

Utilisation d'un Circuit Hydraulique dans un Plancher pour le Chauffage et le Rafraîchissement des Locaux

A. Mokhtari *, H. Kazeoui *, Y. Boukezzi * et G. Achard **

* Institut de Génie Civil, USTO, B.P. 1505 El Menaour, 31 000 Oran, Algérie

** Laboratoire Génie Civil et Environnement, ESIGEC, Université de Savoie, 73376, le Bourget du Lac, France

(Accepté le 20.06.98)

Résumé — Nous présentons les résultats de l'utilisation d'un circuit hydraulique dans un plancher pour le conditionnement climatique des bâtiments. La technique du plancher solaire direct a été utilisée pour le chauffage. Le principe est de faire circuler directement dans un plancher un fluide chauffé par des capteurs solaires sans utiliser de cuves de stockage intermédiaires. Le système ainsi obtenu présente de nombreux avantages par rapport aux systèmes classiques de chauffage solaire sur le plan des coûts, de l'encombrement et de la fiabilité. Dans le souci d'assurer un conditionnement climatique pendant toute l'année, nous avons pensé à exploiter le plancher chauffant, comme circuit hydraulique conditionné, pour le rafraîchissement des ambiances en été, ceci sans investir dans un système de refroidissement de l'air. Il s'agit surtout de valoriser l'installation de plancher chauffant. Les résultats théoriques obtenus nous ont permis de définir l'épaisseur de la dalle chauffante (vide sanitaire/terre-plein) et la surface des capteurs solaires. Pour confirmer les résultats théoriques acquis, nous avons installé une cellule expérimentale équipée d'un PSD.

Abstract — Considering the generous availability of solar energy in Algeria, one can expect good performances of solar heating by using Direct Solar Floors. The additional advantage of such a heating system is that the same hydraulic loop could be used for cooling. In this study, the performance of such systems has been analyzed, using TRNSYS simulation tool. Results for an Algerian climate show the influence of the main sizing parameters and indicate that a large fraction of heating needs could be covered by solar energy. When cooling is considered, an important decrease in resultant temperature can be achieved with a relatively elevated fluid inlet temperature.

Mots-clés: Energie solaire, capteur, bâtiment, plancher hydraulique, chauffage, rafraîchissement, système.

1. INTRODUCTION

La technique de chauffage par plancher a suscité ces dernières années un regain d'intérêt du fait de la possibilité d'utilisation de sources de chauffage à basse température. Le principal avantage de cette technique est lié à l'importance des surfaces d'émission et le degré de confort thermique acquis. Comme le rendement du plancher chauffant est d'autant plus élevé si la température du fluide caloporteur est basse [1], l'utilisation de l'énergie solaire améliore alors considérablement les conditions de confort. Son principe est de faire circuler directement dans un réseau de tubes (généralement en PER) noyé dans le plancher un fluide chauffé par des capteurs sans utiliser de cuves de stockage intermédiaires. Le système ainsi obtenu présente de nombreux avantages par rapport aux systèmes classiques de chauffage solaire sur les plans des coûts, de l'encombrement et de la fiabilité [2].

L'Algérie est riche en énergie solaire, nous avons pensé à son exploitation dans l'habitat par l'utilisation de cette nouvelle technique dont le principal avantage est l'usage d'une énergie naturelle non polluante, gratuite et inépuisable. Le problème d'inconfort thermique en saison d'été se pose fréquemment. En effet, les configurations architecturales appliquées conduisent à des sensations de surchauffes. Les équipements de climatisations sont nombreux mais pas économiques. Pour pallier à ce problème et pour valoriser l'installation de plancher chauffant nous avons considéré le rafraîchissement des ambiances par un circuit hydraulique conditionné [3, 4].

2. DEFINITION DU SYSTEME

2.1. Description

Le système que nous avons étudié se compose des éléments suivants:

- Capteur solaire: permet de capter l'énergie solaire,
- Plancher hydraulique: circuit hydraulique noyé dans une couche de béton et alimenté par le capteur solaire, pour permettre le chauffage (PSD en hiver), et copulé à un échangeur de froid pour le rafraîchissement de l'ambiance (en été),
- Ballon d'eau chaude sanitaire (ECS): permet la production de l'eau chaude sanitaire,
- Module de transfert: permet la gestion de l'énergie calorifique, produite par le capteur, entre le PSD et le ballon d'ECS.

2.2. Principe de régulation

En vu d'obtenir un confort thermique, nous avons considéré deux types de régulation:

-a) Régulation différentielle:

Elle se traduit par le contrôle de la différence de température entre l'entrée et la sortie du fluide dans le circuit hydraulique, en mode de chauffage ou de rafraîchissement.

-b) Régulation anti-surchauffe:

Elle permet de limiter la température de retour du fluide dans le circuit chauffant, pendant la période de chauffage.

Notons que nous avons en plus considéré le contrôle de la température d'entrée du fluide dans le circuit rafraîchissant pour pallier au problème de condensation.

3. MODELISATION THERMIQUE DU SYSTEME

3.1. Description

Nous considérons un bâtiment monozone équipé d'un plancher hydraulique conditionné. La liaison des différents éléments de l'enveloppe engendre des transferts thermiques se produisant simultanément: conduction, convection et rayonnement. L'échange conductif au sein des parois de l'enveloppe (hormis plancher hydraulique) est traité par la méthode des transformées en Z [4]. L'échange conductif au sein du plancher hydraulique est traité par la méthode des CTF (Conduction Transfer Functions). Pour simplifier les calculs, plusieurs hypothèses ont été considérées:

- La température du fluide est supposée la même en tout point de la boucle; il s'agit de la moyenne arithmétique entre les températures d'entrée et de sortie d'une boucle.
- Les propriétés thermophysiques de la dalle sont supposées indépendantes de la température.
- Pas de pertes thermiques sur le pourtour du plancher.
- L'échange conductif est supposé bidimensionnel et l'étude est limitée à une demi section droite par raison de symétrie offerte par la disposition des tubes (Fig. 1).

L'étude du système thermique ainsi défini permet de calculer dans le temps différentes variables: - température de l'ambiance interne, - température de surface du plancher, - flux échangés entre le plancher et son environnement, - besoins énergétiques, etc.

3.2. Simulation du système thermique

Pour la simulation du système, nous avons choisi le logiciel de conception thermique "TRNSYS" (a transient system simulation program). Ceci, vue sa souplesse, sa structure modulaire et l'ampleur de son domaine d'application [5]. En effet, chaque élément du bâtiment est traité indépendamment dans des modules appelés TYPES ce qui permet l'ajout de nouveaux modules sans modifier la configuration de l'ensemble.

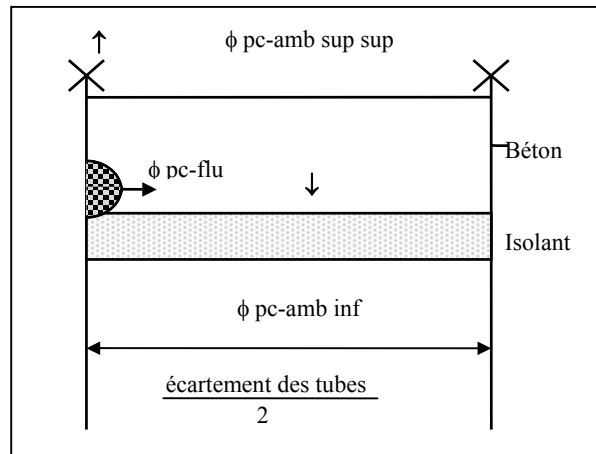


Fig. 1: Section de plancher hydraulique étudiée

Les transferts thermiques au sein de l'enveloppe sont traités en utilisant le type 19 de TRNSYS. Ce type traite le cas d'un local monozone où la température d'air intérieur est supposée uniforme.

Le plancher hydraulique est traité par le type 55.

L'exploitation de ce logiciel est gouvernée par un fichier de commande défini préalablement. En effet, ce dernier permet dans un premier temps de faire la préparation des données météorologiques et ensuite appeler les différents modules du logiciel en fonction des tâches fixées pour ainsi arriver à calculer les variables désirées.

1. EXPLOITATIONS ET RESULTATS

L'exemple simulé représente une cellule expérimentale, en cours de réalisation à l'Institut de génie civil de l'USTOran, composée de deux pièces de mêmes dimensions et d'une surface habitable globale de 40 m², dont une est équipée d'un plancher hydraulique.

Pour le plancher solaire, nous avons utilisé une dalle chauffante en béton où le réseau de tubes est posé directement sur 4 cm de polystyrène lui-même posé sur 10 cm de béton. Les capteurs solaires sont installés sur la toiture et inclinés de 45° face au sud. Une dérivation vers un ballon d'eau chaude sanitaire est prévue afin de valoriser au maximum l'énergie solaire (en été) qui assurera en partie le préchauffage de l'ECS.

Nous avons considéré un ballon d'eau d'une capacité de 150 l, chauffé à une température égale à 60°C. Le système d'appoint est considéré comme un système complètement indépendant du PSD, il apportera la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir l'intérieur à sa température de consigne que nous avons fixée à 18°C.

En mode de rafraîchissement, le plancher est découplé des capteurs. Il est relié à une source froide produisant de l'eau fraîche à une température constante.

Notons que nous étudions dans cet article seulement le local équipé du plancher hydraulique supposé en contact, par tous ces murs, avec l'extérieur.

Les données météorologiques utilisées sont celles d'Oran de l'année 1992 et consistent en:

- la température extérieure, - les ensoleillements directs et diffus, - la vitesse et direction du vent, - la température du ciel, - la température de l'eau du réseau.

4.1. Comparaison des performances énergétiques

Pour analyser la faisabilité du plancher solaire direct en Algérie, nous avons pensé tout d'abord à comparer les performances de ce dernier avec des données climatiques Algériennes (Oran) à celles obtenues avec des données climatiques Françaises (Carpentras). Nous avons choisi cette région parcequ'elle présente de bonnes conditions climatiques: un ensoleillement global horizontal moyen de 9.22 MJ/m² et une température extérieure moyenne de 8.05°C durant la saison de chauffage [6]. En comparant d'abord les deux courbes d'ensoleillement global (Fig. 2), nous remarquons nettement la richesse de l'Algérie en énergie solaire. Ceci conduit à des performances énergétiques meilleures que celles obtenues en France. En effet, en analysant la part des besoins assurée par le PSD, nous remarquons qu'à Oran le PSD arrive à satisfaire presque tous les besoins énergétiques. Nous notons une économie sur le chauffage de 70% contre seulement 30% à Carpentras. Pour l'ECS, l'économie à Oran est 93%, à Carpentras elle n'est que de 60%. Quant à l'économie globale, elle est de 90% à Oran et 45% à Carpentras, c'est à dire qu'à Carpentras l'économie globale chute de 50% environ par rapport à Oran.

En analysant maintenant l'évolution des températures intérieures avec l'introduction du PSD, nous constatons que celles-ci sont toutes voisines de la température de consigne dans le climat algérien contrairement au climat français où le PSD n'apporte qu'une légère augmentation de température.

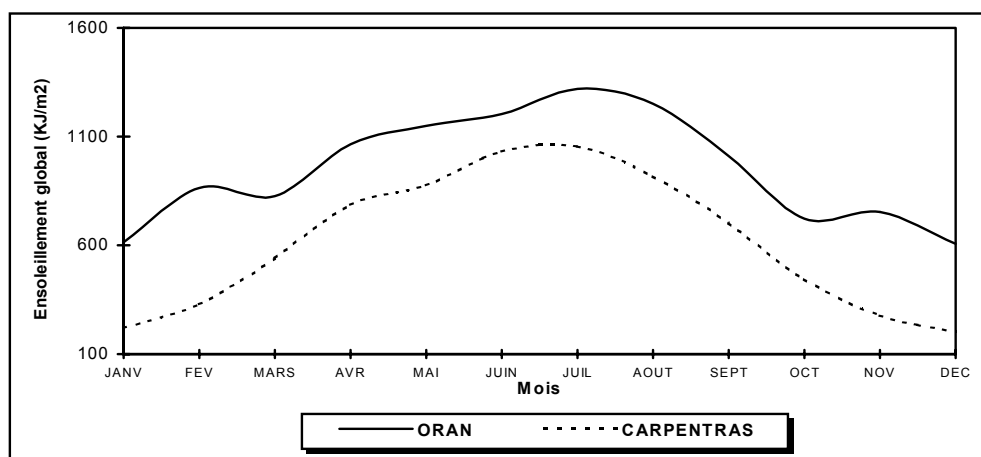


Fig. 2 : Ensoleillement global horizontal (Oran / Carpentras).

4.2. Influence de l'épaisseur de la dalle chauffante

Pour une même épaisseur d'isolant mise en œuvre, nous avons fait varier l'épaisseur de la dalle chauffante afin de voir son influence sur les performances du plancher solaire direct. Nous avons constaté que la réduction de l'épaisseur de la dalle chauffante s'accompagne d'une réduction de performances énergétiques en chauffage du système solaire (Fig. 3). Ceci est dû au fait que, pour une épaisseur est réduite, le stockage est réduit. Sachant que la quantité d'énergie cédée au plancher est pratiquement la même d'une dalle à l'autre (vu l'absence de tout organe limitant cette quantité), cette énergie est donc cédée à l'ambiance avec déphasage et amortissement dépendant de l'épaisseur de la dalle.

En analysant maintenant l'économie totale apportée par l'installation solaire, nous dirons qu'elle est sensiblement la même d'une dalle à l'autre (Fig. 3), phénomène dû à l'absence de la régulation limitant la quantité d'énergie cédée au plancher.

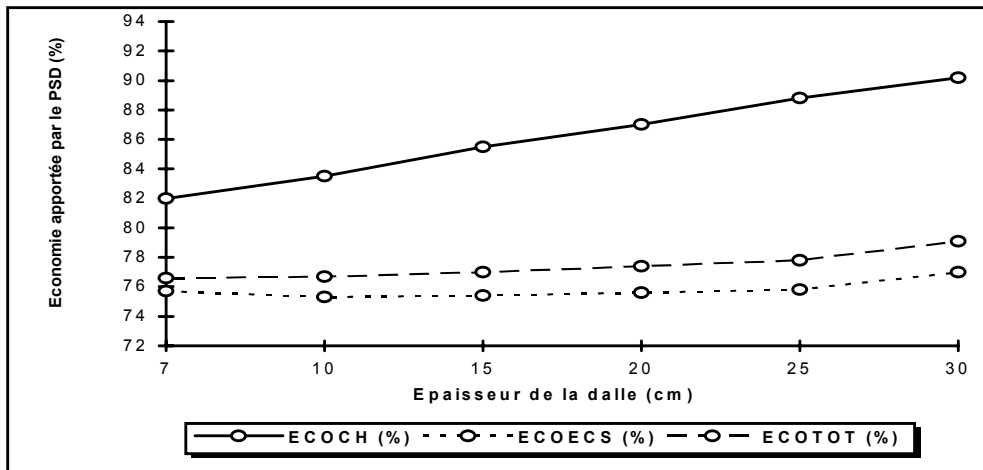


Fig. 3 : Economie d'énergie apportée par la dalle en fonction de l'épaisseur.

L'utilisation d'une épaisseur importante n'est donc pas nécessaire, une dalle de 10 cm d'épaisseur pourra être un compromis tout à fait intéressant à condition de voir par la suite les conséquences de l'utilisation de cette épaisseur du point de vue confort.

L'analyse des températures respectivement de l'ambiance et de surface nous a permis de constater que les valeurs maximales (25.5°C et 28.2°C) sont obtenues au mois de Novembre. Nous constatons aussi que ces valeurs posent forcément le problème de surchauffe [7]; ce dernier se manifeste aussi si on prend le cas d'une dalle de 30 cm d'épaisseur.

Nous concluons donc qu'une dalle de 10 cm et 4 m² de capteurs conduisent nécessairement à des surchauffes dont il convient de contrôler. La solution est de munir le PSD d'un système de régulation [6].

Figure 4 montre que les températures d'ambiances obtenues avec régulation, sont moins élevées que celles obtenues sans régulation. Nous noterons que la température intérieure maximale a chuté de 25.5°C à 20.7°C.

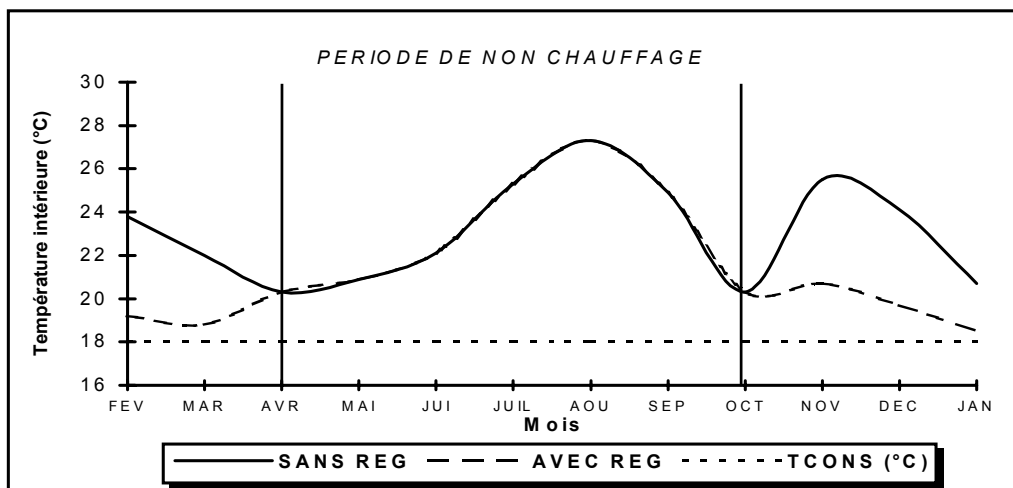


Fig. 4 : Evolution de la température d'ambiance interne.

L'introduction d'un système de régulation permet donc une amélioration du confort intérieur, cependant il convient d'analyser son influence sur les performances énergétiques du PSD.

La performance énergétique pour le chauffage chute avec l'introduction du système de régulation. Par contre, cette réduction s'accompagne d'une augmentation de performance pour le poste Eau Chaude Sanitaire (ECS). La performance globale augmente (Fig. 5).

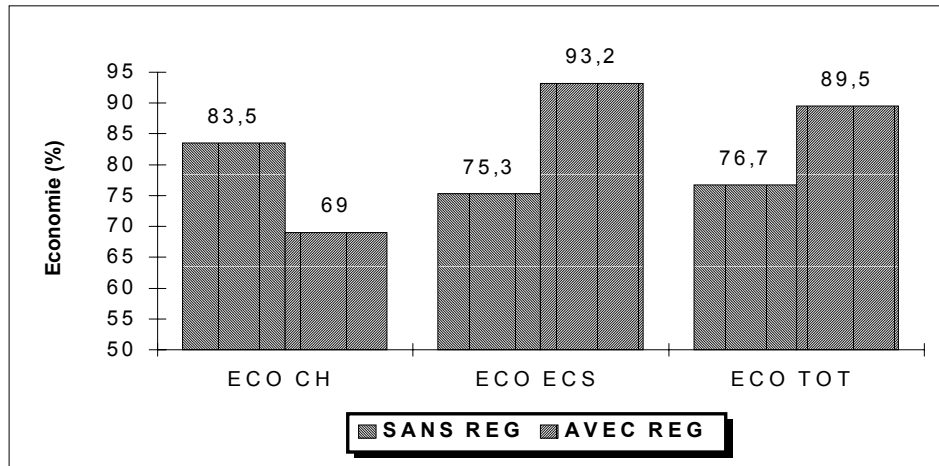


Fig. 5 : Economie d'énergie apportée par le PSD.

4.3. Cas d'un plancher chauffant sur terre-plein

La plupart des méthodes consacrées à la modélisation thermique de la liaison plancher-sol sont basées sur la simplification de l'aspect géométrique de ces échanges. Parmi celles-ci, nous avons choisi l'utilisation d'une approche analytique où le comportement thermique du sol est considéré dans son aspect tridimensionnel. Il a été montré que ce comportement est assimilable au comportement thermique d'une paroi plane équivalente, d'épaisseur finie dont l'écoulement de chaleur est unidirectionnel [8]. Notons que la conductivité thermique du sol est considérée égale à 1.9W/mK et le coefficient d'échange entre la face inférieure du plancher et le sol de l'ordre de $1000\text{W/m}^2\text{K}$ [8]. Nous avons comparé les besoins énergétiques relatifs à un local d'une dalle de 10cm bâti, d'une part sur vide sanitaire et d'autre part sur terre-plein. Nous remarquons une diminution des besoins de chauffage annuels lorsque le local est construit sur terre-plein (Fig. 6). Ceci montre que le couplage du PSD avec le sol favorise le stockage de l'énergie et augmente l'inertie du plancher.

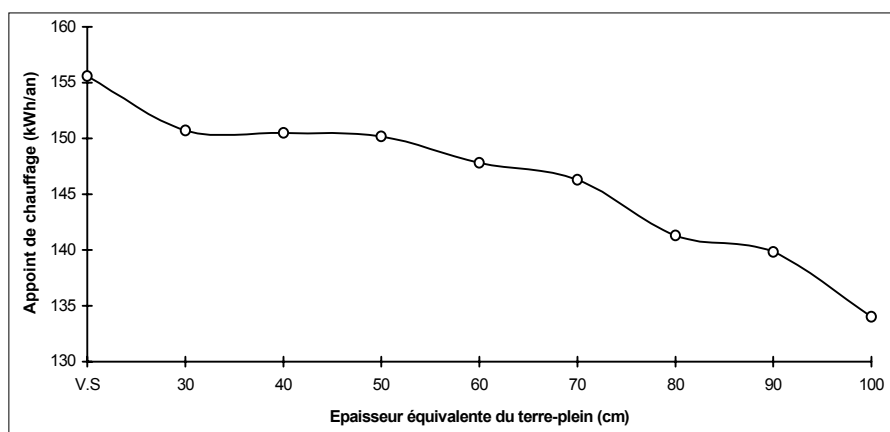


Fig.6 : Apport de chauffage pour différentes configurations sur terre-plein.

Ce phénomène conduit à une augmentation de l'économie de chauffage et l'économie globale, augmentation d'autant plus importante que cette épaisseur est grande. L'eau chaude sanitaire est très peu influencée par ce paramètre: les économies calculées pour ce poste sont légèrement identiques. nous avons des températures légèrement plus élevées comparées à

celles obtenues avec le PSD sur vide sanitaire. Le sol en contact avec le PSD apporte ainsi une économie de chauffage et une augmentation des conditions de confort comparées à un PSD sur vide sanitaire expliquées par la grande capacité de stockage qu'offre le sol sous le plancher.

4.4. Choix de la surface des capteurs solaires

Mettre en place une surface de capteurs importante augmente la quantité d'énergie fournie par le plancher chauffant à l'ambiance et réduit considérablement les énergies d'appoint pour les deux postes. Ce phénomène est dû au fait qu'en augmentant la surface des capteurs, on augmente ainsi l'énergie cédée à la dalle chauffante et au ballon d'ECS. Ainsi, l'économie apportée par l'installation solaire est d'autant plus faible que la surface des capteurs est moindre (Fig. 7). Il semble important de noter que l'utilisation d'une surface de 2 m² (10% de la surface du plancher chauffant) génère une économie de 64% environ, soit une économie supérieure à celle générée par 20% de capteurs dans un climat Français. Pour se contenter de 45 à 50% d'économie seulement, nous pourrions dire qu'un ratio de captage de 8 à 10% est largement suffisant dans un climat Algérien. Nous avons pu constater aussi que cette surface peut être utilisée sans craindre le risque de surchauffe puisque la température intérieure ne dépasse jamais 23°C et celle de surface 24,5°C (figure 8). La période utilisée est une séquence que nous avons trouvée très défavorable du point de vue surchauffes : du 1 au 10 Novembre, semaine la plus chaude en période de chauffage de l'année 1992.

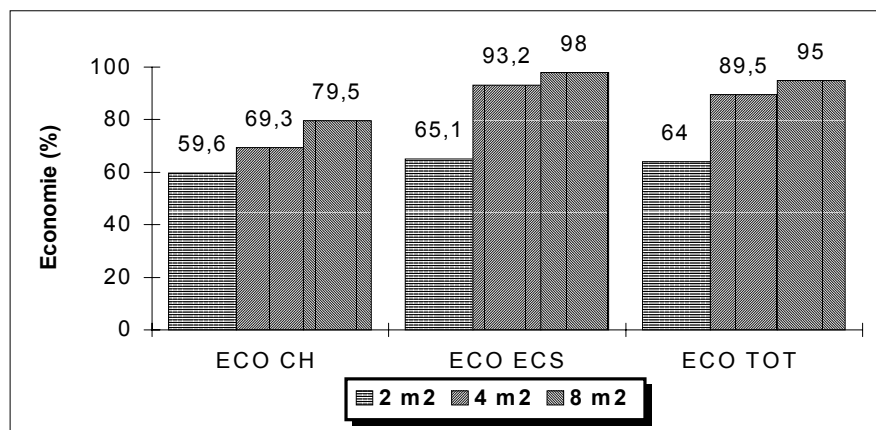


Fig. 7 : Economie d'énergie en fonction de la surface des capteurs solaire

Seulement comme les données climatiques sont variables, on ne peut éviter les périodes très ensoleillées, il est donc plus prudent de prévoir la régulation anti-surchauffe quelle que soit la surface des capteurs utilisée.

Nous avons choisi l'utilisation de 4 m² de surface (20% de la surface du plancher chauffant) pour exploiter au maximum l'énergie solaire et minimiser l'intervention du système d'appoint. Néanmoins, il faut noter ici que la couverture solaire n'est pas le seul critère pour le choix de la surface des capteurs, il faut prendre en considération le coût et le temps d'amortissement de l'installation solaire.

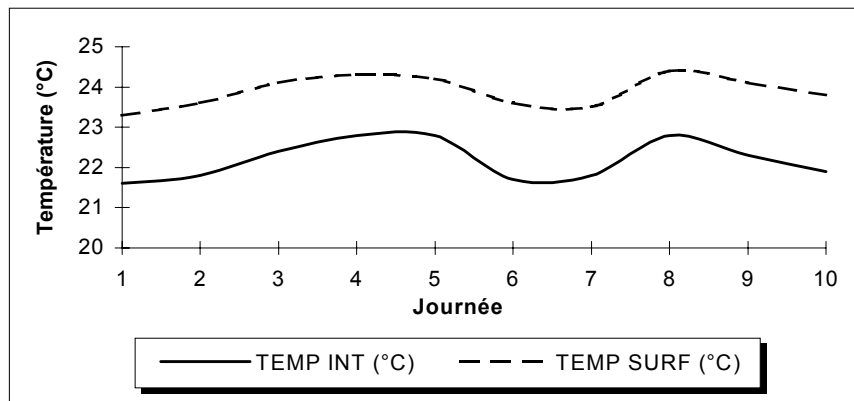


Figure 8: Evolution des températures d'ambiance interne et de surface du PSD.

4.5. Plancher rafraîchissant

Pour étudier la faisabilité du plancher rafraîchissant en Algérie, nous utilisons le fichier météorologique d'Oran caractérisé par un climat tempéré et humide. L'analyse est réalisée uniquement en terme de confort thermique. Ainsi à travers les paragraphes suivants, nous suivons l'évolution des températures (température résultante sèche et température de surface plancher) en veillant au respect du confort thermique et à la prévention du risque de condensation au sol pour réaliser le confort d'été. Par le terme confort thermique, nous entendons le confort lié aux températures: une température résultante sèche (T_{rs}) comprise entre 22 et 25°C, une température de surface plancher (T_{sp}) comprise entre 19 et 27°C et un gradient vertical de température (surface plancher-ambiance interne) ne dépassant pas 3°C [9],[10]. Notons que, les critères de confort englobent d'une part le confort thermique et d'autre part la prévention du risque de condensation.

4.6. Problème de condensation

Nous avons été amenés à suivre l'évolution des températures et plus particulièrement la température de surface plancher. Elle est comparée ensuite à la valeur critique (température de rosée) retenue en consultant le diagramme de l'air humide. Il est impératif que cette dernière soit inférieure à la température de surface plancher pour éviter tout risque de condensation au sol. Ce dernier est le problème principal lié au rafraîchissement de dalle. Parallèlement, nous veillons au respect des critères de confort thermique afin d'émettre des préconisations quant au confort d'été. Vu l'importance du problème de condensation, nous poussons nos simulations à un pas de temps fin (un pas horaire).

Nous n'avons pas considéré un échangeur de froid couplé au plancher. Pour tester les performances de ce dernier, nous avons imposé au niveau du circuit hydraulique une température de fluide fixée. Pour cette étude, notre choix s'est porté sur deux jours représentatifs: le 30 Juillet et le 04 Août.

En rafraîchissement, une température d'entrée du fluide dans le plancher de 21°C permet d'abaisser la température intérieure d'environ 04°C réalisant ainsi une ambiance confortable (23 à 24°C). Bien que les critères de confort thermique soient respectés, le risque de condensation est observé pendant la journée du 04 Août à 04 h ainsi que la journée du 30 Juillet, de 10 h à 14 h. Ce qui nous a conduit à élever la température d'entrée du fluide dans le plancher et ce n'est qu'au bout d'une température relativement élevée (22.5°C) que ce risque est totalement éliminé. Parallèlement, les conclusions importantes à retenir sont les suivantes:

- température surface plancher de l'ordre de 24°C,
- température résultante sèche variant entre 25 et 26°C,
- gradient vertical de température n'excédant pas 02°C.

Globalement, nous pouvons dire que les critères de confort thermique ont été respectés. Néanmoins, pour répondre à l'ensemble des critères de confort préalablement définis, la condensation devra être réduite ou éliminée. Pour une température d'entrée du fluide dans le plancher égale (maximum) à 22.5°C, le problème de condensation ne se posera pas (Fig. 9).

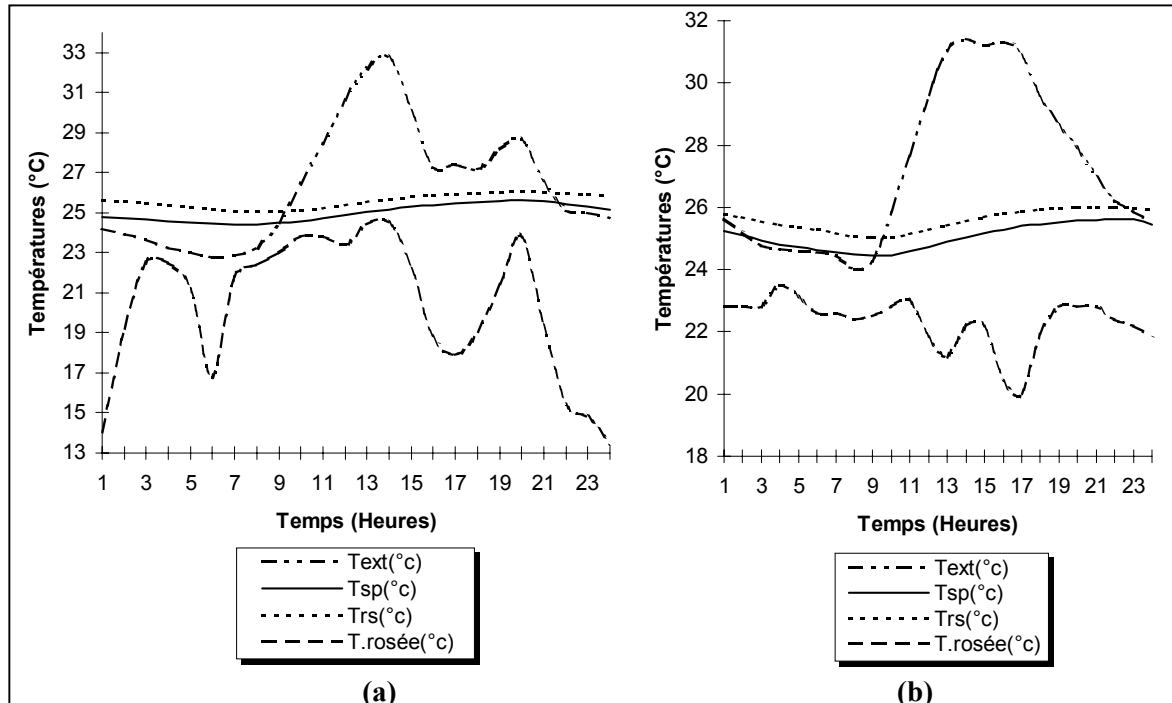


Fig. 9: Evolution des températures (T_{rs} , T_{sp}) pour une température d'entrée de 22.5°C.
(a) Journée du 30 Juillet. (b) Journée du 04 Août.

4.7. Influence du site

Nous avons utilisé le fichier météorologique de Carpentras, qui représente le climat continental Français, et appliqué la même procédure que précédemment (paragraphe 4.6). Nous avons retenu deux journées représentatives: le 05 et 06 Août.

En rafraîchissement, le risque de condensation pourra se manifester pendant la journée du 06 Août, la journée du 05 Août ne court pas ce risque, et ceci avec une température d'entrée du fluide à 18°C. A 19°C, nous éliminons ce problème: la différence entre la température de surface plancher et celle de rosée dépasse 1°C pour la journée du 06 Août et 03°C pour le 05 Août. Parallèlement, les résultats suivants sont relevés (figure 10):

- la température résultante sèche se situe entre 22 et 23°C,
- la température de surface plancher est supérieure à 25°C,
- le gradient vertical de température ne dépasse pas 2°C.

Ainsi, il apparaît clairement l'impact du site météorologique sur la détermination de la température d'entrée du fluide dans le plancher. En effet, s'il faut alimenter le plancher par une température de l'ordre de 22.5°C dans une zone à hygrométrie forte (Oran), une température de 19°C convient dans le cas d'une zone à hygrométrie faible (Carpentras).

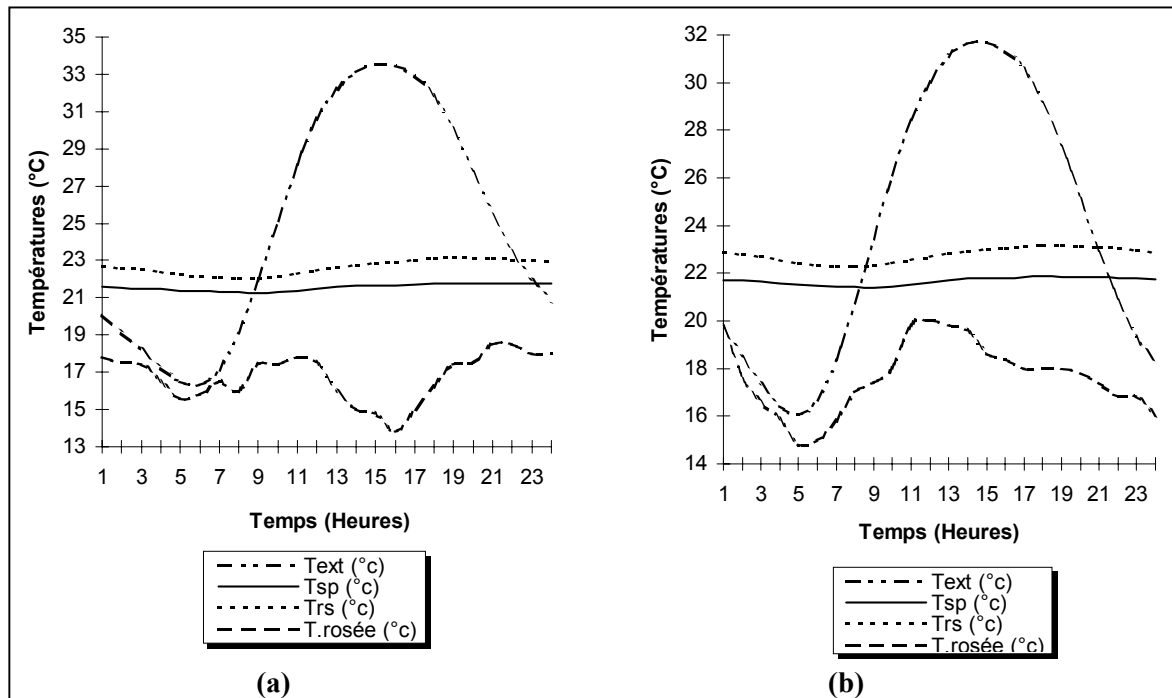


Figure 10: Evolution des températures (Trs, Tsp) avec une température d'entrée de 19°C.
 (a) Journée du 05 Août, (b) Journée du 06 Août.

2. CONCLUSION

Les simulations réalisées au cours de ce travail ont montré que l'utilisation de la technique du plancher solaire direct dans un climat Algérien est très prometteuse. Les besoins d'énergie couverts par le solaire sont de 90% environ des besoins totaux du bâtiment avec un ratio de captation (surface capteurs sur surface plancher chauffant) de 0.2 et de 60% avec un ratio de 0.1 seulement. L'étude entreprise montre aussi que, dans le cas d'un climat maghrébin, les capteurs solaires peuvent être dimensionnés avec une surface moins importante.

Nous avons vu aussi que l'utilisation d'une dalle mince (10 cm d'épaisseur) ne réduit qu'à 7 % les performances énergétiques en chauffage par rapport à la dalle de 30 cm à condition que celle-ci soit munie d'un système de régulation anti-surchauffe. De même, on a montré que la conception d'un PSD sur terre-plein apporte une amélioration, par rapport au PSD sur vide sanitaire, quant aux performances due à la grande capacité de stockage calorifique qu'offre le sol sous-jacent.

Les résultats trouvés dans cette étude ne peuvent que confirmer l'importance du gisement solaire en Algérie. Ceci pourra conduire alors à des considérations simplificatrices quant à l'utilisation des éléments de l'installation solaire. En effet, l'utilisation des absorbeurs couverts de couche de peinture noire pourra donner des résultats intéressants, il n'est donc pas nécessaire d'utiliser des revêtements sélectifs dans le but de réaliser des couvertures solaires plus importantes avec une installation inutilement chère.

L'application de la technique du plancher solaire direct en Algérie mérite donc l'attention des thermiciens Algériens. L'étape suivante est d'analyser économiquement cette technique en la comparant aux autres méthodes de chauffage traditionnelles.

L'étude théorique du plancher rafraîchissant a mis en évidence que le procédé pouvait effectivement donner satisfaction en matière de rafraîchissement des ambiances, un abaissement de 4°C des températures d'air et résultante étant possible avec une température

du fluide relativement élevée, de l'ordre de 22.5°C. La température du fluide doit être choisie en fonction du confort thermique et du risque de condensation.

En perspective, il serait intéressant d'étudier un plancher réversible (chauffage/ rafraîchissement) de la manière suivante: en hiver fonctionnant comme un plancher solaire direct et en été comme un plancher équipé d'un circuit hydraulique couplé à un échangeur.

REFERENCES

- [1]- D. Roux, D. Mandineau et M. Chateauminois, '*Calcul des planchers solaires directs*' Edisud 1983.
- [2]- T. Letz et P. Papillon, '*Maisons individuelles équipées d'un plancher solaire direct, Résultats d'une campagne de suivi*', Séminaire AFME Solaire Thermique 1990, Sophia Antipolis, 4 et 5 juillet 90.
- [3]- E. Michel et J. P. Isoardi, '*Dossier rafraîchissement par le sol*', Le journal CCI numéro 3 édition Française, 15 mars 1994.
- [4]- E. Michel, '*Les installations de rafraîchissement par le sol*', Revue Promoclim tome 25 N°2, mars/avril 1994
- [5]- TRNSYS, '*A Transient System Simulation Program.*', Manual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, U.S.A.
- [6]- P.Papillon, '*Contribution à l'amélioration de la technique du plancher solaire direct. Analyse de la solution " Dalles minces " et gestion optimisée du chauffage d'appoint.*' Thèse de Doctorat- Université de Savoie- 1992.
- [7]- Document Technique Unifié DTU 65.8, '*Execution des planchers à eau chaude utilisant des tubes en matériaux de synthèse noyés dans le béton*', Février 1990.
- [8]- A.Mokhtari, '*Etude du comportement thermique des bâtiments en contact avec le sol par l'analyse modale*'. Thèse de Doctorat- INSA de Lyon-1988.
- [9]- T.Cabirol et D.Roux, '*Chauffage de l'habitat et énergie solaire. Tome 1: Chauffage solaire de l'habitat*'. Edisud 1984.
- [10]- P.O. Fanger, '*Les exigences du confort thermique*'. 2^{ème} Congrès ICBEM, Ames, Iowa, 1983.