



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 2nd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



Evaluation des Performances Thermiques de l'Installation Plancher Solaire Direct (PSD)

A. Oudrane, M. Hamouda, M. Benhamou

Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien Adrar, Algérie.

Abdelatif.mebarkfatna@yahoo.fr , jhamouda@yahoo.fr

Résumé— L'objectif de ce présent travail est la détermination de l'épaisseur optimale de la dalle chauffante pour l'obtention d'une bonne efficacité thermique de l'installation plancher solaire direct (PSD) avec une température superficielle du plancher confortable. Pour atteindre cet objectif nous avons élaboré un logiciel du calcul pour bien dimensionner et optimiser les paramètres géométriques et thermiques de l'installation PSD, afin de simplifier le calcul. Ce logiciel est basé sur la méthode du calcul des planchers solaires directs E.S.I.M. De plus a été écrit en langage FORTRAN avec une interface graphique en DELPHI pour faciliter l'introduction des données initiale de l'installation PSD que nous volons optimisé. L'étude est basée sur des données climatiques de la région d'Adrar. Une étude détaillée des performances thermiques d'un PSD a été présentée en se basant sur un système simple constitué d'une dalle épaisse de béton et d'un capteur solaire plan à eau. La variation des différents paramètres (énergie solaire reçue et la température ambiante extérieure, ainsi que l'épaisseur de la dalle) influençant l'efficacité d'un tel système (température superficiel et rendement thermique) a été présentée graphiquement et discutée. Les résultats théoriques obtenus, nous ont permis de définir l'épaisseur de la dalle chauffante et l'angle des capteurs solaires optimales.

Mots clés -Energie solaire; Capteur plan; Bilan thermique; PSD.

I. NOMENCLATURES

- a : L'amplitude relative en (%).
 E_{Max} : Est l'énergie solaire maximale journalière en $(KWh/m^2.j)$.
 E_U : L'énergie utile par la surface de la dalle en $(KWh/m^2.j)$.
 E_R : L'énergie moyenne reçu par un mètre carré du capteur en $(KWh/m^2.j)$.
 Ft : Le facteur correctif globale.
 h_i : Coefficient d'échange superficiel global ($h_i=11.6 W/m^2.°C$).
 R_0 : Ratio de captation (rapport entre la surface des capteurs et la surface du plancher, $R_0 = 0.1$ pour ce cas).

- S_{cap} : Surface du capteur en (m^2) .
 T_{in} : La température moyenne intérieure de consigne (pour ce cas $20° C$).
 T_{Max} : La température superficielle maximale de plancher en $(°C)$.
 T_{plan} : La température du plancher en $(°C)$.
 ΔT : L'écart entre la température moyenne extérieure et intérieur en $(°C)$.
 η_p : Le rendement mensuel du PSD.
 σ : La fraction d'insolation moyenne mensuelle.

II. INTRODUCTION

Le solaire thermique actif 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 oeuvre de capteurs solaires [1]. La technique du Plancher Solaire Direct (PSD), résulte d'une simplification très importante des techniques de chauffage solaire actif utilisées jusqu'alors.

Le principe consiste à intégrer au toit, les capteurs (panneaux) solaires (des grandes dimensions). La surface des capteurs à installer doit être d'un dixième de la surface de la dalle à chauffer. Ils seront raccordés à votre plancher auquel ils transmettront l'énergie solaire. Cette énergie s'accumulera dans la dalle de votre plancher qui restituera la chaleur dans votre maison de façon douce [2]. Le fluide, réchauffé dans les capteurs solaires, circulera directement (sans passer par un échangeur ou par un ballon de stockage) dans votre plancher chauffant.

La dalle "chauffante" devra être proportionnellement dimensionnée pour stocker toute la chaleur captée au cours de la journée. Son épaisseur sera donc supérieure à celle d'une dalle conventionnelle. Pour obtenir un rendement maximum, les capteurs solaires devront bien évidemment être placés plein sud à $+ / - 30°$ et inclinés à $60°$ [2]. Ce système de chauffage



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



solaire peut être proposé avec une régulation qui une fois que la dalle aura atteint la température demandée basculera le circuit de façon que la chaleur réchauffe l'eau du ballon d'eau sanitaire (s'il est installé). Notant que le PSD (plancher solaire direct) ne couvrira pas l'intégralité de nos besoins en chauffage. L'équilibre entre le chauffage par le PSD et le chauffage par l'appoint sera géré par le système de régulation [2].

Il est important de noter qu'Adrar est une ville très riche en énergie solaire. Pour cette raison, nous avons pensé à son exploitation dans l'habitat par l'utilisation de cette nouvelle technique de PSD dont le principal avantage est l'usage d'une énergie naturelle non polluante, gratuite et inépuisable. Le problème posé est le choix de l'épaisseur de la dalle du plancher (PSD) qui nous permettrons d'obtenir un bon rendement mensuel et une température confortable de sol. En effet, les configurations architecturales appliquées conduisent à des sensations de surchauffes et de gaspillage économique si on utilise des épaisseurs très grandes [3]. Pour pallier à ce problème et pour valoriser l'installation de plancher chauffant nous avons varié l'épaisseur de la dalle dans un intervalle des valeurs selon la tolérance de corrélation de l'épaisseur de dalle, afin d'obtenir la valeur optimale qui s'adapte bien avec la région d'Adrar.

III. STRUCTURE DU SYSTEME

A. Description du système

La suppression de la cuve de stockage et de ses sujétions par le couplage direct des capteurs solaires sur la dalle chauffante ne peut être obtenu qu'en donnant à celle-ci une épaisseur sensiblement supérieure à la pratique courante. La masse de béton supplémentaire sert alors à stocker l'énergie et à provoquer un déphasage suffisant entre le maximum d'ensoleillement et le maximum de restitution [1]. Ceci mis à part, la grille de chauffe noyée dans le plancher est réalisée selon des techniques identiques à celles des planchers chauffants habituels [1].

La base du système étudié est une dalle en béton est considérée comme un solide homogène dans lequel on peut appliquer l'équation classique de la diffusion de la chaleur, reliée directement d'un capteur solaire plan noir à eau. Son épaisseur sur terre-plein, contient des tubes formant une grille de chauffage. Ce dernier repose sur une couche de 4cm d'isolation thermique (polystyrène). La circulation de l'eau dans la grille est assurée par une pompe ou un circulateur comme l'indique le schéma [4] (voir Figure. 1).

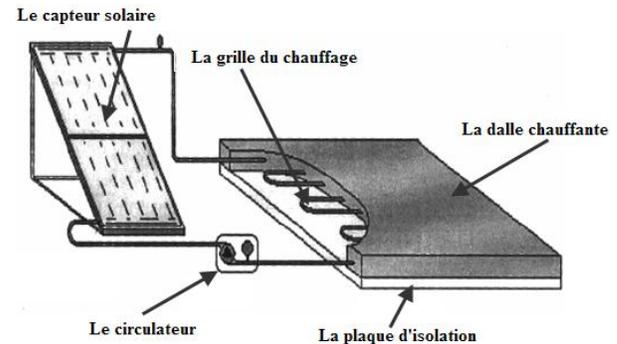


Figure 1. Schéma descriptif du problème étudié.

B. Descriptive de la dalle chauffante

Du strict point de vue du déphasage, la conduction de la chaleur tendrait à faire préconiser l'utilisation d'épaisseurs de béton plus épaisse au-dessus des tubes enrobés, ce qui correspond à des poids de structure importants [4]. A partir de cette contrainte, nous définissons la dalle de notre système de plancher solaire direct, la « dalle épaisse ou la dalle chauffante » qui est essentiellement utilisée sur terre-plein et constituée comme suit (Figure. 2) :

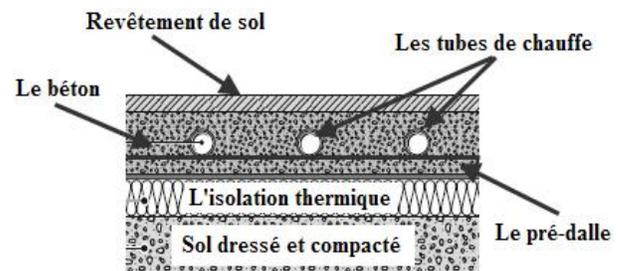


Figure 2. Schéma descriptif de la dalle épaisse [5].

- ❖ Sol convenablement dressé et compacté, muni d'un film étanche contre les remontées d'eau;
- ❖ Isolation thermique rigide résistante à la compression, de 4cm d'épaisseur minimale ;
- ❖ Pose des tubes de chauffe sur une première épaisseur de béton d'environ 5cm à 8cm, coulée directement sur l'isolant et formant une pré-dalle avec treillis carré d'armature;
- ❖ Revêtement de sol.

Hypothèses : On suppose que tous les paramètres géométriques et thermiques sont fixes sauf l'épaisseur de la dalle qui peut varier dans l'intervalle :

$e_{Dalle} \in [10, 20, 30, 40]$ cm, et à chaque fois on calcule le bilan thermique du système afin de faire une comparaison.



**Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 2nd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



C. Descriptive de la méthode du calcul

Notre premier point consiste à calculer le rendement thermique optimal d'un plancher relié directement à un capteur plan solaire et la température superficielle maximale de confort pour avoir les bons dimensionnements des paramètres géométriques et thermiques de l'installation PSD. Pour cette raison nous avons utilisé la méthode **E.S.I.M** du calcul des planchers directs qui est basé sur un moyen de calcul simple [1]. Il permet de calculer les performances du plancher en fonction des paramètres suivants [1] :

- ❖ Energie moyenne reçue par mètre carré de capteur et par jour pour le mois considéré.
- ❖ Ecart de températures moyennes intérieure et extérieure du mois considéré.
- ❖ Surface de capteur rapporté à la surface du plancher équipé (ratio de captation).

IV. FORMULATION DU PROBLÈME

A. Calcul analytique du rendement mensuel de plancher

Le rendement du PSD peut être calculé à partir de la relation suivante [4] :

$$\eta_p = \eta_{p_0} - \frac{a}{(E_R)^n} \quad (1)$$

Pour les dalles épaisses équipées de capteurs solaires noirs plans, nous avons :

$$\eta_{p_0} = 0.574 + 0.0025 \cdot \Delta T - 0.44 \cdot R_0 \quad (2)$$

$$a = (0.0398 \cdot \Delta T + 0.0273) \cdot (0.6 - R_0)^{0.25} \quad (3)$$

$$n = 0.6$$

Où η_{p_0} et a sont des fonctions du rapport capteurs/dalle (R_0) et de l'écart moyen de température (ΔT). Ces expressions varient en fonction du type de système concerné, de même que l'exposant (n) [4].

B. Calcul d'énergie journalière reçue par le capteur

L'ensoleillement moyenne reçue E_R , pour un mois par mètre carré de capteur, peut être calculée comme suit :

$$E_R = E_{Max} \cdot (0.25 + 0.75 \cdot \sigma) \quad \text{en } (KWh/m^2 \cdot j) \quad (4)$$

Où E_{Max} : est l'énergie solaire maximale journalière en ($KWh/m^2 \cdot j$), et σ : le fraction d'insolation moyenne mensuelle.

C. Calcul des températures superficielles de plancher

Pour un mois donné, on connaît, pour la configuration réelle, l'énergie solaire moyenne reçue E_R , et le rendement corrigé, le produit de ces deux valeurs représente l'énergie solaire réellement fournie par jour et par mètre carré de capteur qui se trouve distribuée par une surface de plancher (E_U), égale à $1/R_0$ en dalle épaisse [4]. La quantité d'énergie émise par jour pour $1m^2$ de plancher est donc :

$$E_U = E_R \times \eta_p \times F_t \times R_0 \quad \text{en } KWh/m^2 \cdot j \quad (5)$$

En supposant les pertes thermiques entre le capteur et la dalle négligeables, la chaleur cédée à la dalle est égale à l'énergie captée par le capteur (la puissance utile), on peut donc écrire :

$$\Delta T = T_{pla} - T_{in} = \frac{\eta_p \times F_t \times E_R \times R_0}{24 \times h_i} \quad (6)$$

Pour connaître les températures maximale et minimale du plancher en conditions normales, on ajoute à la température moyenne ci-dessus, l'amplitude relative (a) comme suit [4] :

$$\Delta T_a = (1 \pm a) \cdot \frac{\eta_p \times F_t \times E_R \times R_0}{24 \times h_i} \quad (7)$$

Par suite :

$$T_{Max} = T_{in} + (1 + a) \cdot \frac{\eta_p \times F_t \times E_R \times R_0}{24 \times h_i} \quad \text{en } (^\circ C) \quad (8)$$

D. Corrélation de l'épaisseur de la dalle

En dehors du rendement thermique, le choix d'épaisseurs différentes modifie également l'amplitude et le déphasage du flux restitué. On comptera dans l'épaisseur tous les revêtements lourds dont les propriétés thermiques se rapprochent suffisamment de celles du béton : ainsi un carrelage sur ciment-colle, sur béton maigre ou sur bain de sable, sera compté dans l'épaisseur [4]. Le facteur correctif est indépendant du ratio de captation et n'est donné qu'en fonction de l'épaisseur. En appelant e l'épaisseur réelle de la dalle épaisse est $e_0 = 30cm$ comme une épaisseur de la dalle standard. Dans ce cas, le facteur correctif F_c de l'épaisseur de la dalle est donné comme suit :

$$F_c = \left(\frac{e_0}{e} \right)^{0.13} \quad (9)$$



**Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 2nd International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012**



De plus il ne serait naturellement pas légitime d'utiliser cette formule en dehors de l'intervalle ($10 \leq e_{Dalle} \leq 40$) cm.

V. SIMULATION DU SYSTÈME

Pour la simulation du système, nous avons élaboré un code de dimensionnement des installations des planchers solaires directs en se basant sur l'analyse de l'influence des paramètres géométriques et thermiques. Ce code de calcul a été écrit en langage FORTRAN avec une interface graphique en DELPHI pour faciliter l'introduction des données. Les paramètres à introduire sont (Figures. 3, 4, 5) :

- ❖ Type de la dalle : épaisse /d'étage;
- ❖ Le pré-dalle : oui/non;
- ❖ La surface du plancher ;
- ❖ Le coefficient d'échange superficiel global;
- ❖ La résistance thermique de revêtement ;
- ❖ La résistance thermique d'isolation de la dalle;
- ❖ Le diamètre des tubes de plancher;
- ❖ L'écartement des tubes de plancher;
- ❖ La conductivité thermique du béton;
- ❖ Le type de capteur solaire : standard/sélectif;
- ❖ Le ratio du capteur solaire;
- ❖ La température moyenne intérieure ;
- ❖ L'inclinaison du capteur solaire plan;
- ❖ L'énergie solaire journalière reçue par un mètre carré de capteur.

Figure 3. Une fenêtre d'entrée des paramètres géométriques et thermiques du logiciel élaboré pour le calcul PSD.

Figure 4. Une fenêtre d'entrée des propriétés thermiques des capteurs solaires pour le calcul du PSD.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012

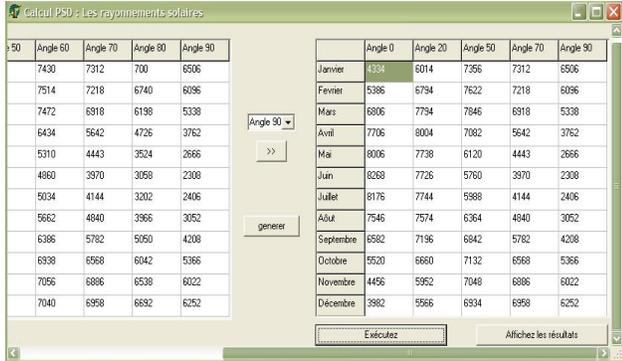


Figure 5. Une fenêtre d'entrée des valeurs de l'énergie solaire reçu de la région considérée.

Après l'exécution des calculs, on obtient les résultats des différents types d'énergies solaires (utile, totale, reçue fictif, maximale), les rendements mensuels de la saison de chauffage, les températures superficielles maximaux et minimaux du plancher en fonction de cinq angles (β^0) d'inclinaison a choisi de capteur solaire orienté vers le sud. Ces résultats sont sous forme des tableaux comme suit (Figure. 6) :

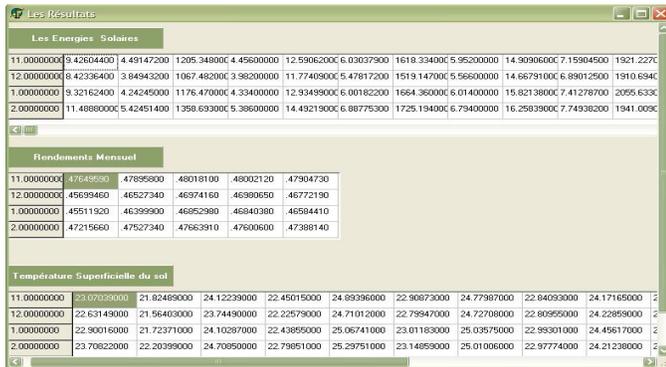


Figure 6. Une fenêtre d'affichage des énergies solaires, les températures superficiels et les rendements mensuels du PSD.

VI. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Données

LE TABLEAU I. PRESENTE LA FRACTION D'INSOLATION MOYENNE MENSUELLE A ADRAR (SOURCE: ATLAS SOLAIRE DE L'ALGERIE/TOM 2):

Mois	JAN.	FEV.	MAR.	AVR.	MAI.	JUI.
Sigma	0.88	0.87	0.93	0.93	0.89	0.92
Mois	JUIL.	AOU.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.
Sigma	0.94	0.91	0.88	0.86	0.86	0.86

LE TABLEAU II. PRESENTE L'ENERGIE SOLAIRE MAXIMALE JOURNALIERE, POUR CINQ ANGLES D'INCLINAISON DU CAPTEUR SOLAIRE DIRIGE VERS LE SUD DANS LA REGION D'ADRAR [6]:

Mois	L'énergie solaire par (Wh/m ² .j) en fonction des inclinaisons du capteur

	solaire				
	0°	20°	40°	60°	90°
Janvier	4334	6014	7088	7430	6506
Février	5386	6794	7536	7514	6096
Mars	6806	7794	8028	7472	5338
Avril	7706	8004	7566	6434	3762
Mai	8006	7738	6806	5310	2666
Juin	8268	7726	6548	4860	2308
juillet	8176	7744	6660	5034	2406
Août	7546	7574	6926	5662	3052
Septembre	6582	7196	7132	6386	4208
Octobre	5520	6660	7150	6938	5366
Novembre	4456	5952	6856	7056	6022
Décembre	3928	5566	6650	7040	6252

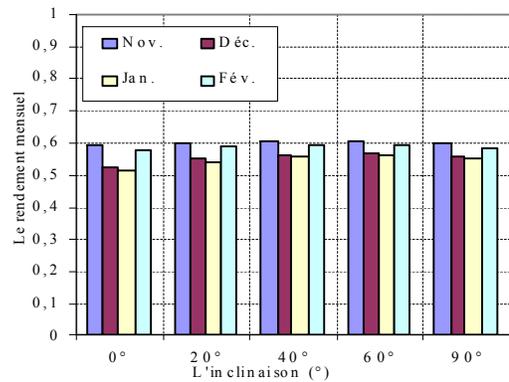
LE TABLEAU III. PRESENTE LES TEMPERATURES EXTERIEURES MOYENNES MENSUELLES DE LA REGION D'ADRAR [6] :

Mois	JAN.	FEV.	MAR.	AVR.	MAI.	JUI.
T _{ex} moy. (°C)	12.1	15.4	19.6	24.3	28.4	34.4
Mois	JUIL.	AOU.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.
T _{ex} moy. (°C)	36.5	36	31.8	24.5	17.2	13.2

B. Résultats de simulation

Evaluation des rendements mensuels du PSD

A partir des résultats présentés dans la figure 7, on constate que le rendement mensuel optimal du PSD, pour les quatre mois pris en considération (saison d'hiver), est obtenu avec une inclinaison de 60° et une épaisseur de dalle de 10cm (voir Figure. 7a). En outre, la valeur maximale du rendement a été repérée au mois de novembre (61%) avec ces mêmes paramètres géométriques. Par contre la plus faible valeur a été remarquée au mois de janvier (43%) avec une inclinaison de 0° et une épaisseur de la dalle de 40cm (voir TABLEAU V).

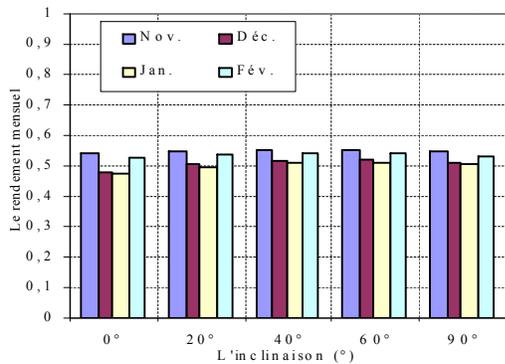


(a)

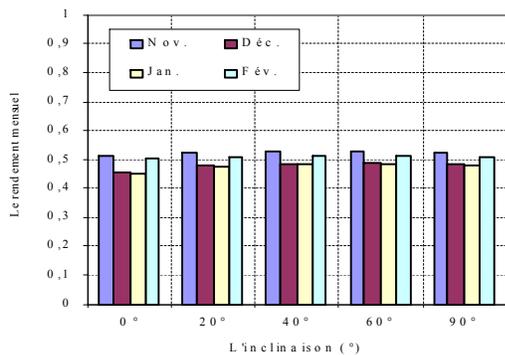


**Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 2nd International Seminar on New and Renewable
Energies**

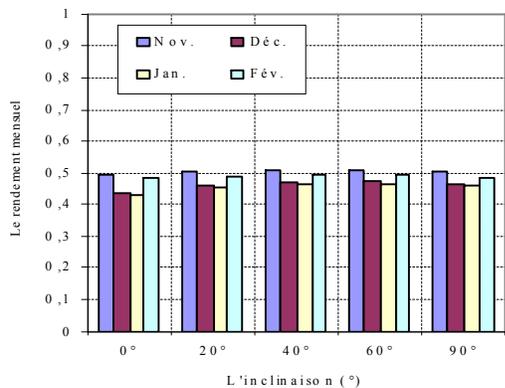
Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



(b)



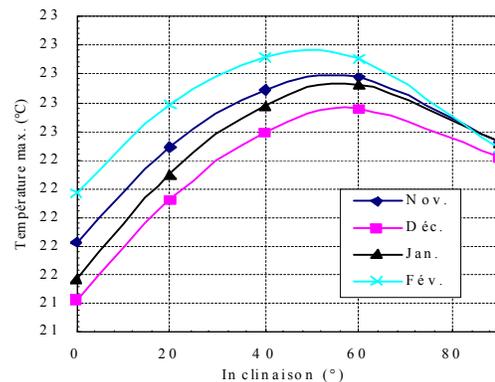
(c)



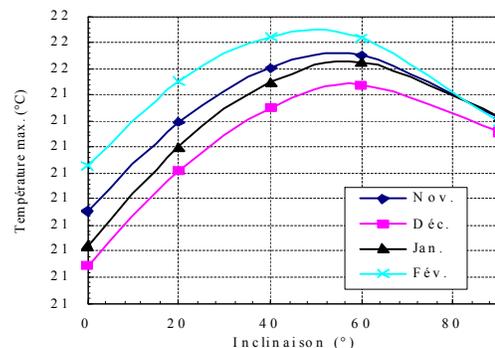
(d)

Figure 7. Evolution du rendement mensuel en fonction de l'inclinaison du capteur solaire pour : (a) e = 10cm, (b) e = 20cm, (c) e = 30cm et (d) e = 40cm.

La figure 8, illustre l'évolution de la température superficielle maximale du plancher en fonction de l'inclinaison du capteur solaire pour différentes épaisseurs de la dalle : $e = \{10, 20, 30 \text{ et } 40\text{cm}\}$. On peut remarquer que la valeur la plus importante de la température superficielle maximale est de 23.11°C. Cette valeur a été obtenue au mois de février avec une inclinaison de 40° et une épaisseur de 10cm. Ceci explique que l'installation PSD a reçu une grande énergie solaire par le capteur plan au mois de février avec cette inclinaison de 40°, vu qu'il y a une proportionnalité entre l'énergie reçue quotidiennement par un mètre carré du capteur et la température superficielle du plancher. Notant que la valeur minimale de la température superficielle maximale est de 22.42°C. Cette valeur a été obtenue au mois de décembre avec une inclinaison de 0° et une épaisseur de 10cm. Alors que, la valeur la plus faible ($T = 20,68^\circ\text{C}$) est obtenue au mois de décembre avec une inclinaison de 0° et une épaisseur de 40cm (voir TABLEAU V). En outre, il est intéressant de noter que cette valeur maximale obtenue pour la température ne dépasse pas les normes de confort qui exige une température maximale ne dépassant pas les 28°C.



(a)



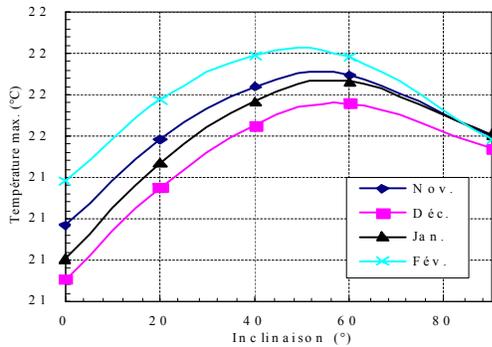
(b)

Evaluation des températures superficiels de la dalle chauffante

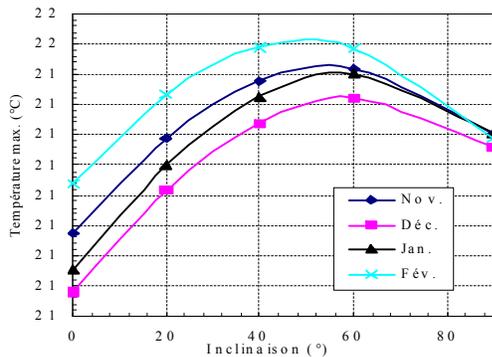


**Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 2nd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



(c)



(d)

Figure 8. Evolution des températures superficielles maximales du plancher en fonction de l'inclinaison du capteur solaire pour : (a) e = 10cm, (b) e = 20cm, (c) e = 30cm et (d) e = 40cm.

LE TABLEAU V. REPRÉSENTE UN RECAPITULATIF DES RESULTATS OBTENUS POUR L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA DALLE SUR LE BILAN THERMIQUE DU PSD.

l'épaisseur de la dalle en (cm)	le rendement du PSD en (%)			La température maximale en (°C)		
	Mois	β^0	η_p	Mois	β^0	T_{Max}
10	November	60°	61%	Février	40°	23.11°C
20	November	60°	56%	Février	40°	21.10°C
30	November	60°	53%	Février	40°	21.62°C
40	November	60°	51%	Février	40°	21.5°C

VII. CONCLUSION

On se référant au tableau V qui englobe tous les résultats de notre étude préalable de l'influence de l'épaisseur de la dalle épaisse sur l'efficacité thermique et la température superficielle de l'installation solaire PSD, on peut conclure que :

- La variation d'épaisseur de la dalle épaisse avait une influence très importante sur le rendement et la température du plancher, c'est-à-dire quand l'épaisseur augmente le rendement diminue et aussi la température superficielle maximale diminue,
- La valeur la plus importante de la température maximale du plancher a été obtenue au mois de février avec une inclinaison de 40° et une épaisseur de 10cm, étant donné que cette énergie solaire maximale journalière accumuler par le capteur solaire et plus grand.

Finalement, on peut dire, pour fournir un chauffage constant tout au long de la période d'hiver, malgré l'intermittence du rayonnement solaire, le PSD utilise l'inertie et la capacité de stockage de la dalle épaisse (la dalle chauffante) en béton. Pour cette raison, il est conseillé d'utiliser une épaisseur comprise entre 10 et 30cm avec une inclinaison du capteur solaire noir comprise entre 60° et 40° et une orientation vers le sud.

VIII. RÉFÉRENCES

- [1] R. Kharchi, N. Aït Messaoudène, M. Belhamel et A. Hamid "Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct" Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 115-119.
- [2] Chauffage solaire : le plancher solaire direct (PSD) : www.maison-climatisation-chauffage.com.
- [3] A. Mokhtari, H. Kazeoui, Y. Boukezzi et G. Achard "Utilisation d'un Circuit Hydraulique dans un Plancher pour le Chauffage et le Rafrâichissement des Locaux" Rev. Energ. Ren. Vol.1 (1998) 17-27.
- [4] D. Roux, D. Mandineau et M. Chateauminois, 'Calcul des Planchers Solaires Directs', Tech-Doc., Lavoisier.
- [5] Dimensionnement du chauffage par le sol; Jean Yves MESSE – THERMEXCEL 50, rue d'Erevan (Bât. 35 le Capricorne) 92130 ISSY LES MOULINEAUX – France.
- [6] ATLAS SOLAIRE DE L'ALGERIE/TOM2; Aspect énergétique; Michel capderou, 15 juin 1985.