

ETUDE DU COMPORTEMENT ET DE LA RENTABILITE ECONOMIQUE DU SYSTEME DE CHAUFFAGE SOLAIRE BARRA-COSTANTINI DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES DE L'ALGERIE

K.IMESSAD*, N.AIT MESSAOUDENE**, M.BELHAMEL*

*Centre de Développement des Energies Renouvelables, 16340 Bouzaréah, Algérie

**Département de Mécanique, Université de Blida, Algérie

RESUME

Ce travail représente l'étude d'un système de chauffage solaire passif, avec un intérêt particulier accordé à l'aspect économique. Le système étudié est celui développé par O.A.Barra et T.Costantini, ce système nous semble bien adapté aux conditions climatiques et économiques de l'Algérie. Dans la première partie de ce travail, un modèle théorique représentant le comportement thermique d'un local muni du dispositif de chauffage étudié est élaboré. Le modèle est validé après confrontation des résultats auxquels il aboutit avec ceux d'une étude expérimentale réalisée sur un site italien. Le modèle permet dans un premier temps de déterminer l'évolution de la température des différents éléments d'un local muni du système Barra-Costantini afin de déterminer si les conditions de confort thermique sont respectées. Cette étude permet de quantifier l'économie d'énergie réalisée par l'adjonction du système étudié à un système de chauffage classique. L'introduction d'un rapport entre le coût de l'énergie et le coût de l'équipement permet de conclure que seule une intervention des pouvoirs publics permet de rendre le système solaire passif économiquement viable.

Mots clés : Chauffage solaire passif, Economie d'énergie, Indice de rentabilité.

NOMENCLATURE

A_d = Surface du canal [m^2]

A_v = Surface des orifices [m^2]

C_{p_f} = Chaleur spécifique de l'air [J/kgK]

g = La constante gravitationnelle [m^2/s]

H = Hauteur du local [m]

h_a = Coefficient d'échange par convection dans le canal [$W/m^2°C$]

S_a = Surface de l'absorbeur [m^2]

T_a = Température de l'absorbeur [$°C$]

T_{am} = Température ambiante [$°C$]

T_{ae} = Température du ciel [$°C$]

T_{cv} = Température des chambres voisines [$°C$]

T_{in} = Température intérieure [$°C$]

T_f = Température moyenne de l'air dans le canal [$°C$]

T_v = Température de la vitre [$°C$]

1. INTRODUCTION

L'augmentation du prix de l'énergie a suscité l'intérêt d'utiliser des sources d'énergie gratuites et inépuisables comme celle provenant du rayonnement solaire. L'addition d'un système de chauffage solaire passif à un logement est une solution séduisante pour l'économie et l'utilisation rationnelle de l'énergie. Parmi ces systèmes figure le mur Trombe qui consiste en un mur en maçonnerie lourde muni de deux orifices et disposé derrière un vitrage orienté vers le sud. J.J.Bezian et G. Arnaud [1] ont conçu un système assez proche du mur Trombe à la différence près qu'ils ont disposé des espaces parallépipédiques remplis d'eau à l'intérieur du mur capteur. Dans un autre dispositif étudié par Melih Tan [2], l'énergie solaire récupérée dans un capteur orienté sud est transférée dans un capteur nord. L'intérêt de ce système n'est pas de chauffer directement l'espace intérieur mais plutôt de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur. A la suite des études menées par O.A.Barra et T.Costantini [3] un autre dispositif a été mis au point. Contrairement à beaucoup de systèmes de chauffage solaire qui peuvent produire un mauvais confort thermique à l'intérieur des locaux à chauffer, le système Barra-Costantini (B-C) a l'avantage d'être un régulateur naturel en emmagasinant la chaleur le jour pour la restituer le soir. L'intérêt de ce travail est d'étudier le comportement thermique d'un local muni du système (B-C) et d'évaluer les économies d'énergies qu'il engendre dans différentes régions climatiques d'Algérie.

2. DESCRIPTION ET MODELISATION DU SYSTEME

Le système Barra–Costantini (Fig. 2.1) est basé sur les techniques d'un capteur à air avec mise en place d'un absorbeur (1) entre un mur (2) et un vitrage (3) de manière à profiter d'une double circulation naturelle. Durant les journées d'hiver, l'air de par et d'autre de l'absorbeur se chauffe, remonte naturellement et pénètre dans des canaux situés dans le plafond (4). Une partie de la chaleur est absorbée par ce dernier puis restituée après un certain temps, alors qu'une deuxième partie est directement injectée sous forme d'air chaud, participant à un chauffage instantané du local.

Le modèle mathématique mis en place est basé sur la méthode nodale. Le modèle a été élaboré en se basant sur les hypothèses suivantes :

- Chaque nœud représente un volume dont la température est relativement uniforme.
- Le débit massique de l'air qui s'écoule dans la cheminée solaire est constant pour éviter les risques de surpression ou dépression dans le local. Ce débit est supposé uniformément réparti dans les différentes gaines se trouvant dans le plafond.
- La température de l'air à l'entrée des gaines est égale à la moyenne des températures de l'air des deux cheminées solaires.

Les différents nœuds adoptés sont représentés sur la Fig. 2.1. La mise en équation des échanges thermiques a été faite en se basant la méthode de l'analogie électrique (Fig. 2.2) ou :

- Les températures sont représentées par des potentiels électriques.
- Les flux sont représentés par des intensités de courant.
- Les résistances thermiques sont représentées par des résistances électriques.
- Les capacités thermiques sont représentées par des condensateurs.

Soit i un nœud représentant un volume de masse M_i (kg), de chaleur spécifique C_{pi} (J/kg°k) et de température T_i . Le bilan thermique en chaque nœud i donne :

$$M_i.C_{pi} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j \in J_i} \frac{1}{R_{ij}} (T_i - T_j) + I_i \quad (1)$$

J_i : Ensemble des nœuds j connectés au nœud i

R_{ij} : Représente les résistances thermiques.

I_i : Source de chaleur.

Le débit massique de l'air qui s'écoule dans le canal est assimilé au cas d'un mur Trombe, il peut être calculé par la relation suivante [4] :

$$\dot{m} = r.A.d \sqrt{\frac{2.g.H.(T_f - T_{in})}{C.T_f}} \quad (2)$$

$$\text{où } C = C1 \left[\frac{Ad}{Av} \right]^2 + C2 \quad \text{avec } C1=8 \quad \text{et } C2=2$$

La température de l'air dans ce dernier est supposée varier en exponentielle, T_f est donnée par

$$T_f = T_{in} + \left(\frac{2.T_{in} - T_v - T_a}{2} \right) \left(\frac{-\dot{m}.C_{p_f}}{2.h_a.S_a} \left(\exp \left[\frac{-2.h_a.S_a}{\dot{m}.C_{p_f}} \right] - 1 \right) - 1 \right) \quad (3)$$

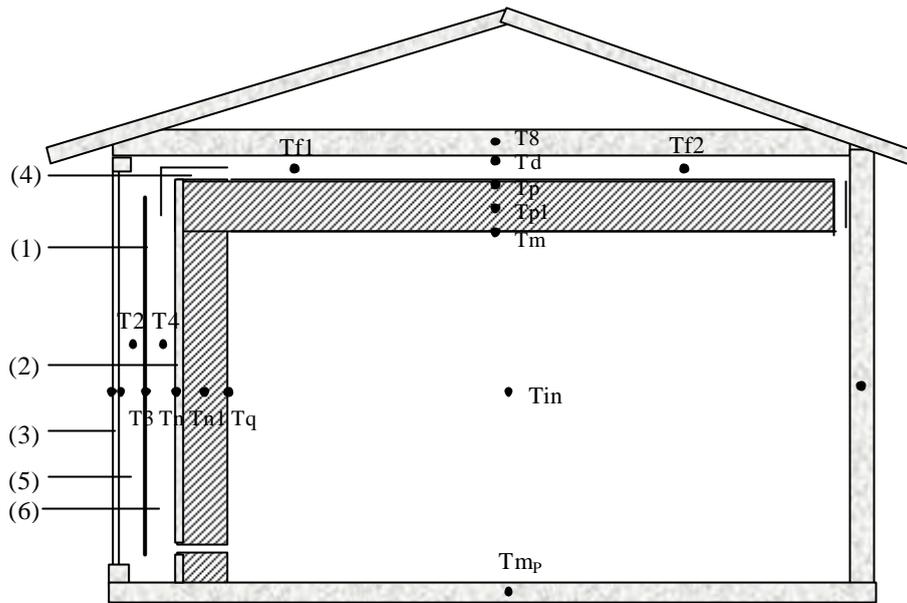


Fig. 2.1 : Modélisation du local.

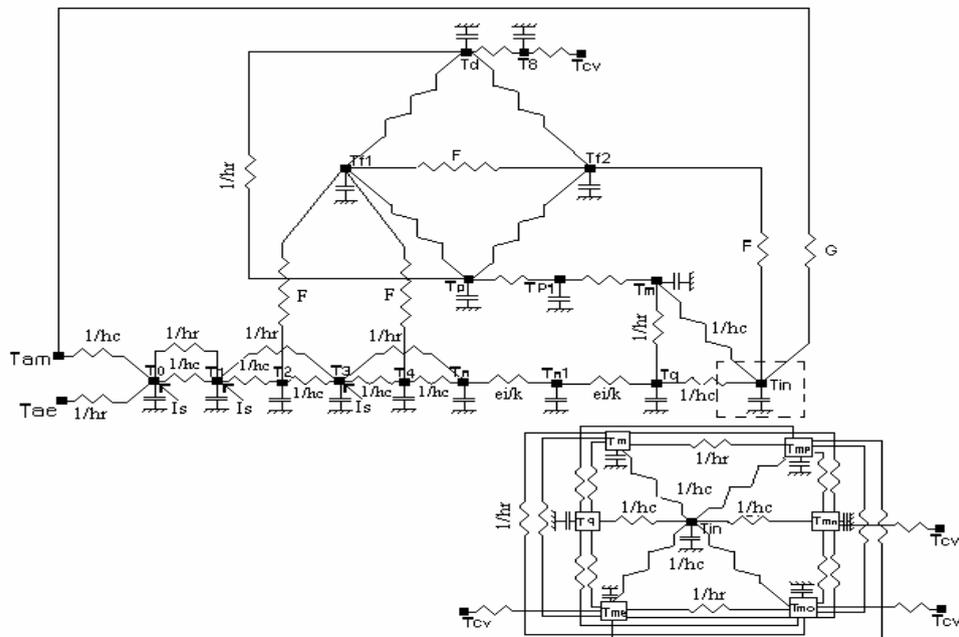


Fig. 2.2 : Schéma électrique.

Avec I_s représentant l'irradiation solaire incidente sur le vitrage et l'absorbeur; h_c est le coefficient de transfert par convection; h_r est le coefficient de transfert par rayonnement et F est la résistance au transfert d'énergie à travers l'écoulement de l'air dans les canaux.

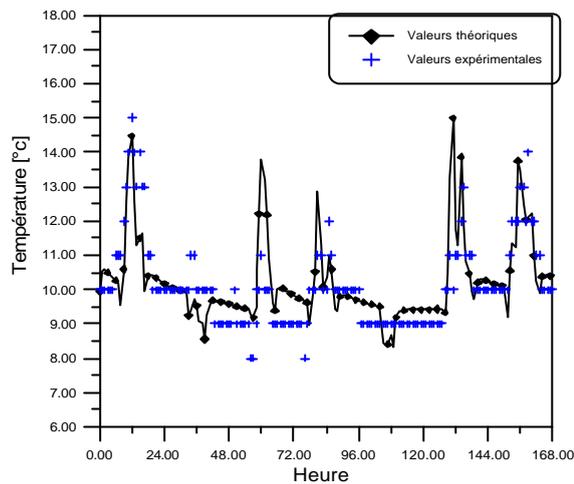
3. VALIDATION DU MODELE

Afin de vérifier le modèle théorique, nous avons pu disposer des résultats d'une étude expérimentale menée sur une chambre munie du système Barra-Costantini (B-C). La maison testée [5] est située à environ 18 km de Florence en Toscane (Italie), longitude $11^{\circ}16'E$, latitude $43^{\circ}50'N$ et altitude 490 m

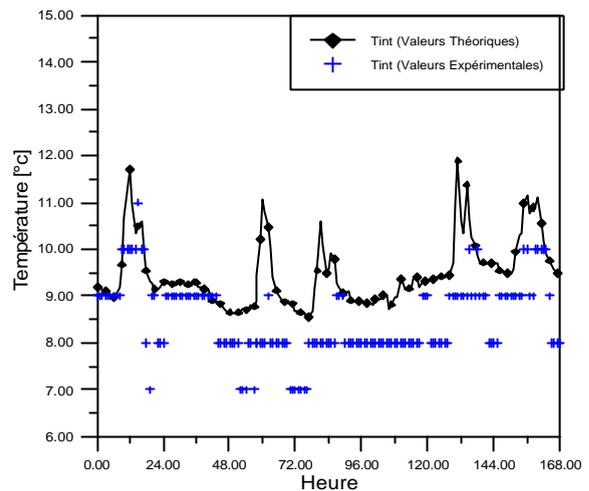
Les mesures des températures ont été prises à l'aide de thermocouples qui ont été installés comme suit :

- Un thermocouple est placé sur la surface intérieure du plafond.
- Deux thermocouples sont placés au centre des orifices supérieurs et inférieurs.

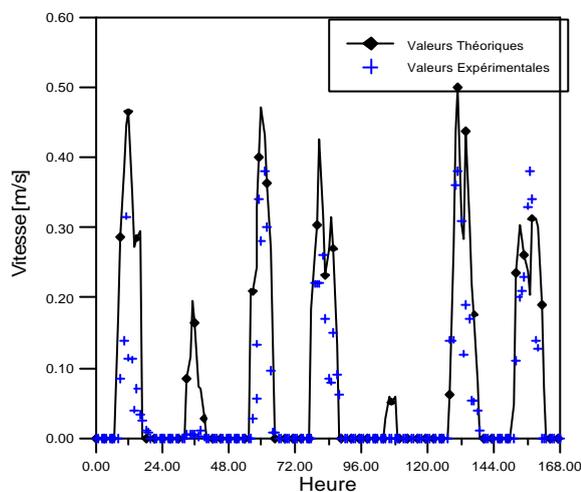
La vitesse de l'air à la sortie des orifices a été mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud.



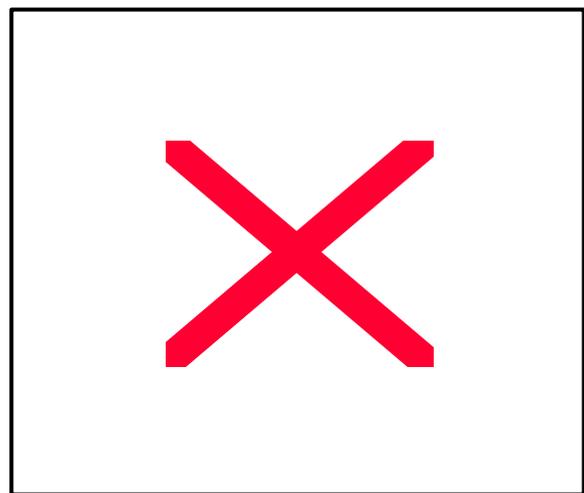
(a) Température à la sortie des canaux



(b) Température intérieure



(c) Vitesse de sortie de l'air



(d) Température du plafond

Fig. 3.1 : Confrontation des résultats théoriques et expérimentaux.

Température de sortie de l'air chaud

La courbe 3-1(a) illustre les températures calculées et les températures mesurées de l'air à sa sortie des tubes. Nous constatons des formes sinusoïdales identiques pour les deux courbes, l'écart entre les deux températures atteint jusqu'à 3°C pour les valeurs maximales et ne dépasse pas 1°C pour les valeurs minimales. Ces écarts peuvent être occasionnés par des erreurs de mesure et du fait que le calcul de la température de sortie se fait sur une tranche moyenne, alors que les mesures expérimentales sont ponctuelles.

Vitesse de sortie de l'air chaud

La figure 3-1(b) illustre la vitesse théorique et la vitesse expérimentale de sortie de l'air chaud des canaux. Nous constatons que l'allure des deux courbes est similaire avec une bonne concordance entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales.

Température intérieure du local

Les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales sont portées sur la figure 3-1(c). Nous constatons que les deux températures sont assez concordantes avec un écart n'excédant pas les 2 °C. La courbe montre un certain déphasage à certains moments entre le modèle et la réalité. Ce déphasage pourrait provenir du fait que la température du local est mesurée près des orifices inférieurs, alors que le modèle théorique suppose une température uniforme dans toute la pièce. Les ouvertures et fermetures des ouvrants, qui provoquent une entrée d'air frais, sont difficiles à classer dans le modèle théorique vu qu'ils ne sont pas prévisibles, ceci peut expliquer les chutes brusques des températures enregistrées.

Température du plafond

La figure 3–1(d) illustre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales. Nous constatons un écart de 1°C lors de la première journée avant d’atteindre une parfaite concordance lors des autres journées.

La confrontation des résultats, illustrée par la figure 3.1, auxquels aboutit le modèle mathématique avec ceux de l’expérience montre une assez bonne concordance, ce qui en fait un modèle apte à être utilisé pour la suite de notre travail.

4. PERFORMANCES DU SYSTEME DANS LES CONDITIONS CLIMATIQUES DE L’ALGERIE

La chambre simulée fait partie d’une maison individuelle type du parc immobilier algérien, celle-ci possède une forme intermédiaire qui fait le lien entre une villa coloniale et un bâtiment à appartements (Fig. 4.1). Cette chambre fait 3,7m de largeur, 4,5 m de longueur et 3,06 m de hauteur. Les murs sont en brique alors que le plafond est en béton armé de 20 cm d’épaisseur. La distance vitrage absorbeur et absorbeur mur est de 10 cm. Le capteur est connecté à 5 canaux situés dans le plafond de 45 cm de largeur et 10 cm de hauteur.

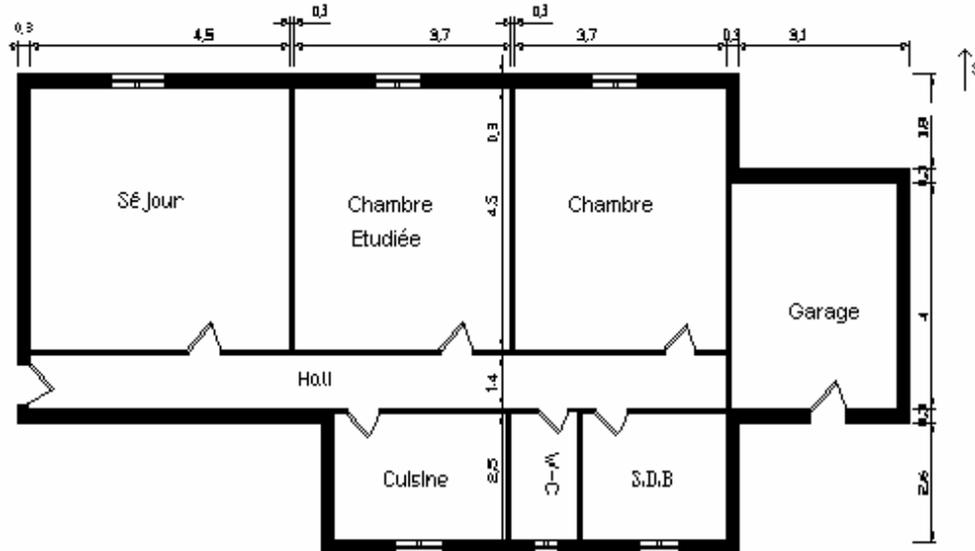


Fig. 4.1 : Plan R.d.C d’une habitation type.

4.1 PERFORMANCES DU SYSTEME SANS APPOINT

Une analyse des performances thermiques du système Barra–Costantini est faite pendant six jours d’un mois de janvier pour la région d’Alger (Latitude =36°8 N, Longitude =03°25 E). La figure 4.2 est une comparaison entre la température intérieure d’un local équipé du système B–C et un local classique non chauffé. Nous constatons que la mise en place du dispositif de chauffage apporte un gain de chaleur permettant une élévation de la température d’environ 1,5°C le soir à 3°C le jour. La température maximale est atteinte vers 15h et ne dépasse 22°C.

La figure 4.3 représente l’évolution de la température des différentes parois du local. En raison de leur forte inertie, les parois en maçonnerie auront tendance à réagir lentement aux évolutions de la température extérieure et joueront le rôle de masses thermiques, stockant la chaleur durant l’heure de pointe pour la restituer après un certain moment. En comparant les pics des courbes de variation de la température extérieure et celle des parois nous pouvons voir que le temps de réponse est d’environ 5h, c’est le temps que met la chaleur pour traverser les murs.

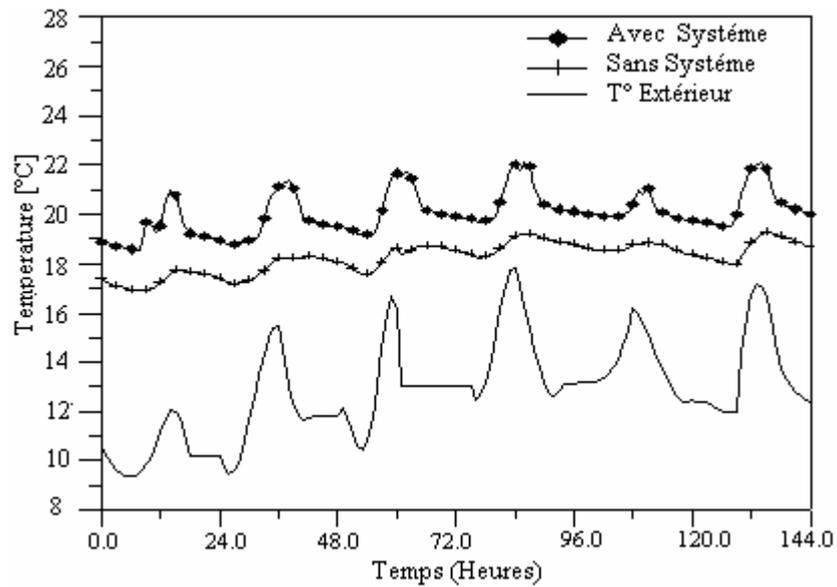


Fig. 4.2 : Température intérieure.

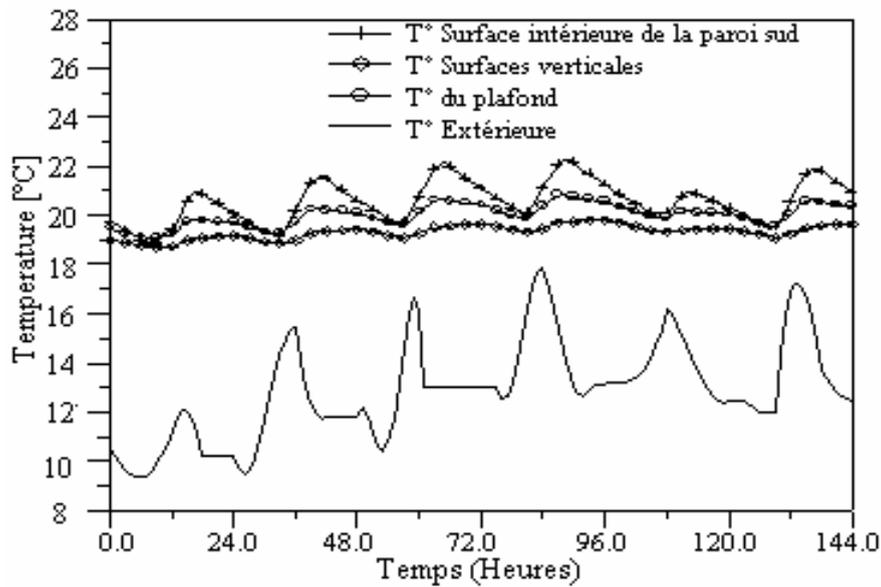


Fig. 4.3 : Température des parois.

4.2 PERFORMANCES AVEC APPOINT ET ECONOMIES D'ENERGIE

Les économies d'énergies engendrées par la mise en place du système de chauffage sont évaluées en effectuant une comparaison entre les besoins de chauffage de deux maisons identiques, l'une classique [A] chauffé uniquement au gaz naturel et une deuxième [B] équipée du système (B-C) et d'un chauffage d'appoint au gaz naturel. Les besoins de chauffage sont ce que doit fournir un système de chauffage pour atteindre une température de consigne de l'ordre 20°C. Ces besoins sont calculés en évaluant les pertes de chaleur à travers les matériaux de construction et par infiltration pour une journée moyenne de chaque mois de la saison de chauffe. Les besoins de chauffage mensuels dans trois régions (Alger, Constantine et Djelfa) représentant trois zones climatiques du nord de l'Algérie [6] susceptible d'adopter le système de chauffage étudié, sont représentés sous forme d'histogrammes d'après la figure 4.4. Nous pouvons observer que la mise en place du système (B-C) engendre une économie de 60% à 70% de la puissance de chauffage à installer.

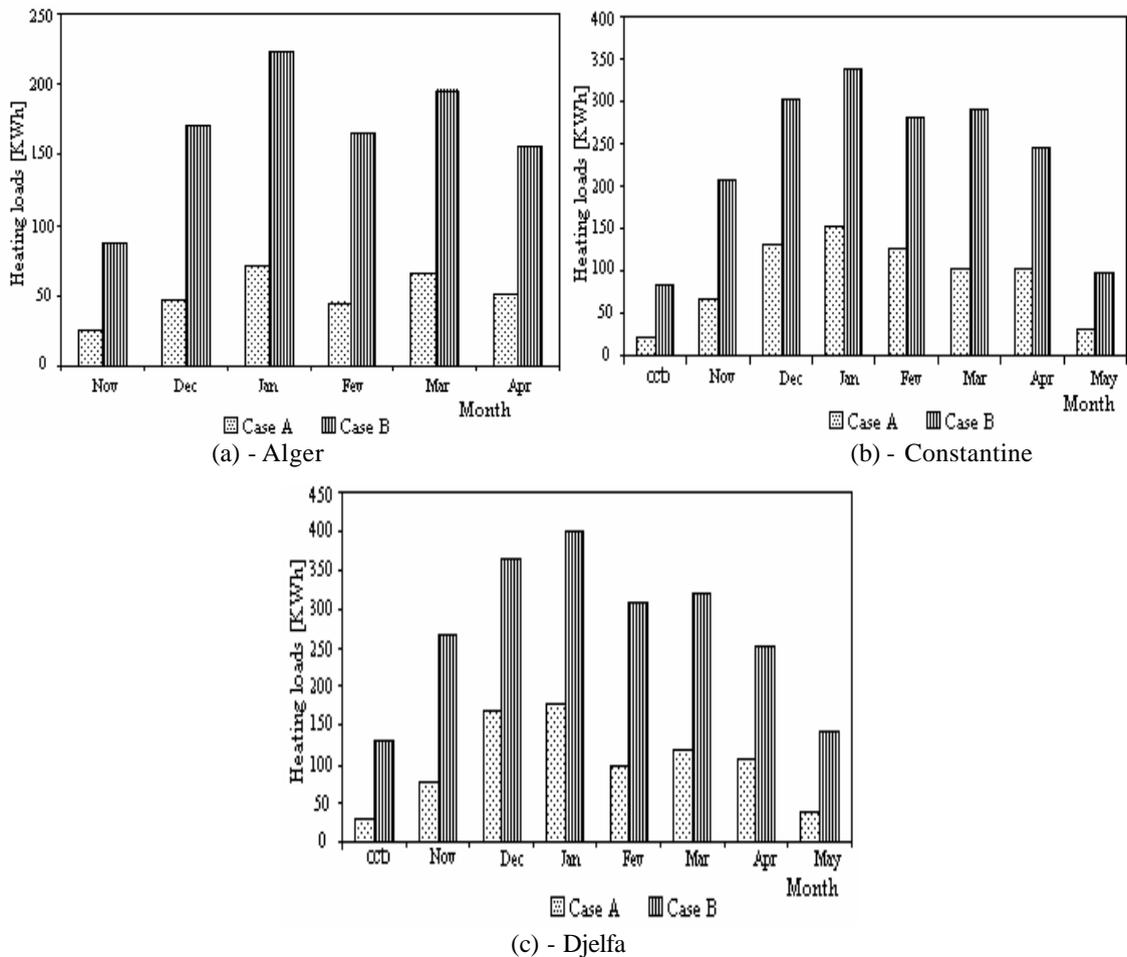


Fig. 4.4 : Besoins mensuels de chauffage.

Il est utile de préciser qu'un système de chauffage passif ne peut subvenir seul aux besoins journaliers, et doit de ce fait être couplé à un système de chauffage classique. L'évolution en Dinars (Da) des charges de chauffage est faite à partir d'un prix du m³ de gaz égale à 2.8 Da qui est le prix adopté par SONELGAS (Société Algérienne d'électricité et de gaz).

. Les bénéfices annuels réalisés sont donnés par le tableau 4.1.

Tab. 4.1 : Charge de Chauffage et bénéfices réalisés

		Alger		Constantine		Djelfa	
		A	B	A	B	A	B
Charge annuelle de chauffage [KWh]		996.5	304	1844	736.2	2185	819.4
Chauffage à gaz	Coût [Da]	360	110	665	266	789	295
	Economie [Da]	260		400		495	

5. RENTABILITE DU SYSTEME

L'indice de rentabilité est défini comme le rapport des bénéfices liés aux économies d'énergies sur le surcoût occasionné par la mise en place du procédé passif. Un système est rentable si l'indice de rentabilité atteint la valeur 1 pendant la durée de vie présumée du dispositif. Cette dernière étant difficilement estimable, une durée de vie de l'ordre de 50 ans semble réaliste. Afin d'analyser la rentabilité du système Barra–Constantini,

nous définissons un coefficient (RCGE) représentant le rapport entre le coût du gaz naturel et le surcoût de l'équipement (Pour un logement type) tel que :

$$RCGE = \frac{\text{Coût } 1000 \text{ m}^3 \text{ Gaz}}{\text{Coût de l'installation}} \quad (4)$$

En Algérie, avec un RCGE actuel égale à 0.05, le système n'est pas rentable (Voir Fig. 5.1). Il nous a semblé intéressant de comparer cette rentabilité entre l'Algérie où le prix de l'énergie est toujours subventionné par l'état, et dans un pays comme la France où le prix du gaz est stable depuis quelques années et avoisine 0.3 Fr/KWh. Avec un RCGE égale à 0.30 et malgré un prix du gaz qui reste assez bon marché, l'investissement en France est amorti après 30 ans ce qui est inférieur à la durée de vie du dispositif. L'indice de rentabilité, comme le montre la figure 5.1 est intimement lié au coefficient RCGE, ce coefficient peut passer de 0.05 à 0.30 si l'état algérien venait à adopter l'une des résolutions suivantes :

1. Multiplier le prix du gaz par 5.
2. Prendre en charge 80% des coûts de l'installation.
3. Multiplier le prix du gaz par 2,5 et prendre en charge 60% des coûts d'installation.

Si l'un de ces scénarios se réalise, le système de chauffage deviendrait assez rentable avec un indice de rentabilité qui atteindrait la valeur 1 durant la deuxième décennie. En plus des économies d'énergies engendrées, le rôle écologique que jouent les systèmes de chauffage solaire dans la diminution des émissions des gaz à effet de serre peut constituer une motivation qui pousserait les décideurs à promouvoir ces systèmes et cela à travers la prise en charge d'une partie de l'investissement.

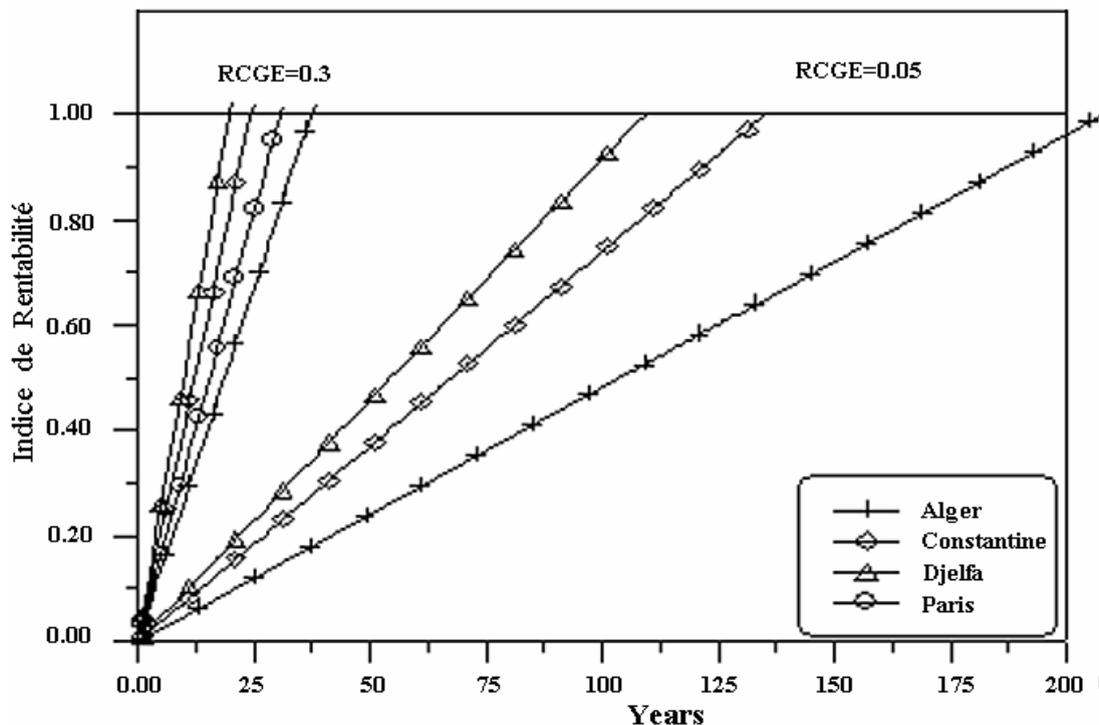


Fig. 5.1 : Indice de Rentabilité du système.

6. CONCLUSION

Le présent travail a porté sur l'étude du système de chauffage solaire passif développé par O.A.Barra et T.Costantini. Ce travail, qui a pour objectif de démontrer l'adaptabilité du système Barra–Costantini aux conditions climatiques de l'Algérie, s'est axé sur trois principaux thèmes : Le gain d'énergie apporté par la mise en place du dispositif, sa rentabilité économique, et sur le confort thermique engendré.

Un modèle mathématique simulant le comportement thermique d'un local muni du système de chauffage a été mis en place. Afin de valider ce modèle une comparaison a été effectuée entre les résultats auxquels aboutit la modélisation et les résultats d'une étude expérimentale menée sur une maison située à Palerme. La confrontation des deux résultats a montré une bonne concordance. Le modèle a été utilisé pour simuler le comportement,

durant plusieurs journées d'hiver, d'un local type muni du système de chauffage dans les conditions climatiques de la région d'Alger. Nous avons déterminé que le système génère un gain d'énergie permettant une élévation de la température intérieure d'environ 1,5°C à 3°C tout en respectant les conditions de confort exigées pour le bien être des habitants.

Nous avons pu déterminer grâce à ce travail que la mise en place du système Barra–Costantini, dans les différentes zones climatiques de l'Algérie, réduit les besoins annuels de chauffage de 60% à 70%. La rentabilité de ce système reste tributaire d'un coefficient 'RCGE' qui représente le rapport entre le coût du gaz et le coût de l'investissement. Dans l'état actuel des choses le système est peu rentable en raison d'un prix du gaz soutenu par l'état algérien. Si l'état abandonne son soutien et prend en charge 60% du coût de l'investissement le RCGE passerait de 0.05 (Valeur actuelle) à 0.3 qui est la valeur équivalente de ce coefficient dans les pays européens. Si ce scénario se réalise le système serait amorti en moins de 25 ans.

Il serait intéressant de poursuivre ce travail par l'étude de l'impact écologique qu'engendre la mise en place du dispositif, et cela à travers une analyse quantitative de la réduction des émanations des gaz nocifs dans l'atmosphère grâce à l'installation de systèmes de chauffage passif tel que celui présenté dans notre étude.

REFERENCES

- [1]- J.J.Bezian, G. Arnaud, "*Application de la convection naturelle en cavité inclinée au chauffage solaire passif*". Séminaire sur l'énergie solaire, Canne (1982).
- [2]- Melih Tan, "*Opposite Sunspaces Passive Solar Air Heating System*". Solar Energy, vol. 60 (1997), pp. 127-134.
- [3]- O.A.Barra and E.Pugliese Carratelli, "*A Theoretical Study of Laminar Free Convection in I-D Solar Induced Flow*", Solar Energy, vol. 23, pp. 211-215, (1979).
- [4]-.Utzinger, D.M, "*Analysis of Buildings Components Related to Direct Solar Heating Buildings*", M.S.Thesis, University of Wisconsin, Madison, (1979).
- [5]- A. Zerrouki, "*Expérimentation d'un Capteur Solaire à Air avec Absorbeur en forme de persiennes pour une utilisation en architecture*". Thèse de Magister, Centre d'Etudes Nucléaires et Solaires, (1986).
- [6]- J-C-Borel, "*Etude Justificative de la Définition des Zones Climatiques en Algérie*". Cahier du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, août (1962)
- [7]- Andreak k. Athienitis, "Investigation of thermal performance of a passive solar building with floor radiant heating". Solar Energy, vol. 61, N° 5 (1997), pp. 337-345.