

## Méthodologie pour la détermination de l'écartement optimal de la chaîne tubulaire d'une dalle chauffante

A. Oudrane <sup>1\*</sup>, B. Aour <sup>1</sup>, M. Hamouda <sup>2†</sup> et M. Benhamou <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Recherche en Technologie de l'Environnement  
Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, Algérie

<sup>2</sup> Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
BP 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie

(reçu le 10 Janvier 2016 – accepté le 30 Mars 2016)

**Abstract** - *The objective of the present work is determination of optimal spacing the grid of heating tubes in order to obtain good thermal efficiency of Direct Solar Floor system (D.S.F). To achieve this goal, we have established an appropriate methodology to properly size and optimize the geometric and thermal parameters of solar installation. The latter was implemented in a computer code to automate optimization procedure. Note that technique adopted is based on the procedure of calculation of direct solar floors of E.S.I.M. The application was made by climatic data of the region of Adrar. A detailed study of the energy performance of D.S.F was presented. The influence of different parameters, namely, the solar energy received the outside temperature; as well the spacing of tubes at the grid of heating on the effectiveness of such a system at surface temperature point of view and thermal performance was presented graphically and discussed. The theoretical results, we have helped to define the optimum spacing of the tubes at the grid heating.*

**Résumé** - *L'objectif de ce présent travail est la détermination de l'écartement optimal des tubes de la grille de chauffage afin d'obtenir une bonne efficacité thermique de l'installation du Plancher Solaire Direct (PSD). Pour atteindre cet objectif, nous avons établi une méthodologie adéquate pour bien dimensionner et optimiser les paramètres géométriques et thermiques de l'installation solaire, PSD. Cette dernière a été implémentée dans un code de calcul afin d'automatiser la procédure d'optimisation. Il est à noter, que la technique adoptée est basée sur la procédure de calcul des planchers solaires directs de l'E.S.I.M. L'application a été faite pour des données climatiques de la région d'Adrar. Une étude détaillée des performances énergétiques du PSD a été présentée. L'influence des différents paramètres, à savoir, l'énergie solaire reçue, la température extérieure, ainsi que l'écartement des tubes de la grille de chauffage sur l'efficacité d'un tel système du point de vue température superficielle et rendement thermique, a été présentée graphiquement et discutée. Les résultats théoriques obtenus, nous nous sommes permis de définir l'écartement optimal des tubes de la grille de chauffage.*

**Mots clés:** PSD - Energie solaire - Performances énergétiques - E.S.I.M.

### 1. 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 œuvre 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.

---

\* abdellatif.habadat@gmail.com , ben\_aour@hotmail.com

† jhamouda@yahoo.fr , mohbenhamou71@gmail.com

Le principe consiste à intégrer au toit, les capteurs solaires. 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 dans votre plancher chauffant.

Il est important de noter qu'Adrar est une ville très riche en énergie solaire, vu son taux d'ensoleillement moyen qui atteint  $9963 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{j}$ . Pour cette raison, nous avons pensé à son exploitation dans l'habitat par l'utilisation de cette nouvelle technique du 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'écartement des tubes de la grille de la dalle chauffante, qui nous permettra d'obtenir un bon rendement mensuel et une température confortable du sol. En effet, les configurations architecturales appliquées conduisent à des sensations de surchauffes et de gaspillage économique si on utilise un écartement des tubes aléatoire [3]. Pour pallier à ce problème et pour valoriser l'installation solaire PSD, nous avons varié l'écartement des tubes dans un intervalle des valeurs selon la tolérance de la corrélation de l'écartement des tubes, afin d'obtenir la valeur optimale qui s'adapte bien avec la région d'Adrar.

## 2. STRUCTURE DU SYSTEME

### 2.1 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].

Du point de vue technique, la base du système étudié est une dalle en béton est considérée comme un solide homogène dans lequel on peut applique 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 du chauffage. Cette dernière repose sur une couche de 4 cm 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] (figure 1).

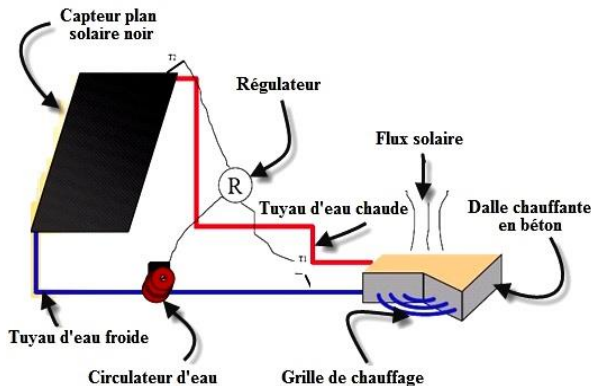


Fig. 1: Description du système étudié (couplage direct)

## 2.2 Descriptive de la dalle chauffante

La conduction de la chaleur tendrait à faire préconiser l'utilisation des épaisseurs du béton plus élevées 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 illustre la figure 2.

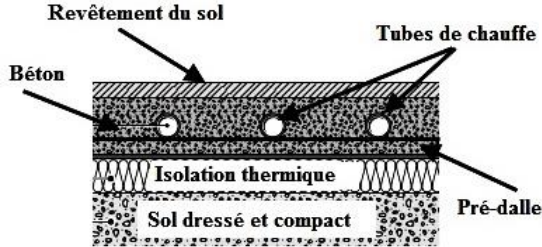


Fig. 2: Description de la dalle épaisse [5]

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

**Hypothèses:** Pour mettre en évidence l'influence de l'écartement des tubes, nous avons fixé tous les paramètres géométriques et thermiques de l'installation PSD selon des valeurs de référence (installation de référence), alors que pour ce paramètre, nous avons testé les trois valeurs d'écartement suivantes:

$$P_{\text{tube}} = \{15, 20, 30\} \quad \text{en cm}$$

Avec-

$$P_{\text{tube}} = 15 \text{ cm} \quad (6 \text{ tubes par mètre carré})$$

$$P_{\text{tube}} = 20 \text{ cm} \quad (5 \text{ tubes par mètre carré})$$

$$P_{\text{tube}} = 30 \text{ cm} \quad (3 \text{ tubes par mètre carré})$$

De plus la figure ci-dessous présente le positionnement des tubes de la grille de chauffage, se forme des boucles fixés sur une armature de treillis carrés, 'Treillis soudé', (figure 3)

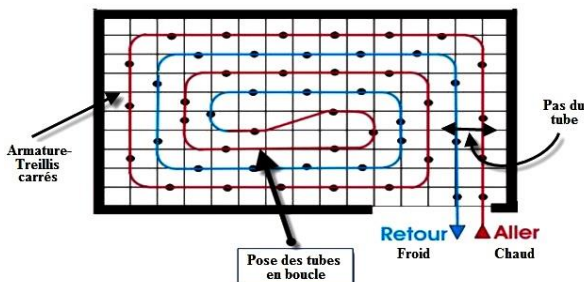


Fig. 3: Description de la grille de chauffage

Les **Tableaux** ci-dessous présentent les différents paramètres de référence, dans lesquels on peut varier le paramètre que nous voulons optimiser.

**Table 1:** Paramètres de référence de l'installation PSD

Paramètres géométriques	Paramètres thermiques
Epaisseur de la dalle, $e_{dalle} = 30 \text{ cm}$	Résistance thermique d'isolation, $R_{th\_is} = 1 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
Diamètre du tube, $D_{tube} = 20 \text{ mm}$	Résistance du revêtement du sol, $R_{th\_rev} = 0.15 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
Ratio de captation, $R_0 = 0.1$	Conductivité thermique du béton, $\lambda_{béton} = 1.75 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Surface de la dalle, $S_{plan} = 150 \text{ m}^2$	Coefficient d'échange superficie, $h_i = 11.6 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

**Table 2:** Propriétés thermiques du capteur solaire plan de référence

Paramètres Thermiques du capteur	
Rendement optique du capteur	$\nu = 0.8$
Coefficient de pertes thermiques du capteur	$K = 8.2 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
Surface unitaire du capteur	$S_{capteur} = 125 \text{ m}^2$

### 2.3 Description de la méthode du calcul "E.S.I.M"

Afin de calculer le rendement thermique optimal d'un plancher relié directement à un capteur solaire plan et la température superficielle de confort, nous avons utilisé la méthode E.S.I.M du calcul des planchers solaires directs pour des raisons d'efficacité et simplicité [1]. Cette technique permet de calculer les performances énergétiques du plancher en fonction des paramètres suivants [1]:

- L'énergie moyenne reçue par mètre carré de capteur et par jour pour le mois considéré.
- L'écart de températures moyennes intérieure et extérieure du mois considéré.
- La surface du capteur rapportée à la surface du plancher équipé (ratio de captation).

## 3. FORMULATION DU PROBLEME

### 3.1 Calcul analytique du rendement mensuel du plancher

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

$$\eta_p = \eta_{p0} - a / (E_R)^n \quad (1)$$

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

$$\eta_{p0} = 0.574 + 0.0025 \cdot \Delta T - 0.44 \cdot R_0 \quad (2)$$

$$a = (0.03898 \cdot \Delta T + 0.0273) \times (0.6 - R_0)^{0.25} \quad (3)$$

$$n = 0.6$$

Où  $\eta_{p0}$  et  $a$  sont des fonctions du rapport capteurs/dalle ( $R_0$ ) et de l'écart moyen de température ( $\Delta T$ ). Ces expressions varient en fonction du type de système concerné, de même que l'exposant ( $n$ ) [4].

### 3.2 Calcul de l'énergie journalière reçue par le capteur

L'ensoleillement moyen reçu  $E_R$ , pour un mois par mètre carré de capteur, peut être calculé comme suit:

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

### 3.3 Calcul des températures superficielles du 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 ( $E_R$ ), égale à  $1/R_0$  en dalle épaisse [4]. La quantité d'énergie émise par jour pour  $1 \text{ m}^2$  de plancher est donc:

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

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 (puissance utile), on peut donc écrire:

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

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

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

Par suite,

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

### 3.4 Correlation de l'écartement des tubes

Le coût de la grille de chauffage est directement influencé par le pas choisi. Donc on peut rechercher des valeurs différentes pour des raisons d'économie. L'expression de calcul du facteur correctif de l'écartement des tubes est:

$$F_p = 1 + \left(0.017 + 0.086 \cdot R_0^{1.2}\right) \times \left(1 - \left(\frac{P_{tube}}{P_0}\right)^2\right) \quad (9)$$

De plus, il ne serait naturellement pas légitime d'utiliser cette formule en dehors de l'intervalle  $15 \leq P_{tube} \leq 30 \text{ cm}$ .

La multiplication des facteurs correctifs des paramètres constructifs de l'installation solaire PSD, formant un produit, s'appelle le facteur correctif global, qui est influé

directement sur le bilan énergétique du PSD. L'expression du calcul de ce facteur correctif globale est:

$$F_t = F_D \times F_P \times F_{\text{pré-dalle}} \times F_{\text{épaisseur}} \times F_{\lambda_{\text{béton}}} \times F_{R_{\text{th-is}}} \times F_{R_{\text{th-rev}}} \quad (10)$$

Où,  $F_t$ , Facteur correctif global de l'installation solaire PSD;  $F_D$ , Facteur correctif du diamètre des tubes du chauffage;  $F_P$ , Facteur correctif de l'écartement des tubes de chauffage;  $F_{\text{pré-dalle}}$ , Facteur correctif de la pré-dalle du plancher chauffant;  $F_{\text{épaisseur}}$ , Facteur correctif de l'épaisseur de la dalle chauffante;  $F_{\lambda_{\text{béton}}}$ , Facteur correctif de la conductivité thermique du béton;  $F_{R_{\text{th-is}}}$ , Facteur correctif de la résistance thermique de l'isolant;  $F_{R_{\text{th-rev}}}$ , Facteur correctif du revêtement du sol.

#### 4. SIMULATION DU SYSTEME

Dans 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 est écrit en langage Fortran avec une interface graphique en Delphi pour faciliter l'introduction des données. Les paramètres à introduire sont, (figure 4 et 5):

- Le coefficient d'échange superficiel global;
- La résistance thermique de revêtement;
- Le diamètre des tubes du plancher;
- L'écartement des tubes du plancher;
- Le type de capteur solaire: standard/sélectif.....etc.

Fig. 4: Fenêtre d'entrée des paramètres géométriques et thermiques de la dalle chauffante

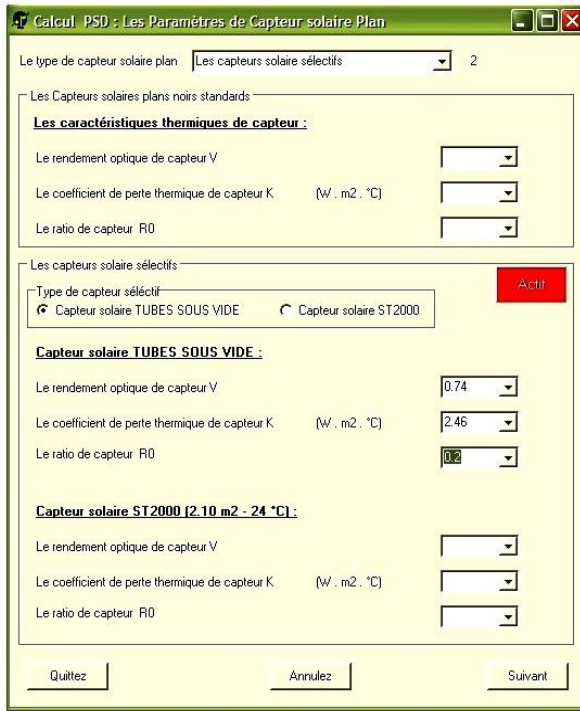
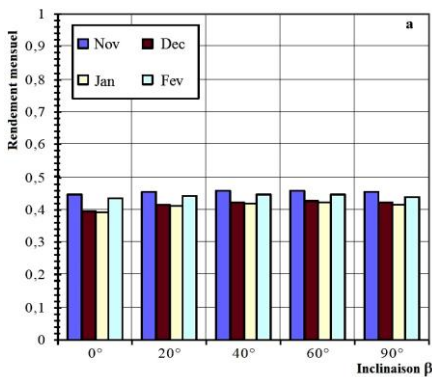


Fig. 5: Fenêtre d'entrée des propriétés thermiques des capteurs solaires

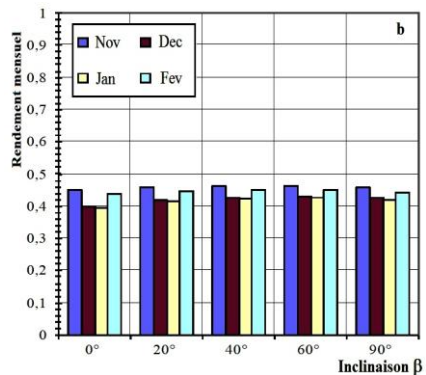
## 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 5.1 Evaluation des rendements mensuels du PSD

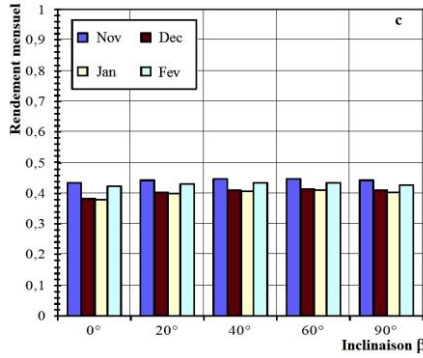
La figure 6 présente les résultats du rendement mensuel en fonction des inclinaisons du capteur solaire. A partir de cette figure, on peut constater que le rendement mensuel optimal, pour les quatre mois pris en considération (saison d'hiver), est obtenu avec une inclinaison de 60° avec un écartement des tubes de 15 cm à 20 cm (figures 6a- et 6b-). Donc dans les cas qui sont pris en considération, la valeur maximale et optimale du rendement du PSD est de 46 %. Cette valeur a été localisée au mois de novembre.



-a- p = 15 cm



-b- p = 20 cm

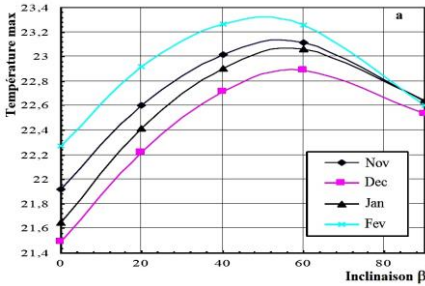


-c-  $p = 30\text{ cm}$

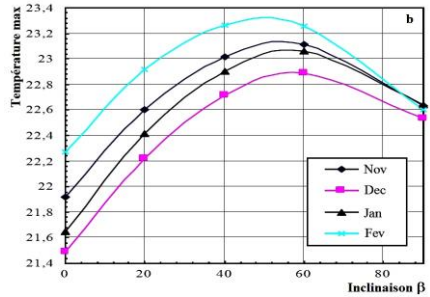
Fig. 6. Evolution du rendement mensuel en fonction de l’inclinaison du capteur solaire

### 5.2 Evaluation des températures superficielles de la dalle chauffante

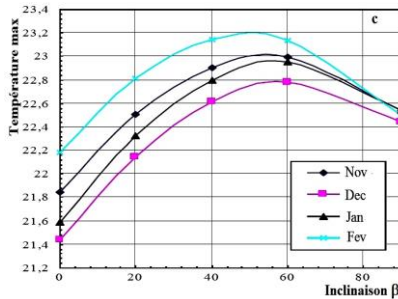
La figure 7 illustre l’évolution de la température superficielle maximale du plancher en fonction de l’inclinaison du capteur solaire pour les écartements des tubes:  $P_{\text{tube}} = \{15, 20 \text{ et } 30\text{ cm}\}$ . On peut remarquer que la valeur la plus importante de la température superficielle maximale et optimale est de  $23.30\text{ }^\circ\text{C}$  (figure 7a-). Cette valeur a été obtenue au mois de février pour une inclinaison de  $40^\circ$  avec un écartement de 15 cm. Ceci explique que l’installation du PSD a reçue une énergie solaire élevée par le capteur solaire plan. Il est à noter aussi que cette valeur maximale de la température obtenue ci-dessus ne dépasse pas les normes de confort ( $T_{\text{max}} = 28^\circ\text{C}$ ).



-a-  $p = 15\text{ cm}$



-b-  $p = 20\text{ cm}$



-c-  $p = 30\text{ cm}$

Fig. 7: Evolution des températures superficielles maximales du plancher en fonction de l’inclinaison du capteur solaire



## 6. CONCLUSION

D'après les résultats présentés préalablement concernant l'influence de l'écartement des tubes de la grille sur l'efficacité thermique et la température superficielle de la dalle chauffante de l'installation solaire PSD, on peut conclure que la variation de l'écartement des tubes de la grille du chauffage a une influence importante sur le rendement et la température du plancher. On a trouvé, que plus l'écartement augmente plus le rendement mensuel du PSD diminue. La même tendance a été enregistrée pour l'effet de la température du plancher.

Il est important de noter que, pour fournir un chauffage constant tout au long de la période d'hiver, avec un rendement et une température superficielle du plancher optimale, il faut utiliser un écartement, des tubes de la grille de chauffage, compris entre 15 et 20 cm avec une inclinaison du capteur plan solaire noir comprise entre 40° et 60° et une orientation vers le sud.

## NOMENCLATURE

$a$ , Amplitude relative du flux solaire, (%)	$T_{\text{plan}}$ , Température du plancher, (°C)
$P_{\text{tubes}}$ , Ecartement des tubes de la grille de chauffage, (cm)	$E_{\text{Max}}$ , Energie solaire maximale journalière, (kWh/m <sup>2</sup> .j)
$E_R$ , Energie moyenne reçu par un m <sup>2</sup> de capteur, (kWh/m <sup>2</sup> .j)	$T_{\text{in}}$ , Température moyenne intérieure de consigne (pour ce cas 20°C)
$\Delta T$ , Ecart entre la température moyenne extérieure et intérieur, (°C)	$T_{\text{Max}}$ , Température superficielle maximale du plancher, (°C)
$\sigma$ , Fraction d'insolation moyenne mensuelle	$\eta_p$ , Rendement mensuel du PSD
$R_{\text{th\_is}}$ , Résistance de l'isolation thermique, (m <sup>2</sup> .°C/W)	$R_{\text{th\_rev}}$ , Résistance thermique de revêtement de sol, (m <sup>2</sup> .°C/W)
$R_0$ , Ratio de captation des rayonnements solaires	$h_i$ , Coefficient d'échange surfacique de chauffage, (W/m <sup>2</sup> .°C)

## REFERENCES

- [1] R. Kharchi, N. Aït Messaoudène, M. Belhamel et A. Hamid, 'Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct', Revue des Energies Renouvelables, Journées de Thermique, pp. 115 – 119, 2001.
- [2] www.maison-climatisation-chauffage.com. 'Chauffage solaire: le plancher solaire direct (PSD)'.
- [3] A. Mokhtari, H. Kazeoui, Y. Boukezzi et G. Achard, 'Utilisation d'un Circuit Hydraulique dans un Plancher pour le Chauffage et le Rafraîchissement des Locaux', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 1, pp. 17 – 27, 1998.
- [4] D. Roux, D. Mandineau et M. Chateauminois, 'Calcul des Planchers Solaires Directs', Tech-Doc., Lavoisier.
- [5] J. Yves, 'Dimensionnement du Chauffage par le Sol', Messe – Thermexcel, 50, rue d'Erevan (Bât. 35 le Capricorne) 92130 Issy Les Moulineaux, France.
- [6] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Tome 2, Aspect énergétique; O.P.U. Juin 1985.