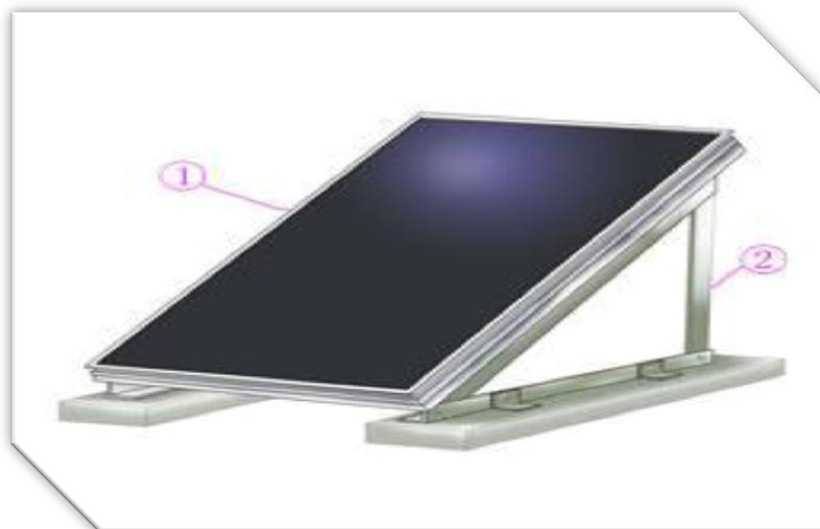


Fig. 1-1. Capteur solaire thermique avec support de fixation [3].

#### 1.4. Diversité des capteurs solaires et leur application dans la reconversion d'énergie

Il existe non seulement plusieurs manières différentes d'usage de l'énergie solaire, mais également différentes méthodes pour capter l'énergie solaire provenant d'un rayonnement incident. Principalement il y a deux grandes catégories de capteurs solaires [4].

1 - Les capteurs solaires photovoltaïques qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique.

2 - Les capteurs solaires thermiques transforment l'énergie lumineuse en énergie thermique. Un capteur à circulation de liquide est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est un liquide.

- Un capteur à air est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est l'air.
- Un capteur plan est un capteur sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est sensiblement plane et l'ouverture du capteur est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur.

Les types les plus répandus de capteurs solaires thermiques présentés comme suite.

##### 1.4.1. Capteurs solaires thermique à basse température :

- Capteurs plans de types vitrés
- Capteurs plans sans vitrage
- Capteurs à plaque perforée sans vitrage
- Capteurs solaires à passage retour
- Capteurs solaires à air
- Capteurs sous vide

##### 1.4.2. Capteurs solaires à haute température :

- Capteurs solaires intégrés
- Cuisinières solaires
- Capteurs solaires à circulation de liquide
- Systèmes à réflecteur parabolique
- Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique
- Systèmes de centrale à tour

- Capteurs solaires fixes à concentration

## 1.5. Différents types des capteurs solaires thermiques

### 1.5.1. Capteurs solaires plans

Les capteurs solaires plans, sont conçus pour la conversion de l'énergie solaire par voie thermodynamique ou bien la conversion thermique de l'énergie solaire. Ils sont constitués d'une surface réceptrice noire qui absorbe le rayonnement solaire incident visible de la bande spectrale ( $0,3 \mu_m < \lambda < 3\mu_m$ ), du rayonnement direct et diffus. Au-dessus de l'absorbeur se trouve un système de couverture à simple ou à double vitrage, limite les pertes thermiques convectives avec l'air ambiant figure (1-2), ainsi que les pertes radiatives grâce à la propriété du verre pratiquement opaque dans le domaine de l'infrarouge [5]. Une isolation sur la face arrière du capteur limite également les pertes thermiques par conduction et par convection.

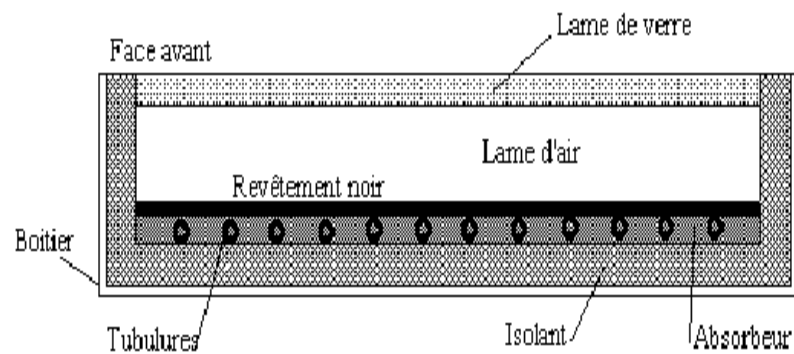


Fig.1-2. différents types des capteurs solaires thermiques [5]

À partir de ce dispositif de base, on trouve un grand nombre de système plus ou moins performant liés à la qualité de l'absorbeur. Dans le cas d'un capteur plan, le meilleur absorbeur n'est pas un corps noir, mais plutôt une surface sélective fortement absorbante dans le visible et faiblement émissive dans l'infrarouge. Le rendement maximum du capteur plan à eau  $\eta_{capt}$  (rapport de l'énergie extraite par le fluide caloporteur sur l'énergie solaire globale incident) se situe entre 60 et 80% [4], et décroît quasiment linéairement lorsque la température de fluide croît. Enfin, un fluide qui circule dans le capteur est le récepteur final de la chaleur cédée par l'absorbeur, qui est fournie par le rayonnement solaire, est destinée pour le transport à des fins diverses. On rencontre différents types de fluides caloporteurs, les plus courants sont l'eau et l'air [5].

- Avantages
  - Cout du capteur relativement bas.
  - Le capteur peut être installé au sol comme il peut être aussi intégré architecturalement (toits, balcons,.....).
  - Il possède un degré de rendement élevé [6].
- Inconvénients
  - Baisse du rendement d'utilisation en hiver à cause des pertes thermiques élevées.
  - Risque des glissements de la surface de l'absorbeur par dépôt de poussière
  - Particulièrement dans les régions arides et semi arides.
  - Possibilité de condensation au vitrage de capteur.

#### 1.5.1.1. Capteurs plans non vitrés

Ce sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Leur principe de fonctionnement est présenté sur la figure (1-4) [7].



Fig.1-3. capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [7].

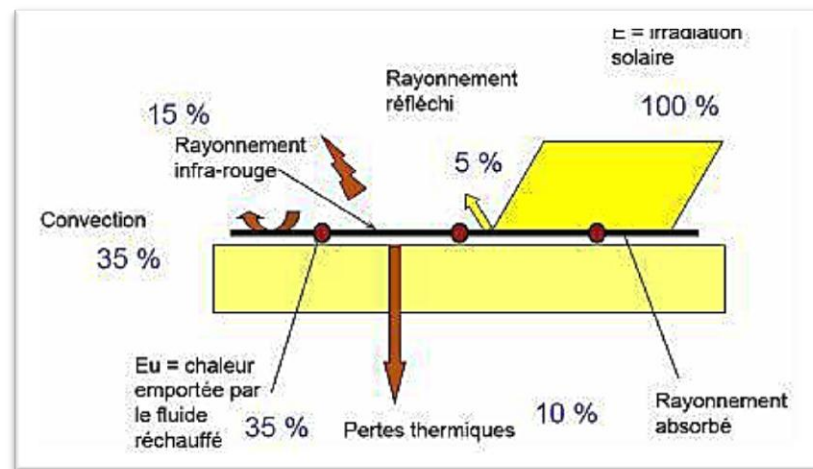


Fig.1-4. Principe de fonctionnement de capteur solaire non vitré à revêtement sélectif [8].

#### 1.5.1.2. Capteurs plans vitrés

Ce type de capteurs figure (1-5) peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple), la figure (1-6) montre le principe de fonctionnement de ce type [8].

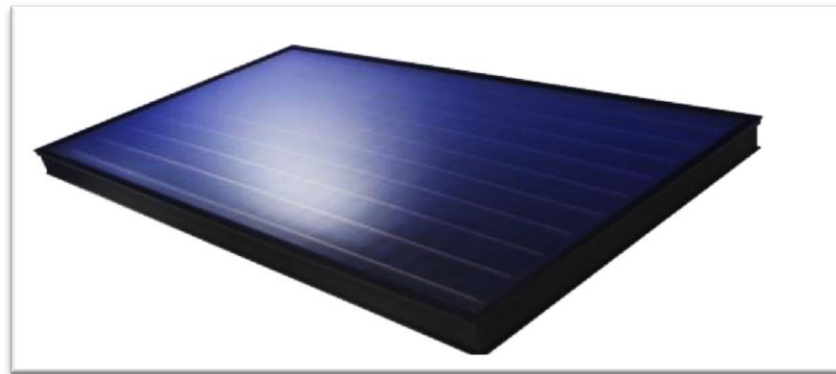


Fig. 1-5. capteur plan vitré[7].

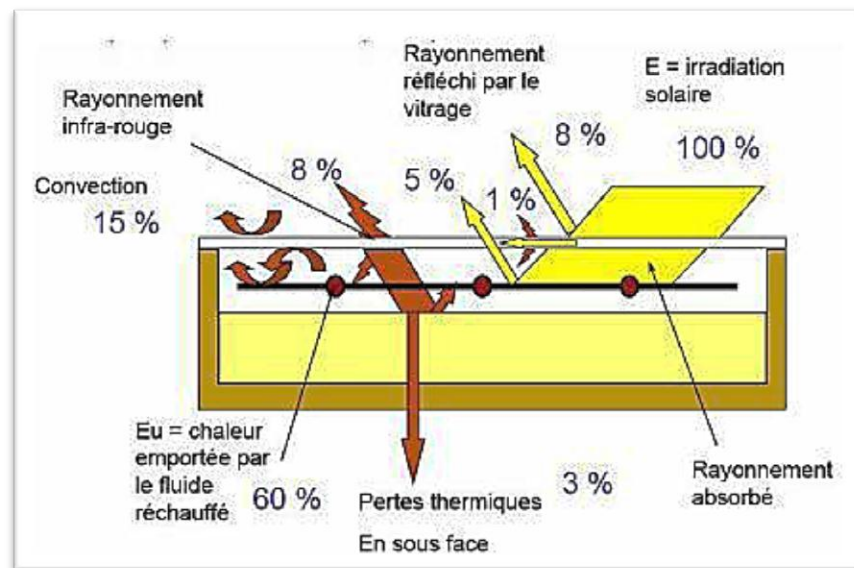


Fig.1-6. Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [8].

### 1.5.1.3. Capteurs à tubes sous vide

Il s'agit d'un tube cylindrique porteur lui aussi d'un traitement de surface qui maximise l'absorption solaire. Suivant les technologies le cylindre sous vide est en fait constitué de 2 tubes concentriques emboîtés l'un dans l'autre. Entre ces 2 tubes est réalisé le vide d'air. Dans cette version, le vide n'est fait qu'entre les 2 tubes, la partie centrale du tube interne n'est pas sous vide. Dans une autre version il s'agit d'un seul tube transparent dans lequel le vide est complet. La restitution de l'énergie captée se fait au niveau d'un collecteur de chaleur placé au sommet du capteur dans lequel les tubes sous vides sont enfichés. La transmission d'énergie thermique au liquide caloporteur se fait par deux méthodes. Le premier fait passer directement le liquide caloporteur au contact de l'absorbeur, l'autre technique utilise un caloduc. Le caloduc est une simple tige de cuivre creuse qui contient une liquide à changement de phase. Au contact de la chaleur ce liquide se vaporise et échange sa chaleur au liquide caloporteur. Cet échange de chaleur le condense et ainsi de suite[9].

Le capteur à tubes sous vide présenté dans la figure (1-7) avec son principe de fonctionnement dans la figure (1-8).

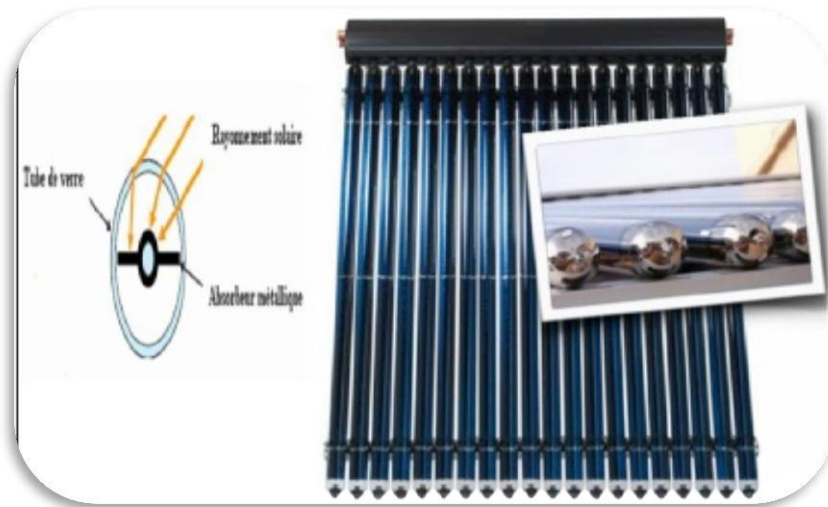


Fig.1-7. capteurs à tube sous vide [9].

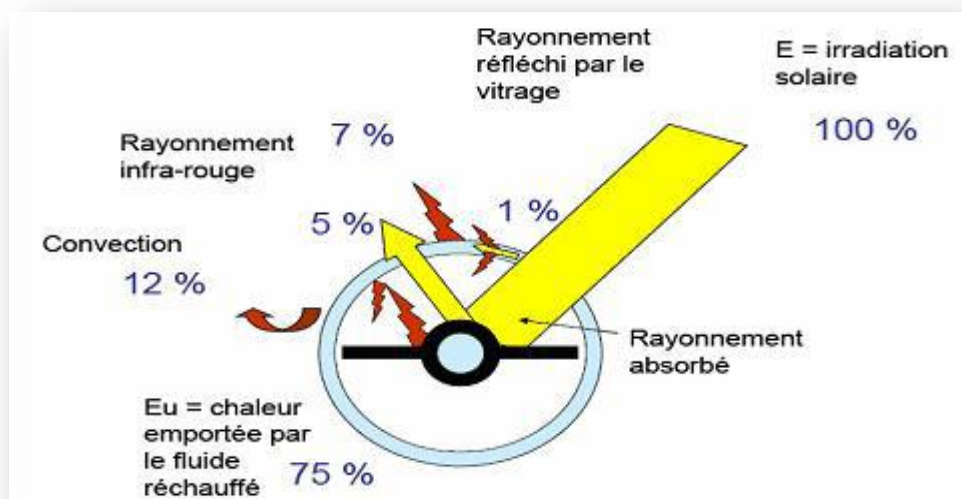


Fig. 1-8 . Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [2].

### 1.5.2. Capteurs à concentration

Dans les systèmes à concentration, le rayonnement solaire direct est reçu par une surface de grande taille appelée surface d'ouverture, puis dirigé vers un absorbeur de surface plus petite.figure (1-9).

Ce résultat est obtenu grâce à une ou plusieurs réflexions sur des miroirs, ou à des réfractions (à travers des prismes, ou lentilles). Dans les dispositifs à concentration on notera la présence de nombreux avantages et inconvénients.

- Les avantages :
  - La diminution de la surface de l'absorbeur se traduit par une baisse des pertes thermiques qui sont proportionnelles à la surface.
  - Les rendements sont par conséquent plus élevés.
  - Les températures obtenues varient d'une certaine de °C à plus de 400°C en fonction du taux de concentration.
- Les inconvénients :
  - Seul le rayonnement direct est utilisé.
  - Les pertes optiques peuvent être importantes, car elles sont dues aux phénomènes de réflexion ou de réfraction, et aux caractéristiques géométriques du système.
  - Les pertes thermiques sont importantes à cause du niveau de température plus élevé de l'absorbeur.
  - Ces capteurs nécessitent un entretien régulier et de conserver la qualité optique des miroirs soumis aux poussières et à la corrosion de l'environnement.



Fig. 1-9. Concentrateur cylindro-parabolique [9].

### 1.6. Définition des différentes caractéristiques des capteurs solaires

La puissance d'un capteur dépend du mode de fonctionnement. Plus la différence entre la température intérieure du capteur et la température extérieure est élevée, plus ses déperditions thermiques sont importantes. Le rendement diminue également [6].

Les capteurs sont caractérisés par :

- Leurs pertes optiques
- Leurs pertes thermiques

Ces pertes permettent par ailleurs de calculer le rendement global du capteur, pour une situation de fonctionnement donnée.

#### ❖ *Pertes optiques*

En premier lieu, les capteurs sont caractérisés par leur rendement optique (coefficient  $\beta$ ). Le rendement optique du capteur représente le pourcentage de la puissance radiative du soleil qui sera réellement absorbée par le capteur.

#### ❖ *Pertes thermiques*

Lorsque le fluide caloporteur qui circule dans le capteur s'échauffe, une partie de la chaleur reçue est perdue par conduction et par convection vers l'extérieur. Ces pertes sont caractérisées par un coefficient  $k$  exprimé en  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$ .

$$P_{th} = k \times S \times \Delta T \quad (1.1)$$

$k$ : Coefficient de déperdition du capteur  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$ .

Voir le tableau 1-1: la valeur du facteur  $k$  pour les différents capteurs solaires plans [10].Annexe(A).

#### ❖ *Rendement global*

Le rendement global d'un capteur se calcule à partir des rendements optiques et thermiques dans des conditions données de fonctionnement du capteur.

C'est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie solaire reçue par le capteur pendant le même intervalle de temps, dans des conditions données de fonctionnement stable. La méthode Française du rendement global d'après la norme NF P50-501 [10] :

L'énergie utile est donc égale à la partie de l'énergie incidente traversant le vitrage moins les déperditions thermiques (proportionnelles à l'écart de température entre le capteur et l'ambiance).

$$\eta_g = \beta - \frac{k \times (T_{mf} - T_{ext})}{G} \quad (1.2)$$

Avec :

$G$  : Flux solaire incident.

$k$  : Coefficient de pertes thermiques en  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$ .

$\beta$  : Le rendement optique.

$T_{mf}$  : Température moyenne du fluide caloporteur en  $[^\circ C]$ .

$T_{ext}$  : Température extérieure en  $[^\circ C]$ .

## 1.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude générale sur les différents types de capteurs solaires thermiques, leurs rôles dans la conversion de l'énergie solaire, leurs utilités, des différentes composantes, avec leurs avantages et inconvénients.

### Référence

- [1] K. Salima, "Etude théorique et numérique des systèmes couples, distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Thèse de magister (2009).
- [2] D. Ababsa, Optimisation du rendement d'un capteur Solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de Magistère, la faculté des sciences-département de physique de Batna, (2010).
- [3] A. H. Khedim, Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [4] Manuel analyse de projet pompes à chaleur géothermique. retscreen international centre d'aide à la décision sur les énergies propres. WWW.retscreen.net
- [5] Mejdoub Amine Khodja, Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire. Thèse de magister en génie climatique, Constantine (2004).
- [6] E. N, iels Vermylen, Viessmann Belgium SPRL14. (1930).
- [7] S.SOUAD, effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan; thèse de magistère en physique, université de Constantine. (2010).
- [8] Ferdjani Ahmed Taha, Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans» Mémoire de magister de l'Université Mohamed Khider – Biskra (2013).
- [9] Romaine Guillo, écosource, Les Centrales Solaires à Miroir de Fresnel.
- [10] S. Their, L'énergie solaire et ces applications –EPF.2010.

---

# Chapitre

## 2

### *Etude théorique du capteur plan thermique*

---

#### **2.1. Différent composants des systèmes solaires plans**

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants :

- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories). Les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air.
- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution.

#### **2.2. Etude descriptive des capteurs solaires plans**

##### **2.2.1. Composants d'un capteur solaire plan**

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente (vitre), d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre (figure 2-1).

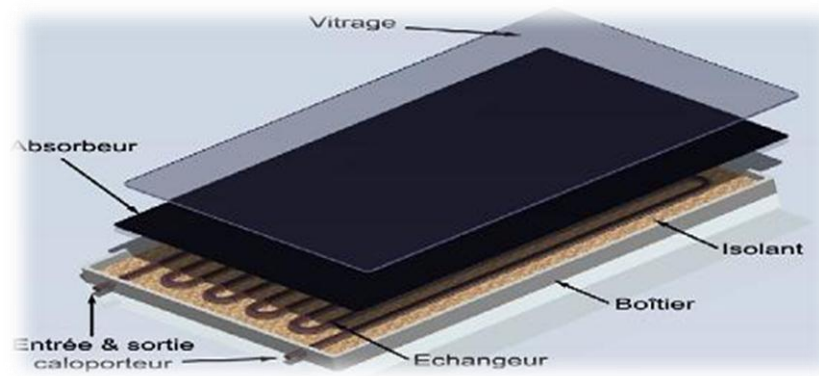


Fig. 2-1. Composants d'un capteur solaire plan [1].

### 2.2.2. Absorbeur

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur [2]. Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine.

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur. Tableau (2-1) présente les caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur [3]. Annexe A.

### 2.2.3. Couche sélective de l'absorbeur

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi que sa faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du I.R ( $\epsilon < 0.15$ ,  $\alpha > 0.9$ ). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir [2]. Le tableau (2-2) donne les propriétés de quelques revêtements sélectifs. Annexe A.

#### 2.2.4. Couverture transparente (vitrage)

C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R, permettant de réaliser un effet de serre. L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C [4], en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur et évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent. Le tableau (2-3) regroupe les propriétés de différentes surfaces transparentes [3]. Voir l'annexe A.

#### 2.2.5. Fluide caloporteur

Le fluide est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise l'eau comme fluide caloporteur.

#### 2.2.6. Isolation thermique

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes :

- **Partie avant de l'absorbeur**

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm [5].

En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [2].

- **Parties arrière et latérale**

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégager aux hautes températures,

en plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [2, 6]. Le tableau (2-4) donne les propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [3].  
Annexe A.

### 2.2.7. Cadre

Le cadre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolant, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques

## 2.3. Principes de fonctionnement d'un capteur solaire

Un capteur solaire plan destiné au chauffage des habitations ou à la production d'eau chaude est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident.

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple figure (2-2) [7,8].

Dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement solaire thermique traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface qui s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. Une certaine quantité du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et l'autre est réémise vers l'absorbeur. Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre.

Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur.

L'isolation thermique au dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement.

Un boîtier contenant le tout, calorifugé de manière à réduire les pertes vers l'arrière et les côtés.

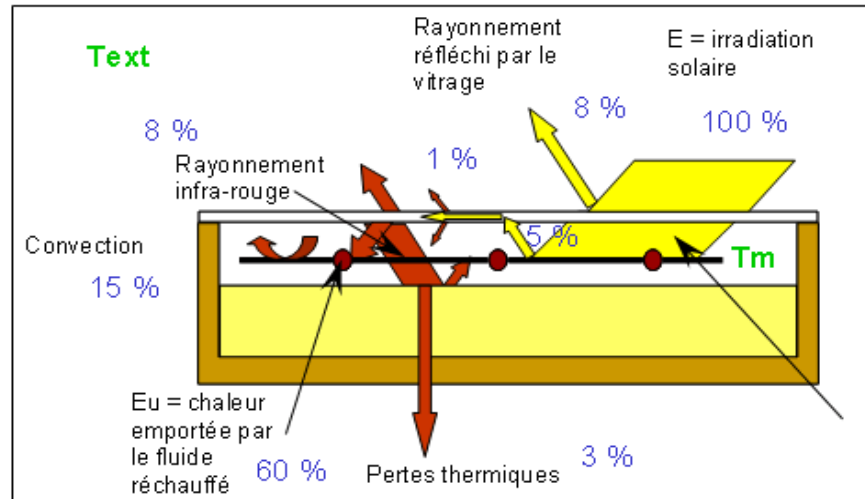


Fig. 2-2. Principe de fonctionnement du capteur solaire plan [7,8].

### 2.3.1. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires

On a plusieurs caractéristiques qui influent sur le rendement de capteur solaire est classé en trois paramètres : paramètres externes, paramètres internes, et paramètres de fonctionnements.

- **Paramètres externes:** les paramètres externes sont représentés par:
  - Paramètre d'ensoleillement : éclaircissement énergétique du au rayonnement global a la position du soleil et a la durée d'insolation.
  - La température extérieure sèche.
  - La vitesse du vent sur le capteur.
- **Paramètres internes:** les paramètres internes sont représentés par :
  - Paramètre de position : l'inclinaison et l'orientation
  - Dimensions de capteur: épaisseur, longueur, la largeur et la surface réceptrice.
  - La section de passage du fluide.
- **Paramètres de fonctionnements :** les paramètres de fonctionnement sont représentés par:
  - La température d'entrée du fluide dans le capteur.
  - Les températures des différentes parties du capteur.
  - Le débit du fluide caloporteur.

Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût, d'effectuer un choix parmi les différents types de capteur, dont entre autres : la température de sortie du fluide et la puissance thermique utile du capteur.

## 2.4. Conclusion

Dans ce chapitre une étude descriptive est présentée sur les capteurs solaires plan, ses composants, les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement influant sur leur efficacités.

### Référence

- [1] Share Alike, Kefid, Concassage Station. (2017)
- [2] J. Bernard, Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [3] Ferdjani Ahmed Taha, Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans. Mémoire de magister de l'université Mohamed Khider, Biskra.(2013).
- [4] A. Sfeir, G. Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires. Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [5] Mejdoub Amine Khodja, Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influencesur le rendement d'un capteur solaire. Thèse de magister en génie climatique, Constantine. (2004).
- [6] R. Bernard, G. menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications. Technique et Documentation. (1979).
- [7] N. Bellel, Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries. Thèse de doctorat. Université de Constantine. (2004).
- [8] Thomas Letz, Ines Education, savoir Tecnocale Bp258-F73375 Le Bourget du Lac. Novembre (2007).

---

# Chapitre

## 3

### *Bilan énergétique d'un capteur thermique Plan*

---

Il est bien évident que ce sont les performances du capteur solaire qui permettent de juger si l'énergie solaire est adaptée à telle ou telle application.

En effet, une compréhension meilleure des mécanismes fondamentaux régissant le bon fonctionnement d'un capteur permet d'une part, de maîtriser tous les paramètres extrinsèques ou intrinsèques entrant dans le processus de transfert et par la suite connaître sur quelle base, on peut agir pour optimiser le rendement du capteur solaire et d'autre part, adapter ce qu'il faut à la fonction ou l'application.

C'est dans ce but, que de nombreux travaux de recherche ont eu lieu [1-3]

#### **3.1. Différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan**

Le rendement d'un capteur solaire plan est influencé par différents paramètres

[4-7]. On distingue :

##### **3.1.1. Paramètres externes**

*\* paramètres d'ensoleillement*

- ✓ Eclairement énergétique dû au rayonnement global.
- ✓ Position du soleil et durée d'insolation.
- ✓ L'heure de la journée et la saison.
- ✓ La position géographique du lieu considéré (latitude).

*\* Température ambiante.*

*\* Vitesse du vent.*

*\*Humidité relative*

### 3.1.2. Paramètres internes

*\*paramètres de position*

- ✓ Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- ✓ Capteur fixe ou suiveur du soleil.

*\*paramètres de construction*

Parmi lesquels nous citons :

- L'absorbeur
  - ✓ Les propriétés thermophysiques et optiques.
  - ✓ Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
  - ✓ Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
  - ✓ Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
  - ✓ Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
  - ✓ Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur.
  - ✓ Température de l'absorbeur.
  - ✓ La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.
- La surface sélective
  - ✓ Propriétés optiques.
- Couverture transparente
  - ✓ Propriétés optiques et thermophysiques.
  - ✓ Epaisseur.
  - ✓ Le nombre de vitrage et la forme.
- L'isolant
  - ✓ Propriétés thermophysiques et optiques.
  - ✓ Epaisseur.
- Fluide caloporteur
  - ✓ Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
  - ✓ Température d'entrée.
  - ✓ Propriétés thermophysiques.

### 3.1.3 Performances d'un capteur solaire plan

L'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané [8] défini par:  $n_i = \frac{P_u}{A_c G}$

$n_i$ : Rendement instantané du capteur plan.

$P_u$ : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur[W].

$A_c$ : Surface du capteur[m<sup>2</sup>].

$G$ : Flux solaire global incident [ $\frac{W}{m^2}$ ].

### 3.2. Etat de l'art des capteurs plans à eau

De nombreux auteurs ont porté un intérêt particulier aux paramètres opérationnels mis en jeu afin d'améliorer les performances thermiques du capteur solaire plan.

#### 3.2.1. Etude des capteurs solaires plans à eau

N.Bellel et al [6] ont étudié théoriquement un capteur solaire plan à eau simple pour comparer deux configurations du réseau du fluide caloporteur, il s'agit d'un réseau en forme d'un serpentín et un autre en série. Ils ont validé les résultats obtenus théoriquement par un travail expérimental, et ils ont trouvé un écart de 10% estimé satisfaisant. Ils ont déduit que le capteur muni d'un réseau en serpentín est plus performant que celui muni d'un réseau de tubes en série.

H.Abdi et Al. [9] ont mené des travaux expérimental et théorique afin d'étudier l'effet de la forme géométrique du passage du fluide sur l'efficacité des capteurs dans le cas d'un contact direct eau-plaque absorbante. Ils ont utilisé deux configurations de la plaque absorbante figure (3-1) l'une concave et l'autre convexe. Les dimensions du passage du fluide sont choisies de façon à avoir le même diamètre hydraulique par les deux configurations.

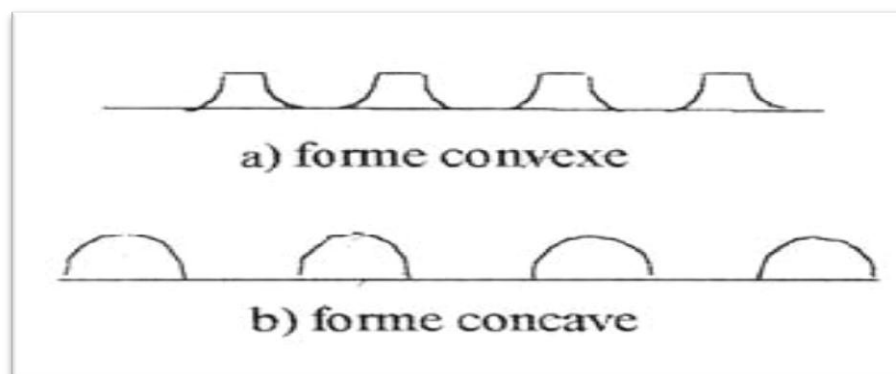


Fig. 3-1. Formes géométriques des plaques absorbantes

Ce travail a permis de conclure que le rendement du capteur dépend en plus des paramètres habituels (conditions extérieures, caractéristiques thermiques), des formes géométriques des plaques absorbantes.

Le capteur muni d'une plaque absorbante de forme convexe donne un meilleur rendement. Dans ce qui suit, nous exprimerons les puissances absorbées par les composants d'un capteur solaire plan à simple vitrage pour dresser le bilan énergétique de ce système en régimes permanent.

### 3.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires. Qu'elles génèrent dans son enveloppe. Ce rayonnement constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil [3].

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de  $3.10^8$  m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et  $8\mu\text{m}$  [4].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau (3-1). Annexe B.

#### 3.3.1. Rayonnement solaire hors atmosphère

Le soleil est le siège de réactions de fusion de l'hydrogène en hélium, qui libèrent une grande quantité d'énergie dispersée dans l'espace par rayonnement. La perte de masse du soleil est de l'ordre de  $4 \text{ à } 5.10^6 \text{ t. s}^{-1}$ .

#### 3.3.2. Constante solaire

C'est la densité de l'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est approximativement égale à  $1360 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  (cependant elle varie de  $\pm 3\%$  dans l'année à cause des légères variations de la distance terre-soleil).

On peut calculer la valeur du flux du rayonnement solaire  $I$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires par la relation [3]:

$$I = I_0 \cdot \exp \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360}{365} \times j \right) \right] \quad (3.1)$$

Où  $j$  : est le numéro du jour de l'année.

### 3.3.3. Rayonnement solaire au sol

C'est l'énergie reçue pendant une certaine durée. On distingue plusieurs composantes qui sont principalement :

- Le rayonnement direct ( $S$ ).
- Le rayonnement diffus ( $D$ ).
- Rayonnement réfléchi ( $R$ ).
- Le rayonnement global ( $G$ ) un plan reçoit de la part du soleil un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions : directe, diffuse et réfléchie.

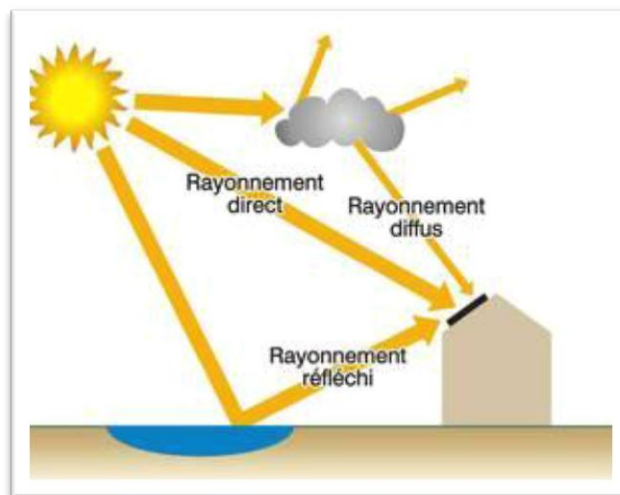


Fig. 3-2. Rayonnement solaire au sol [5].

## 3.4. Rayonnement solaire sur un plan donné (plan horizontal et plan incliné)

### 3.4.1. Rayonnement solaire sur un plan horizontal

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [10]:

- Rayonnement direct** ( $S_H$ ) : Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Après des mesures pour des heures ( $i$ ), nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct.

$$S_H(i) = 1367 \cdot C(j) \cdot \sin(h(i)) \cdot \exp\left(\frac{-T_L}{0.9 \times 9.41 \times M(i)}\right) \quad (3.2)$$

Avec

$S_H(i)$ : Flux direct horizontal.

$C(j)$  : La correction de la distance terre soleil.

$h(i)$  : Hauteur du soleil.

$T_L$  : Facteur de trouble atmosphérique du lieu.

$M(i)$ : Nombre d'aire masse.

- b) **Rayonnement diffus** ( $D_H$ ): C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus ( $D$ ) par l'heure ( $i$ ) est statistiquement donné par :

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} \times C(j) - \sin[h(i) - 2] \times \exp \left[ -5. \log^2 \left( \frac{T_c}{22.M(i)^{-0.65}} \right) \right] \quad (3.3)$$

Avec :

$T_c$ : température du ciel.

- c) **Rayonnement réfléchi** ( $R_H$ ): C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo ( $\xi$ ) :

$$0 \leq \xi \leq 1.$$

$$\text{Albédo } (\xi) = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie recue}} \quad (3.4)$$

Voir le Tableau 3-2 Albédo pour différentes surfaces [11]. Annexe B.

- d) **Rayonnement global**  $\varphi_G$ : Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions directe, diffuse et réfléchie :

$$\varphi_G = S_H + D_H + R_H \quad (3.5)$$

### 3.4.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné

Une surface inclinée par rapport à l'horizontale avec l'angle ( $\beta$ ) reçoit une puissance énergétique répartie entre le direct ; le diffus, et le réfléchi [10] :

- a) **Rayonnement direct** : Soit un lieu de latitude ( $L$ ), le flux est défini par:

$$R_B = \frac{S_B}{S_H} = \cos(L - \beta) \cdot \cos(\omega) + \sin(L - \beta) \cdot \frac{\sin(\delta)}{\cos(L)} \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(L) \cdot \sin(\delta) \quad (3.3)$$

Avec :

$R_b$  : Rapport de flux direct

$S_b$  : Flux direct pour un plan d'inclinaison( $\beta$ )

$S_H$  : Flux direct horizontal

$\omega$  : Déclinaison du soleil.

$\delta$  : Angle horaire du soleil.

$L$ : Latitude de lieu.

$\beta$ : Angle d'inclinaison

Alors le flux direct pour le plan incliné ( $\beta$ ) :

$$S_B = R_b \cdot S_H \quad (3.7)$$

b) **Rayonnement diffus** : Le flux à une inclinaison ( $\beta$ ) et à l'altitude ( $L$ ) captée par une surface orientée face au (Sud- Est) est donné par le modèle suivant :

$$D_B = D_H \cdot \left[ F(i) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + (1 - F(i)) \cdot \frac{\cos(\theta(i))}{\sin(\beta)} \right] \quad (3.8)$$

Avec :

$$F(i) = 1 - K_T(i) \cdot \left[ 1 - \frac{S_H}{G_H} \right] \quad (3.9)$$

$$K_T(i) = \left[ \frac{\varphi_{GH}(i)}{(i)} \right] \quad (3.10)$$

$K_T(i)$ : Coefficient de sérénité

$(i)$ : Angle d'incidence du rayon direct par rapport au rayon incliné.

$$R_B = \varphi_{GH} \cdot \left[ \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (3.11)$$

Avec

$\varphi_{GH}$  : Flux global horizontal.

$\zeta$  : Albédo du sol.

c) **Rayonnement global incliné** : Il est la superposition des flux direct, réfléchi et diffus dont il est la somme des trois composantes :

$$\varphi_{GB} = S_B + R_B + D_B \quad (3.12)$$

On peut calculer le flux solaire global par la relation suivante pour un plan incliné d' angle ( $\beta$ ):

$$\varphi_{GB} = R \cdot \varphi_{GH} \quad (3.13)$$

$$R = \frac{\varphi_{GB}}{\varphi_{GH}} = \left(1 - \frac{D_H}{\varphi_{GH}}\right) \cdot R_B + \frac{D_H}{\varphi_{GH}} \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) + \zeta \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right) \quad (3.14)$$

Avec

$R$  : Rapport du flux global.

$R_B$  : Rapport du flux direct

### 3.5. Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement.

#### 3.5.1. Conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière [11]. La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation [11]:

$$q = -K \cdot A \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (3.15)$$

$q$  : Flux de chaleur.

$k$  : Coefficient de conductivité thermique.

$A$  : Surface d'échange.

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- Les faces supérieures et inférieure de la vitre  $h_{cV}$ .
- Les faces supérieures et inférieure de l'isolant  $h_{iS}$ .
- L'absorbeur et l'isolant  $h_{cVai}$

Le flux de chaleur par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par [12]:

$$q_{icda} = \frac{T_{ab}-T_{ii}}{\varphi_1} + \frac{T_{ab}-T_{il}}{\varphi_2} \quad (3.16)$$

$\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont exprimés par :

$$\varphi_1 = \frac{e_{ab}}{s_{abi} \times k_i} + \frac{e_i}{s_{abi} \times k_{ab}} \quad (3.17)$$

$$\varphi_2 = \frac{e_{ab}}{s_{abil} \times k_{il}} + \frac{e_{il}}{s_{abil} \times k_{ab}} \quad (3.18)$$

$q_{icda}$  : Quantité de chaleur échangée par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.

$T_{ab}$  : Température de l'absorbeur.

$T_{ii}$  : Température de la face intérieure de l'isolant.

$T_{il}$  : Température de l'isolant latéral.

$e_{ab}$  : Épaisseur de l'absorbeur.

$s_{abi}$  : Surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

$k_i$  : Conductivité thermique de l'isolant horizontal.

$e_i$  : Épaisseur de l'isolant horizontal.

$e_{il}$  : Épaisseur de l'isolant latéral.

$k_{ab}$  : Conductivité thermique de l'absorbeur.

$k_{il}$  : Conductivité thermique de l'isolant latéral.

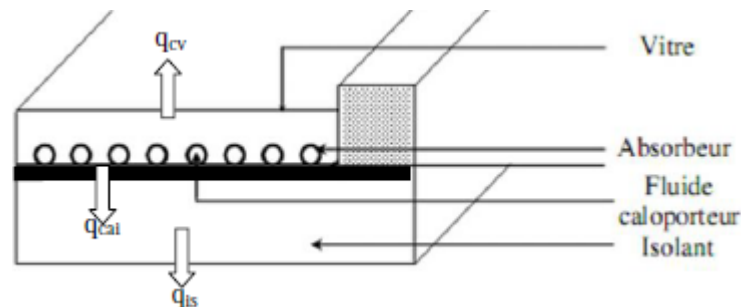


Fig. 3-3. Schéma de transfert par conduction.

### 3.5.2. Convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques [9]. On distingue deux types de convection :

La convection forcée : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur... etc.).

La convection naturelle : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton [13]:

$$q = h \times s \times (T_p - T_f) \quad (3.19)$$

Où

$q$  : Le flux échangé 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 plan l'échange par convection s'effectue entre :

- ✓ La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- ✓ La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- ✓ Le tube et le fluide par convection libre.
- ✓ Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- ✓ Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

### 3.5.3. Rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques [14].

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann. [14]:

$$q = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (3.20)$$

Avec :

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

$\varepsilon$  : Émissivité thermique du matériau.

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à  $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ .

$T$  : température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- ✓ La vitre et le ciel.
- ✓ La vitre et la plaque chauffante.
- ✓ L'isolant et le sol.

### 3.6. Différentes pertes thermiques dans un capteur solaire

Les pertes thermiques au niveau du capteur solaire peuvent avoir lieu par l'intervention des trois modes de transfert thermique: convection, conduction et rayonnement.

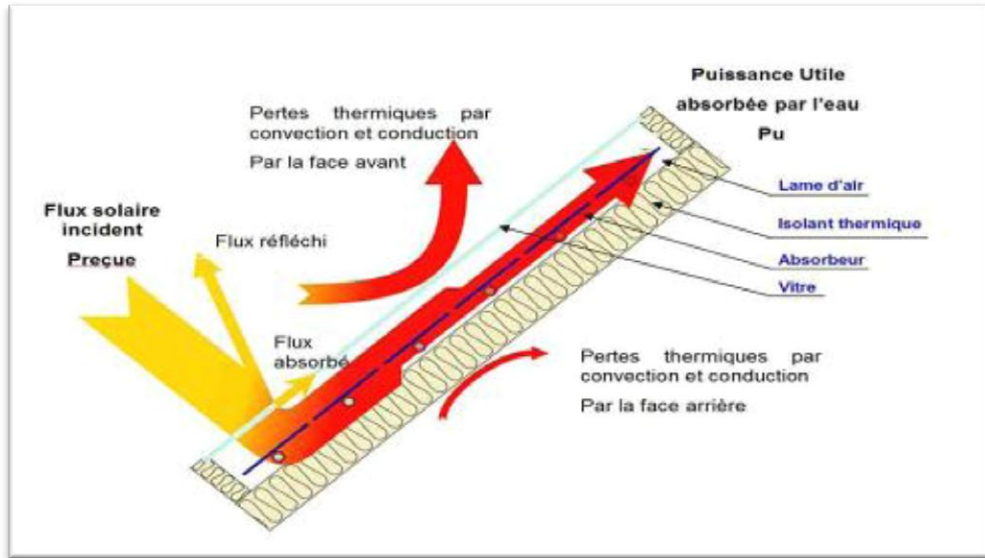


Fig.3-4 .Les différents échanges thermiques dans un capteur plan [5].

### 3.6.1 Pertes par convection

\* Quantité d'énergie par convection  $q_{cva}$  de la vitre vers le milieu ambiant [14]:

$$q_{cva} = h_{cva} \cdot A_v \cdot (T_{ve} - T_a) \quad (3.21)$$

\* Quantité d'énergie par convection  $q_{cfa}$  du fluide caloporteur vers l'isolant [14]:

$$q_{cfa} = h_{cfa} \cdot A_{fi} \cdot (T_f - T_{ii}) \quad (3.22)$$

\* Quantité d'énergie par convection  $q_{cia}$  de l'isolant vers le milieu ambiant [14]:

$$q_{cia} = h_{cia} \cdot A_i \cdot (T_{ie} - T_a) \quad (3.23)$$

### 3.6.2 Pertes par conduction

\*Quantité d'énergie par conduction  $q_{icda}$  entre l'absorbeur et l'isolant:

$$q_{icda} = \frac{T_{ab} - T_{ii}}{\varphi_1} + \frac{T_{ab} - T_{il}}{\varphi_2} \quad (3.24)$$

$\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont exprimés par :

$$\varphi_1 = \frac{e_{ab}}{s_{abi} \times k_i} + \frac{e_i}{s_{abi} \times k_{ab}} \quad (3.25)$$

$$\varphi_2 = \frac{e_{ab}}{s_{abil} \times k_{il}} + \frac{e_{il}}{s_{abil} \times k_{ab}} \quad (3.26)$$

### 3.6.3 Pertes par rayonnement

\* Quantité d'énergie par rayonnement  $q_{rvc}$  de vitre vers le ciel [14] :

$$q_{rvc} = h_{cvi} \cdot A_v \cdot (T_{Ve} - T_c) \quad (3.27)$$

\*Quantité d'énergie par rayonnement  $q_{rav}$  de l'absorbeur vers la vitre [14] :

$$q_{rav} = h_{rav} \cdot A_v \cdot (T_{ab} - T_{Vi}) \quad (3.28)$$

\* Une quantité d'énergie par rayonnement  $q_{ris}$  de l'isolant vers le sol [14]:

$$q_{ris} = h_{ris} \cdot A_i \cdot (T_{ie} - T_s) \quad (3.29)$$

### 3.7. Bilan énergétique du capteur

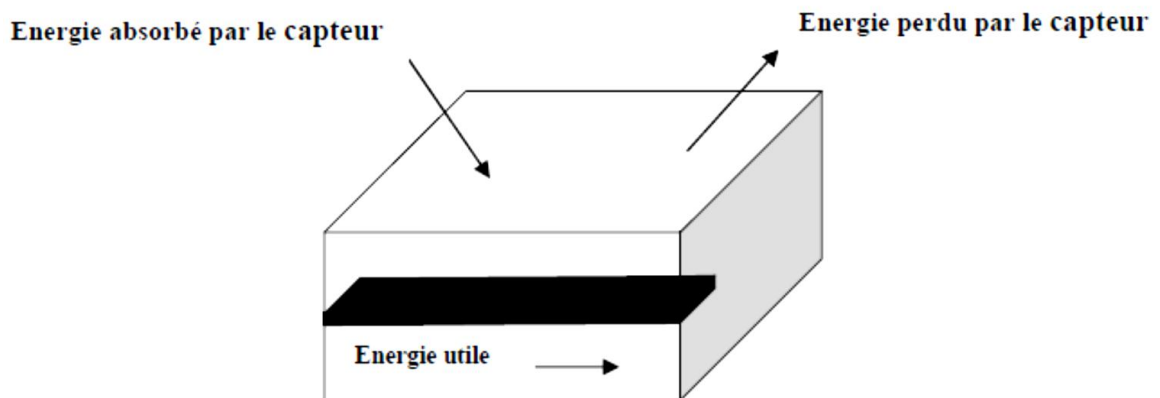


Fig. 3-5. Bilan énergétique d'un capteur plan thermique

Soit  $Q_{sa}$  l'énergie solaire absorbée par un capteur, une partie de celle-ci est récupérée par le fluide caloporteur c'est l'énergie utile  $Q_u$ . Cette énergie peut être directement utilisée ou bien transférée vers un système de stockage (ballon d'eau chaude par exemple).

Un capteur solaire est aussi sujet à des pertes thermiques. Une partie de l'énergie absorbée est transférée vers l'environnement sous forme d'énergie thermique principalement par convection et rayonnement. Ces pertes seront notées  $Q_p$ .

Enfin si on s'intéresse à une période de mise en température du système (au démarrage par exemple) il faudra tenir compte de l'énergie absorbée par le capteur nécessaire à cette montée en température. Cette énergie notée  $Q_{st}$ , dépend de l'inertie thermique de l'installation. Ainsi le bilan thermique global s'écrit [15]

$$Q_{sa} = Q_u + Q_p + Q_{st} \quad (3.30)$$

Pour un capteur à inertie thermique négligeable ou dans le cas de régime thermique permanent  $Q_{st} = 0$ . Donc l'équation devient :

$$Q_{sa} = Q_u + Q_p \quad (3.31)$$

Où

$Q_u$  : L'énergie utile.

$Q_p$  : L'énergie perdue par convection et conduction et rayonnement vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur.

$Q_{st}$  : L'énergie stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur.

$Q_{sa}$  : L'énergie absorbée par le capteur.

### 3.8. Définitions et calcul des performances de capteurs plans

#### 3.8.1. Rendements

Ils sont au nombre de deux :

- ❖ Rendement optique
- ❖ Rendement instantané (ou thermique).

##### 3.8.1.1. Rendement optique

Le rendement optique quantifie les capacités du duo vitre-absorbeur à capter l'énergie vis à vis de l'énergie incidente. Il est défini par :

$$\eta_0 = (\text{Flux absorbé par la surface du capteur}) / (\text{Flux incident sur le capteur})$$

$$\text{Soit : } \eta_0 = \frac{\tau_v \cdot \alpha_p \cdot G}{G} = \tau_v \cdot \alpha_p \quad (3.32)$$

Avec :

$\tau_v$  : Le facteur de transmission de la couverture transparente (vitrage) chargée de créer l'effet de serre.

$\alpha_p$  : Facteur d'absorption du capteur.

$G$  : Flux solaire incident ; reçu par le capteur en  $[\frac{W}{m^2}]$ .

Le rendement optique pour différents types de capteurs [16] :

- ✓ capteur plan 70-85 %
- ✓ tube sous vide à absorbeur sur cuivre 75-85 %

- ✓ capteur non vitré 80-95 %
- ✓ tube sous vide à absorbeur sur verre 50-75 %

### 3.8.1.2. Rendement Thermique (Ou Instantané) :

Le rendement instantané mesure le rapport de la puissance utile extraite par  $m^2$  à la puissance incidente sur le capteur à chaque instant; soit [17-18] :

$$\eta = \frac{P_u}{A_c G}$$

$P_u$  : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

$A_c$  : Surface du capteur.

$G$  : Flux solaire global incident.

Le rendement instantané du capteur en fonction du débit massique est donné par [17-18]:

$$\eta = m \cdot C_p \cdot \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{A_c} \cdot G \quad (3.33)$$

Avec

$n_i$  : Rendement instantané du capteur.

$\dot{m}$  : Débit massique du fluide caloporteur plan.

$C_p$  : Chaleur spécifique de l'eau.

$T_{fs}$  : Température de sortie du fluide.

$T_{fe}$  : Température d'entrée du fluide.

## 3.8.2. Puissances absorbées par un capteur solaire plan avec simple vitrage

### 3.8.2.1. La puissance absorbée par la vitre

$$P_V = \alpha_V G A_V \quad (3.34)$$

Où :

$P_V$ : Puissance absorbée par la vitre.

$\alpha_V$ : Absorptivité de la vitre.

$A_V$ : Surface de la vitre.

### 3.8.2.2. Puissance absorbée par l'absorbeur

$$P_{ab} = \alpha_{ab} \cdot \tau_V \cdot G \cdot A_{ab} \quad (3.35)$$

Où :

$P_{ab}$  : Puissance absorbée par l'absorbeur.

$A_{ab}$ : Surface de l'absorbeur.

$\alpha_{ab}$ : Absorptivité de l'absorbeur.

$\tau_v$ : Transmissivité de la vitre.

## Référence

- [1] Mejdoub Amine Khodja, Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire. Thèse de magister en génie climatique, Constantine, (2004).
- [2] K. Salima, Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Thèse de magister (2009).
- [3] D. Ababsa, Optimisation du rendement d'un capteur Solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de Magistère, la faculté des sciences-département de physique de Batna, (2010).
- [4] R. Bernard, G. menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [5] D. K. Edwards, Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [6] N. Bellel, Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries, thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).
- [7] J. Desautel, Les capteurs héliothermiques, Edisud. (1979).
- [8] A. Guedira, A. Benallou, Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement naturel au Maroc, Revue des Energies Renouvelables, journées de thermique, pp 79-84. (2001).
- [9] S. A. Hakem, N. Kasbadji-Merzouk, M. Merzouk, Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, Revue des Energies Renouvelables, pp 153-162. (2008)
- [10] M. Belhadj, Modélisation d'un Système de captage Photovoltaïque Autonome. Mémoire de magister de l'universitaire de Bechar, 2008.
- [11] A. Degionanni, Techniques de l'ingénieur, conduction, BE8200. (1981).
- [12] M., E. A. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen. (2009).
- [13] S. A. Hakem, N. Kasbadji-Merzouk, M. Merzouk. Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, Revue des Energies Renouvelables, pp 153-162. (2008).
- [14] Office National de Météorologie. Données climatiques de Ouargla, de l'année 2003 jusqu'à 2013.
- [15] J. Bernard, Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [16] S. Their, L'énergie solaire et ces applications –EPF. (2010).
- [17] A. Sfeir, G. Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [18] G. Lazhr, étude et calcul des capteurs solaires plans, application au chauffe-eau, Mémoire de master académique de l'université d'Ouargla. (2014).

---

# Chapitre

## 4

### *Etat de l'art sur les isolants thermiques d'un capteur solaire plan*

---

L'isolation dans les capteurs est une nécessité et représente un moyen efficace et rentable. On trouve sur le marché un grand nombre de produits d'isolation qui permettent d'apporter des solutions aux problématiques techniques des différents systèmes constructifs. Ce chapitre a pour objectif de nous éclairer sur les propriétés des différents produits d'isolation qu'ils soient bio-sources, minéraux ou synthétiques et de nous aider dans notre choix. Une série de fiches techniques associées aux principaux matériaux d'isolation nous permettra d'avoir une vision la plus objective possible du panel de solutions d'amélioration thermique de notre capteur. Donc, il est nécessaire d'apporter en premier lieu des définitions utiles concernant les propriétés physiques des produits d'isolation et des éclairages sur les exigences et indicateurs en matière de durabilité, de réaction au feu ou d'impact environnemental et sanitaire.

Les isolants disponibles sur le marché sont de sources très diverses (minérales, végétales, synthétiques...) et se présentent sous des formes très variées (panneaux rigides, vrac, rouleaux...). Plusieurs critères caractérisent un isolant sont présentés par la suite.

#### **4.1. Isolation est-elle nécessaire**

La fonction première des matériaux d'isolation thermique utilisés sur les bateaux de pêche artisanale qui emploient de la glace est de limiter les échanges de chaleur à travers les parois de la cale à poisson. En limitant les infiltrations de la chaleur, on réduit la fusion de la glace, ce qui accroît d'autant l'efficacité du glaçage. L'isolation des parois permet de réduire la quantité de chaleur qui pénètre dans conteneur, et donc de limiter la quantité de

glace nécessaire pour garder les produits stockés constamment réfrigérés. Cette isolation présente les avantages suivants :

- ✓ empêcher les transferts thermiques provenant de l'air ambiant et de la salle des machines ainsi que les entrées de chaleur.
- ✓ Optimiser la capacité utile de la cale ainsi les coûts de réfrigération du poisson.
- ✓ Contribuer à limiter les besoins énergétiques des systèmes de réfrigération éventuellement installés à bord [1,2].

Après ça l'utilisation des isolants déplacés vers une autre branche est l'habitat.

La réduction des consommations d'énergie dans le bâtiment est un enjeu majeur pour faire face à la raréfaction des ressources énergétiques fossiles et au problème du changement climatique. Pour répondre à ce défi, l'isolation des bâtiments est une nécessité et représente un moyen efficace et rentable avec deux méthodes d'isolations soit par l'isolation intérieure ou par l'isolation extérieure, chaque méthode ayant des avantages et des inconvénients. Tableau (1-4) [3]. Annexe (C).

Les matériaux d'isolation nous permettront d'avoir une vision la plus objective possible du panel de solutions d'amélioration thermique de notre bâtiment tel que l'isolation garanti la retenir de chaleur, est essentiel pour limiter les consommations d'énergie mais insuffisant pour assurer un bon confort thermique tout au long de l'année. Il faut également pouvoir stocker de la chaleur dans le bâtiment pour limiter les variations de température et valoriser au mieux les apports solaires gratuits. C'est la notion d'inertie thermique qui entre en jeu [4].

D'après ces informations nous avons vu leurs performance sur le confort d'énergie et minimiser la consommation énergétique dans les bâtiments alors on a pensé d'utiliser des isolants sur le capteur solaire plan et on va voir leur influence sur le performance énergétique et sur le rendement de ce capteur.

Pour nous aider à comparer et à choisir les matériaux adaptés à la paroi et au capteur à isoler.

#### **4.2. Critères hygrothermiques principaux**

La nécessité d'économiser l'énergie a entraîné un développement considérable de l'emploi des isolants dans les capteurs solaire plans. L'isolant doit limiter les pertes de chaleur en

hiver et permettre de maîtriser les gains solaires en été, les matériaux isolants permettent de freiner la chaleur qui traverse les parois extérieures par conduction. Parmi les critères caractérisent un isolant [1,2] :

- **Conductivité thermique**

Exprimée en  $(W/m \cdot ^\circ C)$  caractérise le comportement du matériau lors du transfert de chaleur par conduction, elle désigne la quantité de chaleur le (flux de chaleur) qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde. Cette valeur est propre à chaque matériau, elle permet de comparer la capacité à isoler de plusieurs matériaux de même épaisseur soumis à un degré d'écart entre ses deux faces. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant.

- **Résistance thermique**

La résistance thermique s'exprime en  $(m^2.K/W)$  est la capacité d'un produit à conserver la chaleur, et s'obtient par le rapport de l'épaisseur de l'isolant (en mètres) sur le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  ( $R=e/\lambda$ ). En connaissant ces deux valeurs, l'épaisseur d'isolant préconisée peut être calculée par la valeur de  $R$  qui permet de calculer l'épaisseur nécessaire pour isoler correctement les différentes parties de capteur. En effet, chaque matériau a une valeur propre de conductivité thermique  $\lambda$ . A partir de cette valeur, on peut calculer l'épaisseur demandée pour une valeur de résistance thermique  $R$  ( $e=\lambda.R$ ). La résistance thermique d'un matériau est d'autant plus importante que son épaisseur est grande et sa conductivité thermique faible. La résistance thermique est indiquée sur les emballages des isolants et détermine la qualité thermique des produits. Lorsque l'on utilise plusieurs isolants, leurs valeurs de  $R$  s'additionnent.

- **Coefficient de transmission surfacique**

Il est utilisé pour caractériser une paroi dans sa globalité avec l'ensemble des matériaux qui la compose. Il représente le flux de chaleur qui traverse  $1m^2$  de paroi pour une différence de température de  $1^\circ C$  entre l'extérieur et l'intérieur du capteur. Il s'agit simplement de l'inverse de la résistance thermique  $R$ . Plus le coefficient de transmission surfacique est faible plus la paroi est isolante.

- **Masse volumique ou la densité**

La Densité ( $\rho$ ), exprimée en  $(kg/m^3)$ . Permet d'évaluer le comportement d'un matériau face à la propagation de chaleur, car plus cette valeur est élevée plus le matériau

sera capable d'emmagasiner la chaleur et donc de la retenir. Par ailleurs cette information permet d'adapter un matériau à un choix d'application. Pour garantir la durabilité d'un complexe d'isolation en accroche verticale ou en extérieur, il est préférable de choisir un isolant à haute densité pour une meilleure stabilité.

- **Chaleur spécifique**

Exprimée en  $(J/kg.K)$ . La chaleur spécifique d'un matériau est sa capacité à stocker de la chaleur par rapport à son poids.

- **Capacité thermique**

La capacité thermique (volumique) d'un matériau représente la quantité totale de chaleur que  $1\text{ m}^3$  de matériau est capable de stocker pour une augmentation de température de  $1\text{ }^\circ\text{C}$ . Elle est exprimée par le produit de la densité du matériau ( $\rho$  en  $\text{kg/m}^3$ ) et de sa chaleur spécifique  $(J/kg.K)$ . Elle est donc notée  $\rho c$ , et exprimée en  $(KJ/m^3.K)$ . Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus il est capable de stocker de la chaleur.

- **Diffusivité thermique**

La diffusivité thermique d'un matériau est associée à la vitesse à laquelle celui-ci monte en température lorsqu'il est soumis à une source de chaleur. Elle se calcule par le rapport  $\lambda/\rho c$  et s'exprime en  $\text{m}^2/\text{s}$ . Plus la diffusivité thermique est élevée, plus la température du matériau évoluera rapidement.

- **Effusivité thermique**

L'effusivité thermique d'un matériau est associée à la quantité de chaleur que le matériau est capable d'absorber lorsqu'il est soumis à une source de chaleur pendant un certain temps. Elle est calculée par la relation  $(\lambda.\rho c)^{1/2}$  et s'exprime en  $J/(m^2.K.s)^{1/2}$  Ou  $(\frac{W}{m^2}.K^1.s)^{1/2}$ . Plus l'effusivité thermique est élevée, plus la quantité d'énergie absorbée par le matériau en un certain temps est grande. L'effusivité thermique est aussi liée à la température de contact, et un matériau ayant une effusivité faible sera « chaud » au toucher superficielles. Celles-ci offriront une forte inertie si les matériaux qui la composent ont une effusivité élevée et une diffusivité basse. En effet, pouvoir échanger de grandes quantités de chaleur n'a pas un grand intérêt si ces échanges sont trop rapides. La notion de temps est ici fondamentale, c'est ainsi que l'on parle de comportement dynamique.

- **Inertie thermique :**

Exprime le potentiel de stockage de la chaleur ou de la fraîcheur d'un local. Les composants à forte inertie conservent une température stable et se réchauffent ou se refroidissent très lentement alors que celles à faible inertie suivent sans amortissement ni retard les fluctuations de température. On parle d'inertie de transmission pour les parois soumises à l'exposition solaire et d'inertie d'absorption pour les parois internes ou périphériques.

Pour caractériser l'inertie d'une paroi complète, il faut étudier le comportement de celle-ci face à des sollicitations dynamiques, Plus l'inertie d'une paroi sera élevée, moins une variation brusque de température influencera la température des couches superficielles au cours d'une période donnée. De même, plus l'inertie d'une paroi sera élevée, plus elle aura d'atténuer l'amplitude des variations de température (amortissement) et de retarder les pics de chaleur ou de froid (déphasage). Quantifier l'effet de l'inertie est donc relativement complexe, mais il est indéniable que l'inertie a une influence non négligeable sur le sentiment de confort [1-2].

### 4.3. Qualités recherchées

Les matériaux de gros œuvre doivent conférer de bonnes qualités d'isolation et d'accumulation de la chaleur pour atténuer les variations de température extérieure au cours de la journée : c'est l'inertie. La chaleur emmagasinée pendant la journée par le capteur est restituée pendant la nuit. Cette caractéristique est définie par le temps de transfert. Plus celui-ci est grand, plus l'inertie est importante [5-6].

Un isolant doit présenter certaines caractéristiques telles que :

- ✓ un faible coefficient de conductivité thermique pour freiner l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur.
- ✓ une forte densité et une bonne aptitude à accumuler la chaleur.
- ✓ Propriétés économiques : coût du matériau, de sa mise en œuvre et selon le cas de sa maintenance, en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre.
- ✓ une bonne longévité.
- ✓ aucune nocivité afin de ne pas porter atteinte à la santé.
- ✓ leur possibilité d'être recyclés.

#### 4.4. Différents matériaux éligibles sont les suivants

On distingue trois familles des isolants [1-7].

##### 4.4.1. Isolants végétaux

###### ❖ Cellulose

La cellulose provient du papier recyclé, qui lui-même vient du bois. Ce recyclage demande peu d'énergie. Le papier est broyé afin d'être défibré, puis floconné et enfin il est mélangé à du sel de bore afin de l'ignifuger et de le rendre résistant aux insectes. Les matériaux se présentent soit sous forme de flocons en vrac, soit sous forme de panneaux isolants semi-rigides. Le coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,038 et  $0,044 \frac{W}{m.^{\circ}C}$



Fig. 4-1 Cellulose [1-7]

###### *Avantages*

- Provient de produit recyclé
- Sans effet négatif sur la santé.

###### *Inconvénients*

- Produit plus onéreux que les laines minérales mais qui présente, pour une isolation performante, un bon compromis technique, économique et environnemental.

###### ❖ Laine de coton

Le coton est originaire de Chine. La fibre de coton est utilisée comme matériau isolant depuis une quinzaine d'années. Les fibres ne reçoivent aucun traitement chimique, elles sont simplement cardées et reçoivent un traitement ignifugeant au sel de bore. Les matériaux se présentent sous forme de flocons en vrac, de rouleaux ou de panneaux en feutre. Le coefficient de conductivité thermique est en moyenne de  $0,04 \frac{W}{m.^{\circ}C}$



Fig. 4-2 Laine de coton [1-7]

### ***Avantages***

- Bon pouvoir hygroscopique
- Matériau renouvelable, réutilisable ou compostable.
- En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.

### ***Inconvénients***

- Coût plus élevé que les autres isolants végétaux (chanvre, lin), mais qui, eux, sont issus d'une agriculture locale.

#### **❖ Chanvre**

Le chanvre est utilisé depuis plusieurs siècles dans un certain nombre de domaines, comme la conception de textile ou la fabrication de papier. Mais plus récemment (courant des années 1970 en France) le chanvre est devenu également un matériau de construction et d'isolation. Comme isolant, le chanvre se présente sous différentes formes : en vrac, en rouleaux ou bien encore en panneaux. Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,039 et 0,042  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  suivant sa forme et sa composition.



Fig. 4-3 chanvre [1-7]

### **Avantages**

- Peut être utilisé à la fois pour les travaux de construction ou de rénovation (béton de chanvre...) et les travaux d'isolation (laine de chanvre).
- Résistance aux insectes, aux rongeurs et aux champignons.
- Sans effet négatif sur la santé.
- En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.

### **Inconvénients**

- Produit plus onéreux que les laines minérales, mais qui présente, pour une isolation performante, un bon compromis technique, économique et environnemental.

### ❖ **Bois**

Le bois comme isolant se présente également sous différentes formes : laine de bois (panneau semi-rigide, en vrac...), panneau de fibres de bois rigides ou encore des fibraglos (fibres de bois avec enrobage de plâtre et ciment). Les déchets des scieries sont la matière première du panneau de bois. Les fibres sont pressées et séchées pour donner des produits à fibres tendres ou dures. La fabrication se fait naturellement, sans produit ajouté. Ces panneaux peuvent être posés pour la toiture, les murs (le plus souvent comme isolant complémentaire), les cloisons intérieures et pour l'isolation acoustique et thermique des planchers. Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,042 à 0,070  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  selon la forme utilisée.



Fig. 4-4 bois [7]

### **Avantages**

- Facilité de pose.
- Assure une bonne isolation acoustique.
- Matériau renouvelable de grande disponibilité.

### ***Inconvénients***

- Coût élevé.

#### **❖ Laine de coco**

La laine de coco est issue de la bourre entourant le péricarpe des noix de coco. Cette matière première est utilisée depuis plus d'un siècle dans la fabrication de meubles, de tapis ou de sièges. Utilisées depuis une trentaine d'années pour l'isolation, les fibres de coco sont cardées et reçoivent un traitement ignifugeant au sel de bore. La laine de coco peut se présenter en vrac, en rouleaux ou bien encore en panneaux semi-rigides. Le coefficient de conductivité thermique de la laine de coco est compris entre 0,047 à 0,050  $\frac{W}{m.^{\circ}C}$  suivant la forme employée.



Fig. 4-5 laine de coco [7]

### ***Avantages***

- Sans effet négatif sur la santé.
- Matériau naturel, renouvelable et réutilisable ou compostables.
- En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.

### ***Inconvénients***

- Coût supérieur à celui des autres isolants végétaux (chanvre, lin), qui, eux, sont couramment issus d'une agriculture locale, voire biologique dans certains cas.

#### 4.4.2. Isolants végétaux

##### ❖ Lin

Le lin est utilisé dans les textiles depuis l'Antiquité. Le lin est la fibre naturelle la plus résistante et la plus légère qui existe, elle isolait autrefois les maisons romaines. Aujourd'hui, le lin est cultivé principalement dans le nord de la France, et est un sous-produit de l'industrie textile. L'utilisation du lin comme isolant se présente sous différentes formes suivant les applications : en vrac, en rouleaux, en panneaux semi-rigides, en panneaux plus rigides pour les cloisons, en feutre (acoustique) ou en paillettes (béton de lin). Le coefficient de conductivité thermique est de 0,035 (en vrac) à 0,05 (rouleaux)  $\frac{W}{m.^{\circ}C}$ .

##### *Avantages*

- Bon pouvoir hygroscopique.
- Sans effet négatif sur la santé.
- En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.
- Ressource renouvelable ; matériau réutilisable.

##### *Inconvénients*

- Coût élevé.

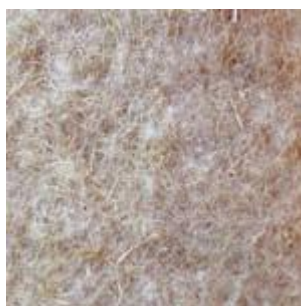


Fig. 4-6 Lin [7]

##### ❖ Liège

Le liège pur expansé est issu de l'arbre chêne-liège. Le liège est résistant à la compression et indéformable. Ni les rongeurs ni les insectes ne l'apprécient. Le liège est également un très bon isolant phonique. Les plaques de liège expansé se posent et se découpent facilement. Le liège est utilisé sous différentes formes : en vrac, en panneaux ou bien encore en éléments composites préfabriqués. Le coefficient de conductivité thermique du liège est de 0,032 à 0,045  $\frac{W}{m.^{\circ}C}$ .



Fig. 4-7 Liège [1,7]

### *Avantages*

- Sans effet négatif sur la santé.
- Matériau renouvelable, naturel, et réutilisable.
- Non consommable par les prédateurs, mais les rongeurs peuvent s'en servir pour nidifier.

### *Inconvénients*

- Coût élevé supérieur à celui des autres isolants végétaux (chanvre, lin), qui, eux, sont couramment issus d'une agriculture locale, voire biologique dans certains cas.
- Matériau renouvelable mais de faible disponibilité.

#### **4.4.3. Isolants d'origine animale**

##### **❖ Laine de mouton**

La laine de mouton a des qualités d'isolation thermique et de régulation naturelle liées à la constitution de ses fibres. Les produits de tonte sont d'abord lavés au savon et à la soude pour éliminer les impuretés et surtout le suint. Ensuite la laine reçoit un traitement insecticide et un traitement contre le feu, à base de sel de bore. Le coefficient de conductivité thermique varie de  $0,032$  à  $0,045 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ , selon la densité et les formes proposées.



Fig. 4-8 Laine de mouton [7]

### ***Avantages***

- Facile et rapide à poser partout.
- Peut se découper à la main, comme un tissu.
- Bon pouvoir hygroscopique.
- Ressource renouvelable ; Matériau durable et réutilisable.
- En cas d'incendie, pas de dégagements toxiques.

### ***Inconvénients***

- Coût élevé au regard de cette matière première de proximité.

#### **4.4.4. Isolants minéraux**

##### **❖ Laine de verre et la laine de roche**

La laine de verre est fabriquée au moyen de verre de récupération et de sable siliceux et obtenue par fusion de ces matières à environ 1 500 °C. La fabrication de la laine de roche nécessite, quant à elle, des roches volcaniques comme le basalte. Leur coefficient de conductivité thermique est en moyenne de 0,032 à 0,04  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ .

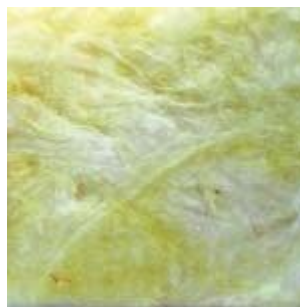


Fig. 4-9 Laine de verre [7]



Fig.4-10 Laine de roche [1]

### *Avantages*

- Imputrescibles.
- Non consommables par les rongeurs.
- Coût faible de ce matériau.

### *Inconvénients*

- Matériau qui se tasse dans le temps.
- Ressource non renouvelable mais de grande disponibilité.
- Énergie grise importante (énergie nécessaire pour la production du matériau).
- Difficilement recyclable.
- Dégradable par les rongeurs.
- Risques connus ou non liés à la santé : irritation de la peau et des voies respiratoires supérieures (inflammations, trachéites...).

## **4.4.5. Isolants synthétiques**

### **❖ Polystyrènes**

Le polystyrène expansé est fabriqué au moyen d'hydrocarbure (styrène) expansé à la vapeur d'eau et présente donc une structure à pores ouverts. Tableau (2.4) propriétés et caractéristiques de polystyrène expansé [8]. Annexe C.

Le polystyrène extrudé est soumis à un agent gonflant sous pression qui lui confère une structure à pores fermés. Tableau (3-4) propriétés et caractéristiques de polystyrène Extrudent [8]. Annexe C. Il se présente sous différentes formes : en vrac, en panneaux ou élément préfabriqués. Le coefficient de conductivité thermique pour le polystyrène

expansé est en moyenne de  $0,035 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  et de  $0,028 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  pour le polystyrène extrudé.

Annexe C.



Fig. 4-11 Polystyrène [7,8]

### **Avantages**

- Coût faible de ce matériau.
- Bonne performance thermique.
- Imputrescible.

### **Inconvénients**

- Aucune capacité de respiration.
- Ressource non renouvelable.
- Énergie grise importante (énergie nécessaire pour la production du matériau).
- Non recyclable.
- Dégradable par les rongeurs.

### **❖ Polyuréthane**

Fabriqué au départ sous forme de mousses. Celles-ci sont obtenues à l'aide de catalyseurs et d'agents propulseurs à base d'iso-cyanates, avec des adjuvants pour stabiliser ou pour ignifuger. Ce sont des mousses à cellules fermées et peu compressibles.

Il se présente sous différentes formes : en panneaux, élément préfabriqués, mousses. Le coefficient de conductivité thermique pour le polyuréthane est en moyenne de  $0,025 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  pour les panneaux et de  $0,03 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  pour les mousses.



Fig. 4-12 Polyuréthane [7]

**Avantages**

- Coût faible de ce matériau.
- Bonne performance thermique.
- Imputrescible.

**Inconvénients**

- Aucune capacité de respiration.
- Ressource non renouvelable.
- Énergie grise importante (énergie nécessaire pour la production du matériau).
- Non recyclable.
- Dégradable par les rongeurs

**❖ Terre de paille**

Simple à réaliser, la fabrication de briques de terre ne nécessite ni cuisson, ni traitement chimique est un matériau écologique qui ca grâce à sa forte capacité thermique.



Fig.4-13 terre de paille [7]

**Avantages**

- Le cout faible
- Recyclable
- Forte capacité

## 4.5. Conclusion

Lors d'un choix de matériau d'isolation, il est intéressant, dans une démarche d'écoconstruction, de ne pas limiter ses critères de choix aux seules performances thermiques du matériau. Le choix d'un isolant devrait se faire sur base des critères suivants : propriétés thermiques, propriétés techniques, propriétés environnementales et propriétés économiques.

Ce chapitre traite des matériaux d'isolation thermique et de leurs particularités. Pour les aspects purement énergétiques de l'isolation.

Une bonne isolation thermique c'est plus de confort et une meilleure qualité de vie, pour vous et votre environnement

### Référence

- [1] J. P. Oliva, livre de L'isolation écologique, Éditions Terre Vivante. (2001)
- [2] Guide pratique ADEME, L'Isolation thermique, Centre ressources (documents divers), CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), ANAH (Agence Nationale de l'Habitat).
- [3] Guide de l'écoconstruction, l'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, L'ADEME et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse. (2006).
- [4] Guide D'aide a la conception, Isolation Thermique par l'intérieur des murs existant en brique pleines, la cellule de recherche Architecture et Climat, dans le cadre de la recherche ISOLIN. (2011).
- [5] F. Kur, livre de L'habitat écologique, Quels matériaux choisir, édition Terre vivante, (2003).
- [6] J. Schwartz, V. P. Haupt, Qualité environnementale des bâtiments, guide comparatif pour le choix des matériaux de construction, (1998).
- [7] O. Arup, Partners, The green construction handbook, a manual for clients and construction professionals, JT design Build Publication, (1994)
- [8] Nouvelle Réglementation Thermique RT 2012, Le Réseau des Espaces Info Energie en Auvergne (ADEME), l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

---

# Chapitre

## 5

### *L'effet des isolants thermiques sur les performances du capteur solaire plan Etude expérimentale*

---

Le solaire thermique permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires. Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions. Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. La main d'œuvre ne nécessite qu'une formation complémentaire aisément maîtrisable [1].

L'amélioration des performances des capteurs solaires plans consiste à limiter les pertes thermiques entre l'absorbeur et l'environnement. Dans la présente contribution, nous nous sommes intéressés par l'étude expérimentale des isolants thermiques d'un capteur solaire plan destiné au chauffage d'eau et pour ce faire nous avons établi un modèle mathématique basé sur la méthode des bilans thermiques. Cette performance peut être atteinte en optimisant d'une part, les coefficients de transfert convectifs entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur et d'autre part, en réduisant les pertes thermiques à travers les différents composants du capteur solaire.

Cependant plusieurs matériaux (isolants) ont été installés (utilisés) pour mesurer les données relatives à la performance thermique, nous avons traité l'effet de des isolants sur les performances thermiques de ce capteur, qui ont été analysées.

### 5.1. Présentation du banc d'essais

Le capteur solaire étudié est conçu au laboratoire de génie mécanique de l'université Mohamed BOUDIAF M'sila. Dans ce banc d'essai de l'énergie solaire on chauffe de l'eau par conversion de l'énergie solaire en chaleur. Le rayonnement solaire est remplacé par une lampe halogène ajustable en hauteur d'une puissance de 1000W.

Le système est équipé de senseurs (instruments de mesure) pour mesurer les températures, les valeurs des mesures sont affichées digitalement sur le ban.

Le capteur plan est ajustable, on peut choisir son angle d'inclinaison (entre  $0^\circ$  et  $60^\circ$ ).

L'eau chauffée par l'absorbeur arrive dans un réservoir par l'intermédiaire d'un échangeur.

Un circuit secondaire externe peut être utilisé par l'évacuation de la chaleur dans le cas où la température de l'absorbeur est excessive.

La circulation du fluide caloporteur est assurée par une pompe de circulation et le débit est réglé un robinet régulateur, comme il est représenté schématiquement sur la figure (5-1)

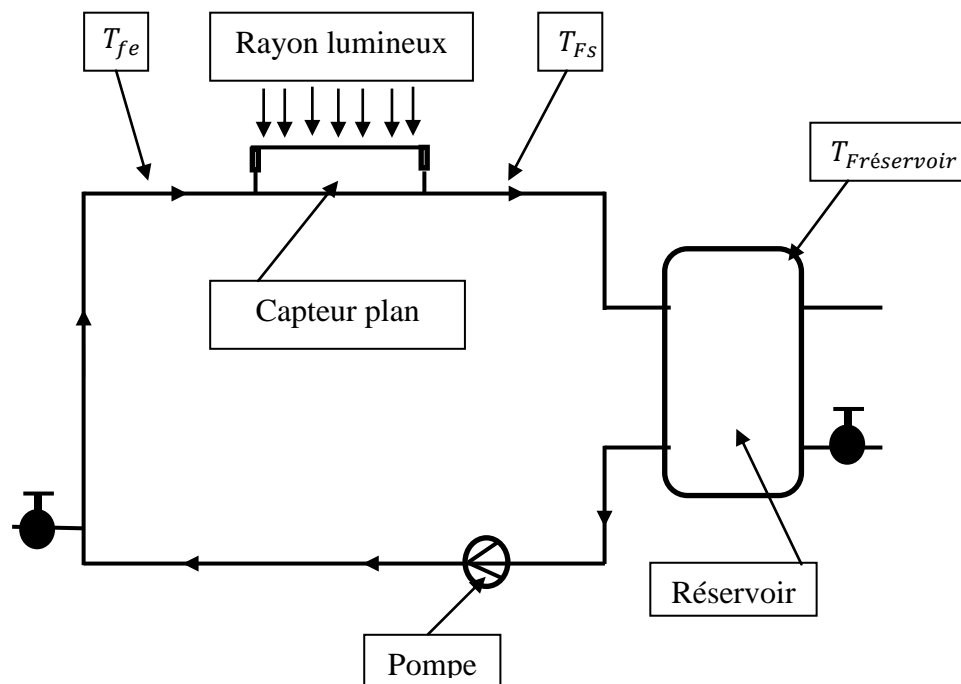


Fig. 5-1 Schéma de l'installation du capteur plan

### 5.1.1. Élément constitue du capteur plan

Le capteur thermique que nous étudions est représenté sur la figure (5-2) il est constitué d'un vitrage simple en verre qui réalise l'effet de serre nécessaire pour échauffer l'absorbeur qui est à base du cuivre, d'une couche d'isolation en arrière du capteur, elle permet de meilleurs performances thermiques, elle est assurée par du : polystyrène, brique de terre, miroir, laine de verre.

- ✚ **Terre de paille** : simple à réaliser, la fabrication de briques de terre ne nécessite ni cuisson, ni traitement chimique est un matériau écologique qui ca grâce à sa forte capacité thermique.

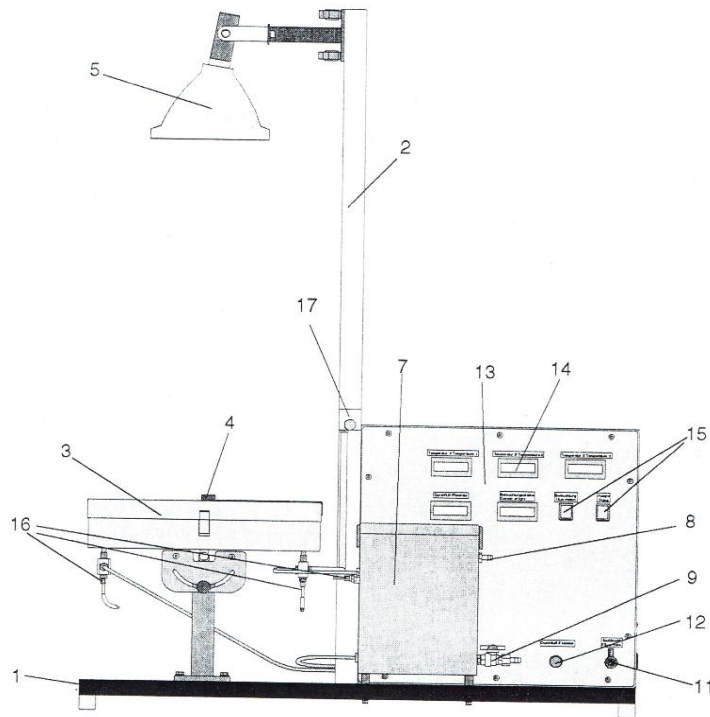


Fig. 5-2 Vue globale de l'installation

- 1** La base ; **2** Fixateur de Lompe pour un meilleur ajustement
- 3** Plan Collectionneur avec un support réglable ; **4** Héliomètre
- 5** Lompe ; **6** Débit mètre ; **7** Réservoir d'eau chaude ; **8** Échappatoire d'eau chaude
- 9** vanne de décharge d'eau chaude ; **10** Pompe ; **11** Vanne de décharge pour le circuit primaire ; **12** Vanne de réglage de débit volumique ; **13** Boite d'échange
- 14** Affichage digitale pour les valeurs sensibles ; **15** Bouton de lompe et le circuit primaire ; **16** Thermocouple ; **17** Broche de connexion.

Les paramètres caractéristiques du capteur plan sont donnés au tableau (5-1).

Tableau 5-1 Paramètre caractéristiques du capteur solaire [2]

Paramètre	Caractéristique
Cadre extérieur	Profile d'aluminium anodise
Dos du capteur	Tôle galvanisée $\varnothing$ 0,6 mm
Isolation arrière	Polystyrène, épaisseur = 50 mm.
Isolation latérale	Polystyrène, épaisseur = 18 mm
Absorbeur	Ailette en cuivre $\varnothing=0.2$ mm sélectif à base de étain
Tuyaux de l'absorbeur	Tuyaux en cuivre, $\varnothing$ 10 et $\varnothing$ 22
Couverture	Verre simple, épaisseur = 3 mm

### 5.1.2 Description des essais expérimentaux fait sur le capteur plan thermique

Les essais que nous avons faits sur le capteur été en plusieurs étapes.

- S'assure que le circuit primaire et le réservoir sont alimentés correctement en eau
- Régler le capteur thermique plan sur l'inclinaison demandée ( $\gamma = 0$ ).
- Mettre en marche la lampe puis régler sa hauteur
- Mettre en marche la pompe de circulation
- Relever la température ambiante.
- Attendre environ 5mn avant de prendre les mesures
- Choisir un pas de temps pour prendre les mesures (5mn)
- Refaire les mêmes essais quant en changeant l'isolant sur le capteur plan.

En raison de l'inertie du capteur il est nécessaire avant de prendre les mesures d'attendre environ 5mn pour atteindre les conditions de stabilité. La précision des mesures augmente avec la réduction de  $(T_{fs} - T_{fe})$ , pour cela il est recommandé que le débit ne doit pas dépasser  $7l/h$ .

## 5.2. Analyse théorique

Les capteurs solaires fonctionnent dans les états équilibrés (régime thermique établi). Dans ces conditions, les performances d'un capteur solaire sont décrites par le modèle du bilan énergétique global suivant la figure (5-3).

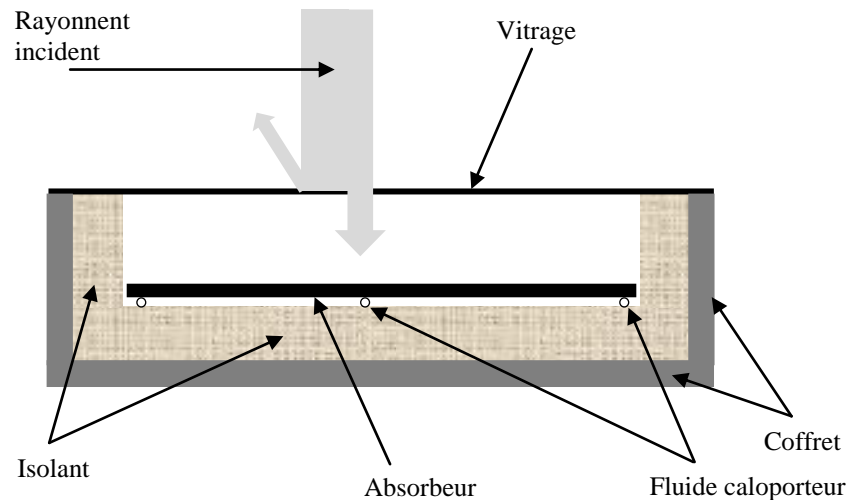


Fig. 5-3 Coupe d'un capteur solaire plan à eau.

$$Q_{sa} = Q_u + Q_p + Q_{st} \quad (5.1)$$

En négligeant l'énergie thermique stockée dans les différents composants du capteur (inertie thermique), on obtient:

$$Q_{sa} = Q_u + Q_p \quad (5.2)$$

La quantité d'énergie utile à l'échauffement du fluide caloporteur extraite de la chaleur récupérée par un capteur solaire peut être exprimée par:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (5.3)$$

$T_{fe}$  : Est la température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur

$T_{fs}$  : Est la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur

$\dot{m}$  : Est le débit massique du fluide caloporteur

$C_p$  : Est la capacité calorifique de l'eau elle est égale à  $4.18 \text{ KJ/Kg.K}$

En introduisant le coefficient de perte global vers la face arrière de l'absorbeur  $U$  (pertes entre l'absorbeur et l'isolant) le gain d'énergie utile fourni par l'absorbeur peut être exprimé par.

$$Q_u = A_c(I_s(\tau_V \cdot \alpha_{abs}) - U(T_{capteur} - T_{amb})) \quad (5.4)$$

Où le coefficient de perte global :  $U = \frac{Q_p}{A_c(T_{capteur} - T_{amb})}$ ;  $T_{capteur} = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2}$

Le rendement du capteur thermique est défini comme le rapport entre la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur  $Q_u$  et la puissance du rayonnement solaire incident  $I_s$  [3].

$$\eta = \frac{Q_u}{I_s} \quad (5.5)$$

Avec

$$I_s = A_c \cdot E \quad (5.6)$$

$E$  : est la puissance du rayonnement par unité de surface  $W/m^2$ , elle est mesurée par l'héliomètre.

$A_c$  : Est la surface du capteur thermique, elle est égale à  $0.1088 m^2$ .

### 5.3 Conception et expérimentation

La partie expérimentale a été réalisée au niveau laboratoire de génie mécanique à l'université de Mohamed BOUDIAF. Les caractéristiques des différents composants du capteur plan sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5-2 Caractéristiques des éléments du capteur à eau

Composants	Caractéristiques	Valeur	Unité
Dimension (Boitier en aluminium anodise)	Longueur	0.34	$m$
	Largeur	0.32	$m$
	Ecartement vitre-absorbeur	0.033	$m$
	Epaisseur du capteur	0.088	$m$
	Surface	0.1088	$m^2$

Vitre (en verre simple)	Longueur	0.32	<i>m</i>
	Largeur	0.30	<i>m</i>
	Epaisseur	0.003	<i>m</i>
Plaque (l'Absorbeur) (en cuivre)	Longueur	0.30	<i>m</i>
	Largeur	0.229	<i>m</i>
	Epaisseur	0.005	<i>m</i>
Isolant (en polystyrène)	Longueur	0.33	<i>m</i>
	Largeur	0.297	<i>m</i>
	Epaisseur	0.05	<i>m</i>
Isolant (en brique de terre) « surface latérale »	Longueur	0.272	<i>m</i>
	Largeur	0.0379	<i>m</i>
	Epaisseur	0.0233	<i>m</i>
Isolant (en miroir)	Longueur	0.296	<i>m</i>
	Largeur	0.296	<i>m</i>
	Epaisseur	0.003	<i>m</i>
Isolant (en laine de verre)	Longueur	0.33	<i>m</i>
	Largeur	0.31	<i>m</i>
	Epaisseur	0.004	<i>m</i>
Le capteur plan fonctionne avec un débit d'eau constant égale $7l/h$ pour tous les essais, une température ambiante $20^{\circ}C$ , et un angle l'inclinaison ( $\gamma = 0$ ). Les tests ont été menés pendant le mois d'Avril 2017.			

#### 5.4 Résultats et discussions

Dans une série d'expériences au laboratoire de génie mécanique à l'université de Mohamed BOUDIAF, des résultats expérimentaux ont été obtenus à partir des tests réalisés sur les quatre isolants proposés (polystyrène, brique de terre, miroir, laine de verre). Nous avons testé les 4 isolants proposées avec un débit fixe  $\dot{m} = 7 l/h$ . Les résultats obtenus montrés sur les figures sont données pour une inclinaison du capteur  $\gamma = 0$  (capteur plan horizontale).

Ces expériences avaient pour objectif de répondre à la question suivante :  
Quelle est le meilleur matériau isolante il est choisi comme isolant ?

Pour cela on a utilisé quatre isolants :

Dans la premier expérience on a utilisé le polystyrène sur la surface inferieur et les surfaces latérales du capteur.

Dans la seconde expérience le polystyrène remplacé par terre de paille sur les surfaces latérales et on a laissé le polystyrène sur la surface inférieure du capteur.

Dans la troisièmes expérience on utilise le miroir au-dessus le polystyrène les deux comme isolant sur la surface inférieure du capteur et on pose le miroir sur les surface latérales du capteur.

A la quatrième expérience on utilise la laine de verre au-dessus le polystyrène les deux comme isolant sur la surface inférieure du capteur et on pose la laine de verre sur les surface latérales du capteur.

Chaque essai durait 70 minutes et le prélèvement des températures d'entrée de l'eau dans le collecteur  $T_{fe}$ , de sortie de l'eau du collecteur  $T_{fs}$ , température de réservoir  $T_{f\text{ réservoir}}$  ainsi que l'intensité du rayonnement incident reçu su la surface du collecteur se faisait chaque (05) minutes.

#### **5.4.1 Evolution des températures :**

La première interprétation des résultats issus des températures nous a conduits à tracer l'évolution de la température du sorti  $T_{fs}$ , la température du réservoir  $T_{f\text{ réservoir}}$  au cours de temps pour les différentes isolantes testées.

Les résultats obtenu est porté sur les figures (5.4) et (5.5).

##### **5.4.1.1 Evolution de température de sortie $T_{fs}$**

La chaleur transmis à l'eau qui circule dans l'échangeur thermique placé au-dessous de l'absorbeur se manifeste par l'augmentation de la température de l'eau à la sortie du collecteur solaire  $T_{fs}$ . D'après La figure (5.4), on remarque que ces élévations sont différent pour chaque isolant, elle est maximum pour la Laine de verre jusqu'à 35.9°C pour laine de verre par contre les autres isolants est environ 32°C. Ce qui permet de visualisé que le bon isolant est la laine de verre comparant par les autres isolants utilisés.

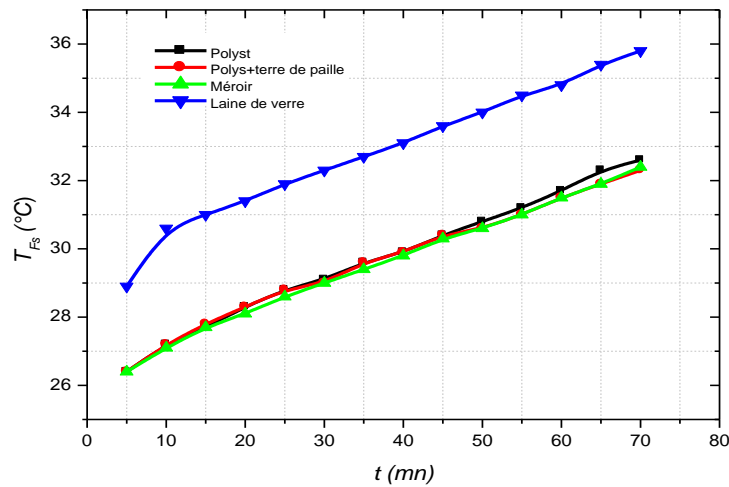


Fig. 5-4. Evolution de la température sortie fluide en fonction de temps pour les isolants testés.

#### 6.4.1.2. Évolution de température de réservoir $T_{f \text{ réservoir}}$

L'eau ainsi chauffée traverse un serpentin placé dans le réservoir d'eau froide où elle y cède une partie de son énergie, ce qui se traduit par l'augmentation de la température de l'eau du réservoir  $T_{f \text{ réservoir}}$ .

D'après le graphe dans la figure (5.5) l'eau du réservoir est la plus chauffée pour la Laine de verre, par rapport le miroir, le polystyrène et le polystyrène+ terre de paille. On remarque en même temps que les valeurs de  $T_{f \text{ réservoir}}$  pour les isolants saufs laine de verre elles presque identiques.

A titre d'exemple, à  $t=70$  min la température  $T_{f \text{ réservoir}}$  est de  $32.1^{\circ}\text{C}$  pour la laine de verre, elle descend à  $29.1^{\circ}\text{C}$  pour le polystyrène, elle prend la valeur de  $28.8^{\circ}\text{C}$  pour le terre de paille et le miroir.

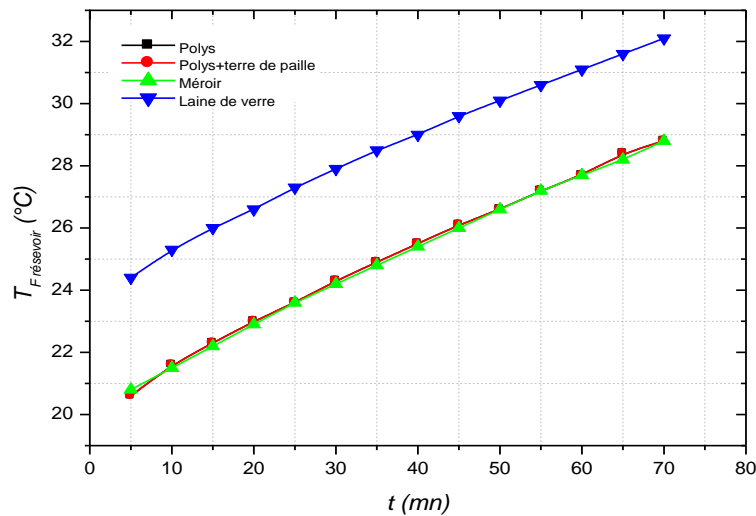


Fig. 5-5. Evolution de Température d'eau dans le réservoir en fonction de temps pour les différents isolants testés.

#### 5.4.1.3. Evolution de l'écart de température de sortie et d'entrée

On a étudié l'évolution de la différence de température ( $T_{fs} - T_{fe}$ ) en fonction de temps pour les différentes isolants testées, cette figure définit la stabilité des mesures.

On remarque que toutes les courbes obtenues ont la même allure qui peut être divisée en deux phases distinctes :

- ✓ La première de 0 à 25min appelée phase transitoire, au cours de laquelle la différence de température varie « augmente » d'une façon non linéaire avec le temps;
- ✓ La deuxième allant de 25min jusqu'à 70min où la différence de température se diminue légèrement ce qui implique que les conditions de stabilité sont atteintes, et la précision des mesures augmente avec la réduction de température sortie entrée.

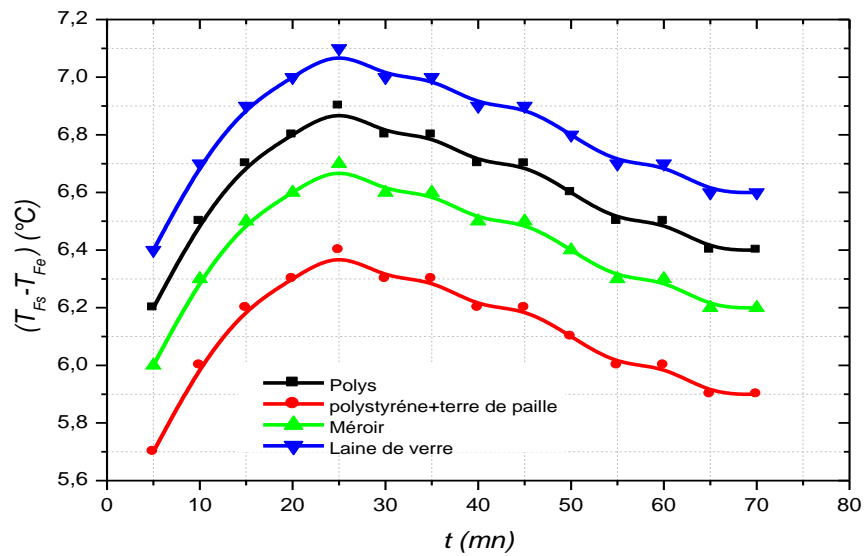


Fig. 5-6. Evolution de l'écart de la température entrée sortie eau en fonction de temps pour les différents isolants testés.

### 5.5. Evolution de la puissance utile $\varphi_u$

La figure (5-7) présente l'évolution de la puissance utile en fonction de temps pour les différents isolants testés.

La différence de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du collecteur solaire ( $T_{fs} - T_{fe}$ ) témoigne sur l'énergie thermique utile transmise à l'eau à ce niveau (capteur solaire), Alors quand l'écart de température sortie entrée augmente l'énergie thermique augmente et quand l'écart de température sortie entrée diminue l'énergie thermique diminue, donc ils ont la même allure. On constate également que la puissance utile est plus élevée pour laine de verre, contrairement, plus faible pour la terre de paille plus le polystyrène et le miroir.

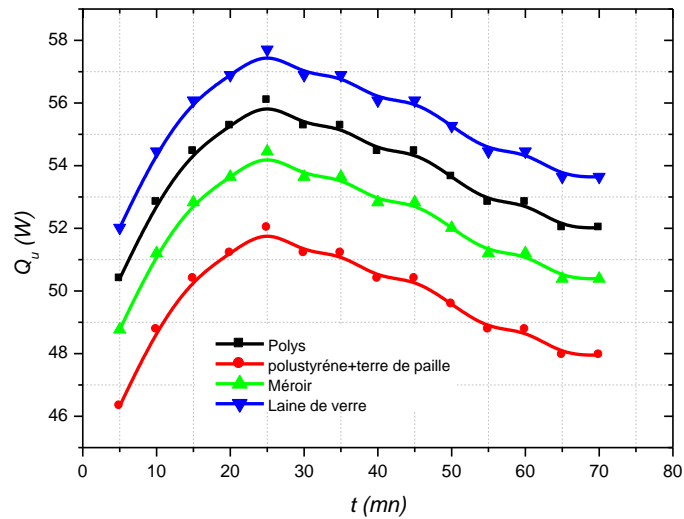


Fig. 5-7. Evolution de la puissance utile en fonction de temps pour les différents isolants testés.

### 5.6. Evolution de la puissance de perte $\varphi_p$

Fig. (5-8). Présente évolution de la puissance perdue en fonction de temps pour les différents isolants testés. On remarque que la puissance perdue pour les quatre courbes varie dans le même sens c'est-à-dire diminué de 5 jusqu'au 25 min et augmenté à partir 25 min à 70 min puisque d'après le bilan énergétique la puissance perdue est la différence entre la puissance d'absorption et la puissance utile.

La perte la plus importante se trouve quand on utilise la terre de paille plus le polystyrène malgré le brique de terre ayant une forte capacité thermique, (nous avons utilisé la terre de paille sur les parois latérale seulement, dont on a déduire que les pertes par les parois latérales ne sont pas importants que les pertes sur la paroi inferieur u capteur). La comparaison entre ces résultats permet de donner une classification entres ces isolants, le meilleurs isolant est laine de verre, puis le polystyrène.

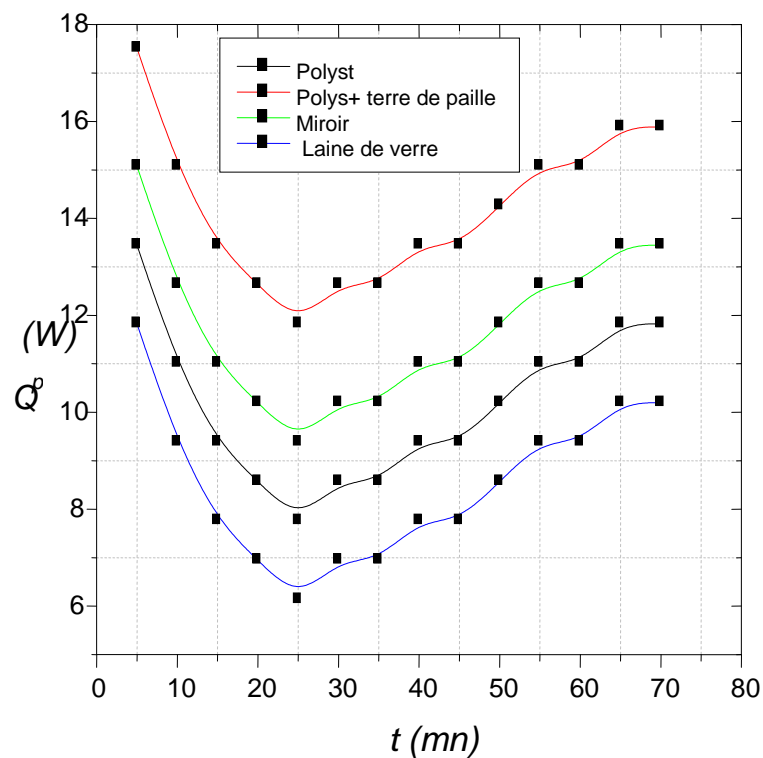


Fig. 5.8. Evolution de la Puissance perdue en fonction de temps pour les différents isolants testés.

### 5.7. Évolution de coefficient de perte U

La Figure (5-9) présente l'évolution de coefficient de perte global en fonction de temps pour les 4 isolants. On note que cette figure donne deux allures différentes :

- De 5 à 25mn, on remarque que le coefficient de perte diminue brusquement, puisque le régime est instable dans cette période de mesure, et elle confirme le rôle important de l'inertie du capteur.
- De 25 à 70mn, on note que le coefficient de perte presque constant (linéaire) surtout pour l'isolant laine de verre.

D'après les profils des coefficients des pertes simulées on apercevait bien que la laine de verre assure une bonne isolation.

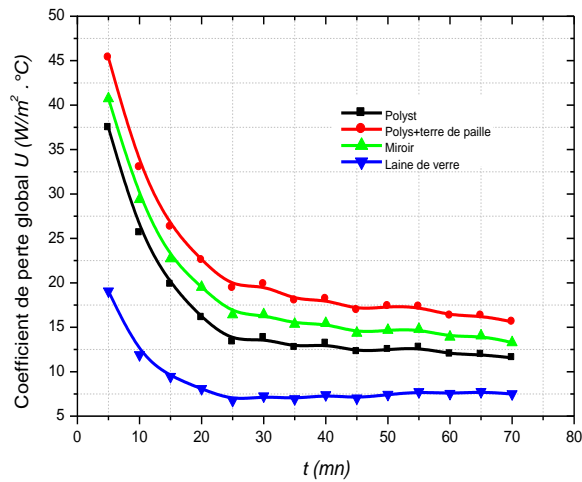


Fig. 5-9. Evolution de Coefficient de perte global en fonction de temps pour les 4 isolants.

### 5.8. Evolution de rendement

Le rendement thermique du capteur plan à eau montre dans la figure (5-10), on voit que pour une vitesse constante de fluide (débit massique constant) et une puissance du rayonnement solaire incident constante, le rendement thermique du capteur dépend de l'écart de la température du fluide. C'est-à-dire que lorsque l'écart de température augmente, il provoque une augmentation du rendement thermique.

Et on remarque aussi la superposition des profils de rendement pour les quatre isolants thermiques on apercevait bien que l'isolant laine de verre assure un bon rendement.

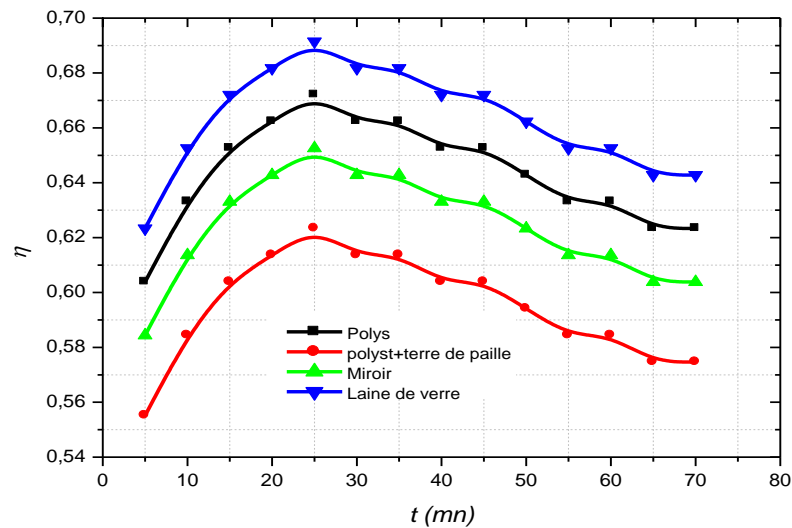


Fig. 5-10. Evolution de rendement en fonction de temps pour les 4 isolants.

### 5.9. Influence de température de sortie sur le rendement du capteur

Les figures (5-11) donnent un aperçu des rendements des différents isolants selon la température de sortie du capteur que l'on souhaite avoir :

- ❖ Pour le capteur à l'isolant miroir utilisé pour le chauffage d'eau à la température maximale admissible sortie capteur est de 28.6 °C.
- ❖ Les capteurs à l'isolant polystyrène, qui affichent un rendement de plus de 62.334 % pour les utilisations vers  $T = 28.8$  à  $32.6$  °C, trouvent une utilisation parfaite dans le domaine du chauffage d'eau sanitaire ou de chauffage. Une utilisation sous 62.334 % de rendement donc à des températures plus élevées ne ferait qu'augmenter inutilement les surfaces solaires nécessaires.

Le capteur à l'isolant laine de verre dont le rendement reste à plus de 64.24 % avec un  $T = 35.8$  °C est à privilégier pour des applications hautes températures que l'on peut trouver pour des applications industriels, alimentaires ou dans la climatisation solaire.

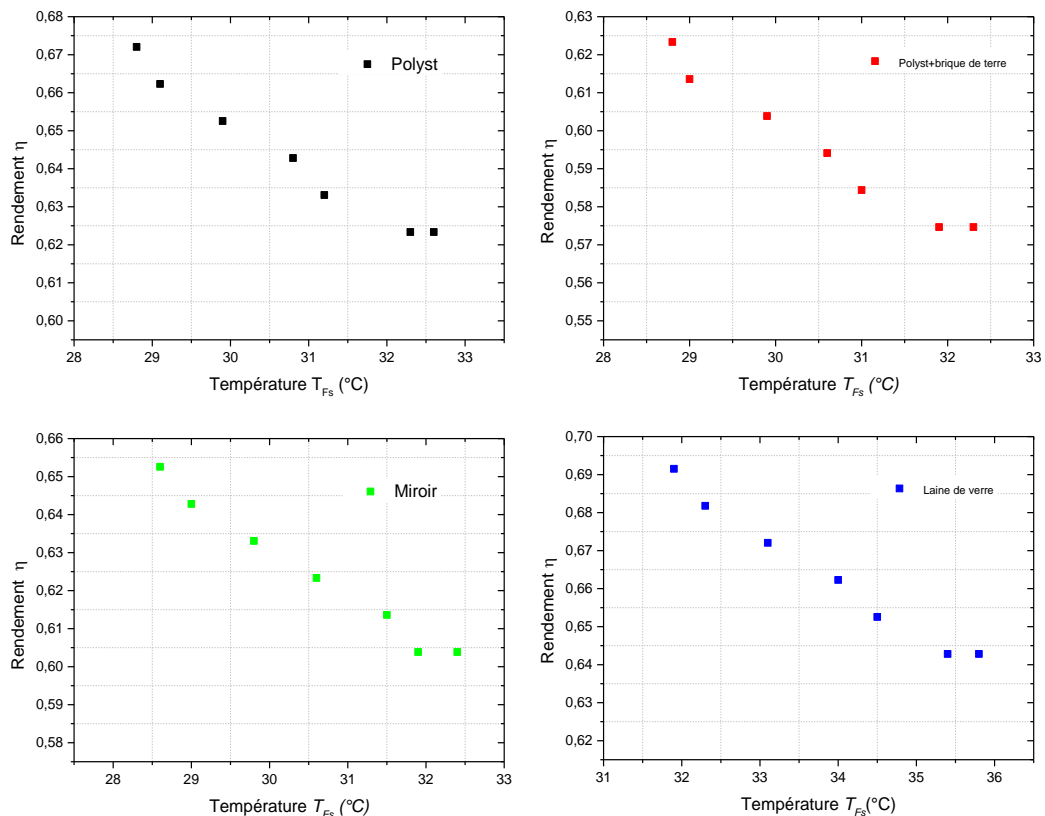


Fig. 5-11. Evolution du rendement de capteur en fonction de la température de sortie : (a) Polystyrène ;(b) Polystyrène+brique de terre ; (c) Miroir ; (d) Laine de verre

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre de notre travail nous sommes intéressé à l'étude expérimental des quelques isolants thermiques, nous avons élaboré les équations du bilan thermique de capteur thermique plan à eau, après nous avons fait les essais pour chaque isolant, enfin nous avons montres les résultats aboutis expérimentalement de chaque isolant présentées sous forme des graphes.

L'étude expérimentale des isolants sur les capteurs que nous avons faits permet d'étudier tous les aspects de ces capteurs (rendement, températures,...).

À travers ces exemples de température de sortie du fluide caloporteur pour les trois types des isolants thermiques pendant une durée de 70mn, on constate :

- le rendement du capteur plan thermique à eau diminue lorsque la température du fluide caloporteur augmente.

- le capteur plan thermique à laine de verre et à polystyrène nous donne un bon rendement pendant 70mn, mais pour les hautes températures l'isolant laine de verre est plus rentable que le polystyrène, (mais coût avantageux à des températures de fonctionnement plus élevées).

En fin, l'ajout des isolants a grandement amélioré les performances du capteur plan thermique à eau, et le calcul du coefficient de perte global, c'est un indicateur pour juger la qualité de meilleur isolant utilisable.

### **Référence**

- [1] R. Kharchi, N. Aït Messaoudène, M. Belhamelet, A. Hamid, Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct, Revue Energie R en Journées de Thermique, pp 115-119. (2001).
- [2] Marchetti C. and N, The Dynamics of Energy Système and the Logistic Substitution Model. IIASA -Report RR 79, (1979).
- [3] A. Guedira, A. Ben, ensoleillement naturel au Thermique, pp 79-84. (2001).

---

## *Conclusion générale*

---

Le capteur solaire est l'élément essentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, il capte le rayonnement solaire et le transforme sous forme de chaleur par effet de serre par des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption. Cette chaleur peut être utilisée dans le chauffage de l'eau sanitaire ou pour la climatisation des bâtiments. Il peut également transformer le rayonnement solaire en courant à l'aide de matériaux semi-conducteur appelés cellules solaires.

Le rendement des capteurs solaire thermique et photovoltaïque ou hybride (photovoltaïque thermique) reste encore faible, plusieurs facteurs influent sur la performance du capteur. Cela dépend de leur type d'exploitation, de l'amélioration du pourcentage de captation de rayonnement solaire.

Ce travail a permis de présenter en premier lieu une étude descriptive sur les différents types à capteur solaires plans, leurs caractéristiques et leurs paramètres de fonctionnement a permis de déterminer qu'avant de concevoir de tels dispositifs, il est d'une grande importance d'accorder une attention particulière à l'effet des paramètres opérationnels internes et externes sur les performances de ces capteurs solaires thermique.

Un calcul expérimental a été réalisé pour déterminer les pertes thermiques et le rendement de capteurs solaires plans, qui a permis de faire une analyse comparative de performance de quatre isolants proposé : polystyrène, polystyrène au-dessous l'absorbeur plus brique de terre sur les côtes, miroir, et laine de verre. Et pour faire le choix entre ces isolants pour une application donnée.

Les courbes de rendement des capteurs montrent que pour une puissance de rayonnement constant, les performances des capteurs baissent lorsque la température de sortie du fluide caloporteur est éloignée de la température ambiante après 25mn. Ceci est dû tout simplement aux déperditions thermiques qui augmentent avec la température (de manière linéaire pour les phénomènes de convection et conduction).

Il faut donc, pour tirer meilleur isolant de capteur, utiliser un isolant qui correspond le mieux aux niveaux de températures auxquels on veut travailler. Un capteur avec laine de verre aura un rendement supérieur à un capteur plan avec polystyrène ou miroir pour produire de l'eau à 36°C durant 70mn.

Le capteur plan a l'isolant la laine de verre ou polystyrène nous donne un bon rendement pendant 70mn mais, pour les hautes températures, le capteur avec laine de verre ou polystyrène est mieux rentable, avec le coût du capteur a autre isolant plus élevé pour une énergie solaire à température de fonctionnement moyenne (mais le coût est avantageux à des températures de fonctionnement plus élevées).

D'après le calcul pour le chauffage de l'eau sanitaire dans ce banc d'essai, on peut dire que le capteur utilisant l'isolant laine de verre donne un bon rendement entre  $0.62 < \eta < 0.64$  durant 70mn pour une température de sortie  $T_{fs} = 35.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , donc le capteur plan a l'isolant l'aine de verre est suffisant pour satisfaire le besoin quotidien de l'eau chaude sanitaire; en plus cet isolant est simple, moins chère que des autres isolants, et résistante à température élevée comparant par polystyrène.

En fin, on peut conclure que d'après les profils des températures simulées on apercevait bien que la laine de verre assure une bonne isolation.

Les perspectives à venir de ce travail sont :

- ✚ Etudier l'influence de vitre sur le rendement d'un capteur plan thermique à eau c'est-à-dire le capteur plan simple vitrage, le capteur à double vitrage, et le capteur sans vitrage du capteur plan thermique à eau utilisant laine de verre comme meilleur isolant.
- ✚ Etudier l'influence de corps absorbant sur le rendement du capteur plan thermique à eau utilisant laine de verre comme meilleur isolant.
- ✚ Etudier l'influence de la température ambiante sur le rendement avec laine de verre isolant.

- 
- ✚ Etudier l'influence de la surface solaire nécessaire pour avoir un bon rendement.
  - ✚ Etudier l'influence de débit massique sur le rendement du capteur plan thermique à eau.
  - ✚ Etudier l'effet de l'énergie solaire incident sur les performances d'un capteur plan thermique à eau.
  - ✚ Pour confirmer nos prédictions, une simulation numérique sera faire dans l'avenir.

**Annexe A**

Tableau 1-1. La valeur du facteur k pour les différents capteurs solaires plans [10]

Type de capteur	Valeur du coefficient k
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

Tableau 2-1. Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur [3].

Matière	Conductibilité (w/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Tableau 2-2 : propriétés de quelques revêtements sélectifs [3]

Revêtements sélectifs	$\alpha$	$\varepsilon$
Chrome noir	0.93	0.10
Nickel de nickel poli	0.92	0.11
Nickel noir sur le fer galvanisé	0.89	0.12
CuO sur Ir nickel	0.81	0.17
Co3O4 sur l'argent	0.90	0.27
CuO sur l'aluminium	0.93	0.11
CuO sur l'aluminium anodisé	0.85	0.11

Tableau 2-3. Propriétés de différentes surfaces transparentes [3]

Matière	Réflexion	Epaisseur (mm)	Transmittanc $e_{\lambda=0.4 \rightarrow 2.5 \mu}$ m	Transittance $\lambda=2.5 \rightarrow 40 \mu$ m	Cp (Kj/Kg. K)	$\rho$ (Kg /m <sup>3</sup> )
Verre	1.518	3.175	0.840	0.70200	0.754	2489
Fibre de verre Polyester renforcé	1.540	6.350	0.870	0.076	1.465	1399
Fibre acrylique (plexiglas)	1.490	3.175	0.900	0.020	1.465	1189
Polycarbonate (lexan)	1.586	3.175	0.840	0.020	1.193	1199
Polytétrafluoroéthylén e (teflon)	1.343	5.080	0.960	0.0256	1.172	2480
Fluorur de polyvinylidène (tedlar)	1.460	1.016	0.920	0.07	1.256	1379
Polyester (mylar)	1.460	1.270	0.870	0.178	1.046	1394
Fluorure de polyvinylidène (kynar)	1.413	1.016	0.930	0.230	1.256	1770
Polyéthylène	1.500	1.016	0.920	0.810	2.302	1189

Tableau 2.4 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [3].

<b>Matériau</b>	<b>Conductivité thermique (<math>w/m.k</math>)</b>	<b>Masse volumique (<math>kg/m^3</math>)</b>	<b>Chaleur massique (<math>j/kg.k</math>)</b>	<b>Diffusivité (<math>10^{-7}m^2/s</math>)</b>
<b>Air (à 20° c)</b>	<b>0.025</b>	<b>1.2</b>	<b>1003</b>	<b>208</b>
<b>Mousse de Polyuréthane</b>	<b>0.029</b>	<b>30</b>	<b>1600</b>	<b>6</b>
<b>Laine de verre</b>	<b>0.036</b>	<b>40</b>	<b>840</b>	<b>10.7</b>
<b>Polystyrène Expansé</b>	<b>0.040</b>	<b>20</b>	<b>1500</b>	<b>13.3</b>
<b>Papier journal Comprimé</b>	<b>0.105</b>	<b>130</b>	<b>1340</b>	<b>6</b>
<b>Bois de pin</b>	<b>0.118</b>	<b>500</b>	<b>1210</b>	<b>1.95</b>
<b>Plâtre</b>	<b>0.35</b>	<b>800</b>	<b>800</b>	<b>5.5</b>

**Annexe B**

Tableau 3-1. Répartition spectrale du rayonnement thermique [4].



	<b>UV</b>	<b>Visible</b>	<b>IR</b>
<b>Longueur d'onde (<math>\mu_m</math>)</b>	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu_m$	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu_m$	$0.78 < \lambda < 10 \mu_m$
<b>Pourcentage (%)</b>	6.4	48	45.6
<b>Energie <math>\frac{W}{m^2}</math></b>	87	656	623

Tableau 3-2. Albédo pour différentes surfaces [11].

<b>Type de surface</b>	<b>Albédo</b>
Surface de lac	0.02 à 0.04
Forêt de conifères	0.05 à 0.15
Forêt tropical	0.12
Herbe verte	0.25
Sable léger et sec	0.25 à 0.45
Sol sombre	0.05 à 0.15
Glace	0.30 à 0.40
Mer chaude	0.05
Mer froide	0.15
Neige tassée	0.60
Neige fraîche	0.85
Nuage	0.86
Verre à vitres	0.10

**Annexe C**

Tableau 4-1. Avantages et inconvénients de chaque types d'isolant. [3]

	<i>Isolation par l'intérieur</i>	<i>Isolation par l'extérieur</i>
<i>Schéma</i>		
<i>Avantages</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne modifie pas l'aspect extérieur de la maison</li> <li>- Prix réduit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regroupe les opérations d'isolation et de ravalement</li> <li>- Traite un grand nombre de ponts thermiques</li> <li>- Protège les murs des variations climatiques</li> <li>- Ne modifie pas la surface des pièces</li> </ul>
<i>Inconvénients</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduit la surface des pièces</li> <li>- Gênés éventuelles lors de l'ouverture et de la fermeture des portes et fenêtres</li> <li>- Mise en œuvre difficile si présence de prises, canalisations, équipements à démonter</li> <li>- Ne traite pas tous les ponts thermiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût supérieur</li> <li>- Modifie l'aspect extérieur</li> <li>- Technique moins employée</li> </ul>
<i>Solutions techniques</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Panneaux simples d'isolants protégés par une cloison de doublage</li> <li>- Panneaux composites constitués d'un parement de plâtre et d'un isolant</li> <li>- Panneaux sandwich où l'isolant est placé entre deux plaques de plâtre. Préconisés pour les murs humides ou irréguliers.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enduit mince sur isolant : collage sur le mur puis couverture avec un enduit spécifique armé de fibres de verre puis d'un enduit de finition</li> <li>- Enduit hydraulique sur isolant en remplacement d'un enduit mince, projeté sous forme de mortier</li> <li>- Parements sur isolant : isolant collé sur un support puis revêtements de carrelages, pierres minces ou panneaux de bardage</li> <li>- Vêtures : éléments préfabriqués comprenant un isolant et une plaque de parement.</li> </ul>

*Comparatif isolation intérieure et extérieure*

Tableau 4-2. propriétés et caractéristiques de polystyrène expansé [8].






<p><b>LE POLYSTYRENE EXPANSE « MATERIAU ISOLANT D'ORIGINE SYNTHETIQUE »</b></p> <p>Ces isolants sont produits par l'industrie du pétrole, le plus souvent à partir d'un ou de plusieurs dérivés du processus de raffinage. Issu du naphtha, le polystyrène expansé est obtenu par polymérisation des billes de styrène qui en sont issues avec de l'eau et du gaz pentane.</p> <p>Vu son déplorable bilan environnemental, l'utilisation du polystyrène n'est pas compatible avec une approche écologique de la construction.</p> <p>Il se conditionne sous forme de billes pour l'insufflation, dans les béton et enduits Légers ou éléments de maçonnerie allégés. Le domaine d'emploi le plus fréquent est les panneaux avec une plaque de plâtre comme doublage intérieur ou comme poutrelles/hourdis.</p> <p>Il existe aussi un PSE graphité de couleur grise et de <math>\lambda = 0.032 \text{ W/m.}^\circ\text{C}</math> utilisé pour l'isolation par l'extérieur, sa mise en œuvre doit être de la sorte à le protéger des ultraviolets.</p>	<p><b>Avantages :</b></p> <p><i>Matériau non altérable en présence d'eau.</i></p> <p><i>Matériau peu perspirant, non hygroscopique, non capillaire.</i></p> <p><i>Très bonne durabilité, stabilité dimensionnelle et résistance à la compression.</i></p> <p><i>Utilisable noyé sous chape liquide ou en parties enterrés.</i></p> <p><i>Mise en œuvre aisée et maîtrisée.</i></p> <p><i>Très bon isolant thermique.</i></p>
<p><b>Propriétés physiques du matériau</b></p> <p>LA CONDUCTIVITE THERMIQUE PEUT VARIER DE 0,028 A 0,038 W/m. °C LA DENSITE DU MATERIAU VARIE DE 10 A 30 KG/M<sup>3</sup></p> <p>LA CHALEUR SPECIFIQUE DU MATERIAU EST DE 1450 J/KG. °C LE COEFFICIENT DE DIFFUSION A LA VAPEUR VARIE ENTRE 20 ET 100</p>	<p><b>Inconvénients :</b></p> <p><i>Bilan carbone très mauvais et énergie grise élevée.</i></p> <p><i>Dégagement de pentane (pollution de l'ozone).</i></p> <p><i>Matière première limitée pétrole.</i></p> <p><i>Difficilement recyclable.</i></p> <p><i>Mauvaise performance phonique.</i></p> <p><i>Facilement dégradable par les rongeurs.</i></p> <p><i>Sensible au feu EUROCLASSE E, dégagement de gaz toxique en cas de coupe à chaud et risque grave en cas d'incendie.</i></p>
<p><b>Mise en œuvre et coût du matériau</b></p> <p>COUT <math>\approx 9,30 \text{ € LE M}^2</math> (EPAISSEUR DE 100MM)</p> <p>Epaisseur Mur : RT 2005= 10 cm et BBC = 16 cm Epaisseur Toiture : RT 2005 = 16 cm et BBC = 23 cm</p>	
<p><b>Références techniques (sur certains produits) :</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    <div data-bbox="895 1518 1054 1599"> <p><b>FDES</b> Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire</p> </div> </div>	

Tableau 4-3. Propriétés et caractéristiques de polystyrène Extrudent [8].





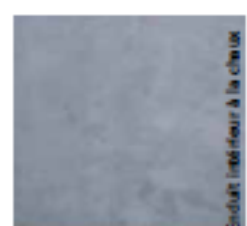
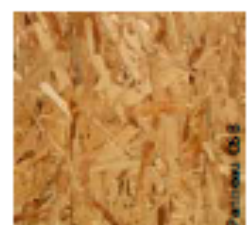
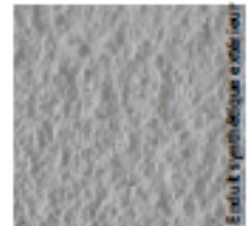
<p><b><u>LE POLYSTYRENE EXTRUDE « MATERIAU ISOLANT D'ORIGINE SYNTHETIQUE »</u></b></p> <p>Ces isolants sont produits par l'industrie du pétrole, le plus souvent à partir d'un ou de plusieurs dérivés du processus de raffinage.</p> <p>Issu du naphta, le polystyrène extrudé est obtenu après polymérisation du styrène par extrusion sous pression d'une pâte de fusion grâce à un gaz lourd.</p> <p>Vu son déplorable bilan environnemental, l'utilisation du polystyrène n'est pas compatible avec une approche écologique de la construction.</p> <p>La résistance mécanique du polystyrène extrudé destine ce matériau à des utilisations techniques comme l'isolation enterrée, sous forte charge, sous dalle ou en toiture terrasse.</p> <hr/> <p><b><u>Propriétés physiques du matériau</u></b></p> <p>LA CONDUCTIVITE THERMIQUE PEUT VARIER DE 0,029 A 0,035W/m. °C          LA DENSITE DU MATERIAU VARIE DE 25 A 45 KG/M<sup>3</sup></p> <p>LA CHALEUR SPECIFIQUE DU MATERIAU VARIE DE 1300 A 1500 J/KG. °C          LE COEFFICIENT DE DIFFUSION A LA VAPEUR D'EAU VARIE ENTRE 80 ET 200</p> <hr/> <p><b><u>Mise en œuvre et coût du matériau</u></b></p> <p>COÛT ≈ 10 A 20 € LE M<sup>2</sup>          (EPAISSEUR DE 100MM)</p> <p>Epaisseur Sol : RT 2005= 6,3 cm et BBC = 10 cm          Epaisseur Toiture : RT 2005 = 15 cm et BBC = 20 cm</p> <hr/> <p><b><u>Références techniques (sur certains produits) :</u></b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>FDES</b>              Fiches de Déclaration              Environnementale et              Sanitaire</p> </div> </div>	<p><b><u>Avantages :</u></b></p> <p><i>Matériau non altérable en présence d'eau.</i></p> <p><i>Matériau très peu perspirant, non hygroscopique, non capillaire.</i></p> <p><i>Très bonne durabilité, stabilité dimensionnelle et résistance à la compression.</i></p> <p><i>Utilisable noyé sous chape liquide ou en parties enterrés.</i></p>
<p><b><u>Inconvénients :</u></b></p> <p><i>Bilan carbone très mauvais et énergie grise élevée.</i></p> <p><i>Dégagement de pentane (pollution de l'ozone).</i></p> <p><i>Matière première limitée pétrole.</i></p> <p><i>Difficilement recyclable</i></p> <p><i>Mauvaise performance phonique.</i></p> <p><i>Dégradable par les rongeurs.</i></p> <p><i>Sensible au feu EUROCLASSE E.</i></p> <p><i>Dégagement de gaz toxique en cas de coupe à chaud et risques graves en cas d'incendie.</i></p>	

Tableau 4-4. Représente plusieurs propriétés physiques et des caractéristiques hydrothermiques pour certains isolants [8].

► Finitions intérieures																		
Densité ρ kg/m³	Épaisseur d m	Masse par m² kg/m²	Isolation			Inertie			Humidité			Inertie			Humidité			
			λ W/mK	μ kg/mK	α m²/s	ρC kg/mK	Diffusivité 10 <sup>-7</sup> m²/s m²/s	Effacité m²/s	μ sec /	A kg/m³%	μ hum. /	U W/mK	α sec kg/mK	μ hum. m	ρC kg/mK	μ sec m	U W/mK	α sec m
ENDUITS INTERIEURS																		
1300	0,015	19,5	0,52	1000	1300	0,46	822,19	10	6	0,287	34,67	19,50	0,15	0,09				
1600	0,015	27	0,78	1600	1600	0,41	1166,30	10	5		48,67	27,00	0,15	0,06				
1400	0,015	21	0,60	1400	1400	0,37	1056,30	10	6	0,05	53,33	21,00	0,15	0,09				
PLAQUES DE FINITION INTERIEURE																		
900	0,0125	11,25	0,25	1000	900	0,28	474,34	10	4	0,287	20,00	11,25	0,13	0,05				
1300	0,0125	15	0,32	1100	1320	0,24	649,92	19	5		25,60	16,50	0,34	0,06				
500	0,015	7,5	0,13	1700	850	0,15	332,42	170-280*	0,002	8,67	12,75	2,55-4,2*	1,06	0,36				
800	0,018	14,4	0,10	2100	1680	0,08	409,68	60	30		5,56	30,24	1,06	0,36				
600	0,022	13,2	0,15	1600	960	0,16	379,47	100	30	0,0004	6,82	21,12	2,20	0,66				
► Finitions extérieures																		
ENDUITS DE FAÇADE																		
1500	0,01	15	1,5	1000	1500	1,00	1500,00	25-85*	0,008	0,008	150	15,00	0,25-0,65*	0,25-0,65*				
1500	0,01	15	1,4	1000	1500	0,93	1480,34	10-30*			140	15,00	0,10-3*	0,1-0,3*				
1300	0,002	2,6						170	171				0,34	0,34				
1600	0,01	16	1,34	1000	1600	0,78	1488,36	6-30*	0,05	0,05	124	16,00	0,06-0,2*	0,06-0,2*				



## Résumé

En raison des préoccupations environnementales croissantes, un fort accent est mis sur les sources d'énergies renouvelables.

Les capteurs solaires thermiques permettent aux utilisateurs de générer de l'eau chaude de façon économique (ou pas cher) et de réduire la quantité d'énergie nécessaire pour le chauffage domestique. Etant donné que l'utilisation des capteurs solaire thermique augmente, les producteurs sont confrontés à une demande constante d'amélioration de la qualité, de la performance, de la productivité et des prix compétitifs. Et c'est là que l'isolation joue un rôle important.

L'isolant est nécessaire dans les capteurs solaires thermiques pour emprisonner et concentrer l'énergie du soleil. En évitant les pertes thermiques au dos et sur les côtés du capteur, l'isolation va permettre d'optimiser son efficacité et de recueillir le maximum de chaleur qui sera ensuite transférée au fluide caloporteur. Cependant plusieurs matériaux (isolants) ont été installés (utilisés) pour mesurer les données relatives à la performance thermique, nous avons traité l'effet de des isolants sur les performances thermiques de ce capteur, qui ont été analysées.

**Mots clés:** Energie solaire, Capteur plan, Transfert thermique, chauffe – eau solaire, performance.

## Abstract

Due to growing environmental concerns, there is a strong emphasis on renewable energy sources.

Solar thermal collectors allow users to generate hot water economically (or cheap) and reduce the amount of energy required for domestic heating. As the use of solar thermal collectors is increasing, producers are faced with a constant demand for improved quality, performance, productivity and competitive prices. And that's where insulation plays an important role.

Insulation is needed in thermal solar collectors to trap and concentrate the sun's energy. By avoiding thermal losses at the back and sides of the collector, the insulation will optimize its efficiency and collect the maximum heat that will then be transferred to the heat transfer fluid. However, several materials (insulators) have been installed (used) to measure the data on thermal performance, we have treated the effect of insulation on the thermal performance of this collector, which have been analyzed.

**Keywords:** Solar energy, flat collector, heat transfer, solar water heater, performance.

## ملخص:

نظرا لتزايد المخاوف البيئية، هناك تركيز قوي على مصادر الطاقة المتجددة.

لواقط الطاقة الشمسية الحرارية تسمح للمستخدمين بتوليد المياه الساخنة بطريقة اقتصادية (أو رخيصة) وتقلل من كمية الطاقة اللازمة لأغراض التدفئة المنزلية. منذ استخدام الطاقة الشمسية تزايد استعمال أجهزة اللاقط الحراري، يواجه المنتجين طلب مستمر لتحسين الجودة والأداء والإنتاجية وأسعار تنافسية. وهنا يلعب العزل دورا هاما.

العزل ضروري في جمع الطاقة الشمسية الحرارية لحبس و تركيز طاقة الشمس. تجنب فقدان الحرارة في الظهر والجانبين من أجهزة الاستشعار، والعزل لتحسين الكفاءة ولجمع أقصى قدر من الحرارة التي يتم بعد ذلك نقلها إلى المبرد. ومع ذلك تم تركيب العديد من المواد (العزل المستخدمة) لقياس البيانات عن الأداء الحراري، كونا نعامل وتأثير العزل على الأداء الحراري لهذا الاستشعار، والتي تم تحليلها.

كلمات مفتاحية: الطاقة الشمسية، لاقط حراري، الأداء، تحويل حراري، تسخين المياه بالطاقة الشمسية.