

# Impact de l’Inertie Thermique de la Pierre sur les Températures Intérieures d’un Habitat Situé au Sahara Algérien

M.A.C. Haddam, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz et M.R. Yaïche

**Abstract** - Une forte inertie d’une maison en pierre peut être bénéfique pour la température intérieure, mais attention, dans les zones sahariennes, chaque cas est particulier, chaque maison mérite que l’on se penche sur sa structure afin de ne pas faire de bêtises. En effet, nous avons montré dans cet article que la pierre est déconseillée pour certaine construction. Un mur en pierre, même plus de 80 cm d’épaisseur, n’empêche nullement la chaleur de s’échapper vers l’extérieur ou vers l’intérieure. C’est dans ce contexte que s’inscrit notre étude, on s’intéresse essentiellement à démontrer le précieux rôle de l’inertie thermique de la pierre sur les températures intérieures d’un bâtiment situé dans une zone aride ou semi-aride. Nous allons ensuite prouver en résolvant l’équation de la chaleur de Fourier par la méthode des éléments finis que l’inertie thermique des murs en pierre peut donc générer de l’inconfort.

**Mots clés** - Bâtiment – Température – Pierre – Simulation Numérique – Equation de la Chaleur.

## I. INTRODUCTION

La situation actuelle en Algérie se caractérise par l’absence de contraintes concernant le confort en général et l’inertie en particulier. En principe, une réglementation thermique imposera des solutions techniques pour garantir un confort minimal. Celles-ci concernent principalement l’inertie, les protections solaires des baies vitrées et la ventilation. Ces solutions se déclineront selon la zone climatique, pondérée par l’altitude du site et l’exposition aux bruits.

La pierre massive, très lourde (1 tonne / m<sup>2</sup>) devient le lieu de stockage de l’énergie distribuée par l’environnement. Elle s’oppose aux variations brusques de température avec un facteur d’amortissement de l’ordre de 12 heures.

M.A.C. Haddam, Laboratoire de Physique Electronique et Modélisation, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen. BP. 119, Tlemcen R.P. 13000 - Algérie

S.M.A. Bekkouche, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER. B.P. 88, ZI, Garet. Taam Ghardaïa, 47000 - Algérie

T. Benouaz, Laboratoire de Physique Electronique et Modélisation, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen. BP. 119, Tlemcen R.P. 13000 - Algérie

M.R. Yaïche Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l’Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie.

Gérant les variables: température et hygrométrie et leur variation, la pierre instaure une nouvelle conception du confort reposant sur l’amortissement des fluctuations: première origine de l’inconfort. La chaleur distribuée l’est toujours sur le mode du rayonnement ce qui minimise les flux échangés pour un résultat identique.

Une trop forte chaleur à l’intérieur d’une habitation est un facteur d’inconfort important. Le niveau de confort ou d’inconfort thermique est apprécié au moyen de la température opérative existante dans un bâtiment et calculée tout au long d’un jour de référence.

L’évaluation des charges thermiques des logements est un exercice très complexe qui prend du temps et représente l’une des étapes les plus importantes dans la conception bioclimatique. A cet effet, le calcul des températures ainsi que la perception de l’aspect dynamique des transferts thermiques tiennent une place très importante dans ce papier et dans ces genres de problèmes [1].

## II. PLAN DESCRIPTIF ET MODELE MATHEMATIQUE

Généralement, la pierre n’est plus un matériau très utilisé. Réputée chère et difficile à mettre en oeuvre, elle disparaît progressivement de la construction neuve au profit du Bloc béton ou de la brique. Les logements traditionnels de Ghardaïa ont été notre source d’inspiration dans la proposition de ce plan. Il est adapté aux commodités de la vie contemporaine, tel que l’utilisation des matériaux locaux à l’image de la pierre, le plâtre, la chaux et même le ciment mortier. La figure 1 est une schématisation d’une habitation réelle située au rez-de-chaussée ou au premier étage comprenant les éléments suivants:

– L’enveloppe du bâtiment ou parois extérieures constituées d’une structure lourde généralement en 40 cm de pierre, en deux couches de 1.5 cm du ciment mortier et en couche supplémentaire de 1 cm d’enduit de plâtre.

– Les parois intérieures (murs de refend) dont les faces sont seulement en contact avec l’ambiance intérieure sont composées d’une structure lourde de 15 cm de pierre, de deux couches de 1.5 cm du ciment mortier et de deux couches de 1 cm d’enduit de plâtre.

– Le plancher est posé sur une terre pleine et plate pour le logement du rez-de-chaussée. Il est situé et coulé directement sur le sol, n’occasionne que peu de déperditions. La forme est constituée de sable, du béton et du carrelage. C’est un

revêtement de finition, permet un traitement surfacique, antidérapant, résistant à l'usure, aux produits chimique...

– Le toit est composé d'hourdis ciment, d'une dalle de béton, du sable et du ciment mortier de telle façon que les fondations tiennent le coup et acceptent la charge. Pour permettre l'écoulement des eaux, on aura une petite pente (moins de 5%) et plusieurs trous d'évacuation. Jusqu'à présent, les toits plats étaient plus perçus comme des nids à infiltration que comme une solution architecturale [2, 3].

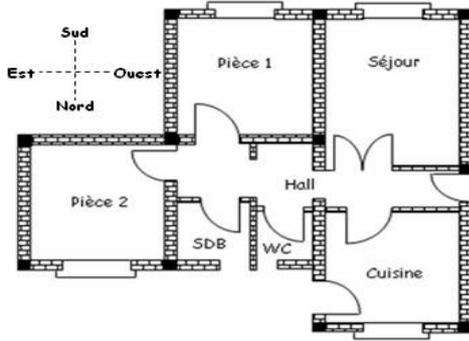


Fig. 1. Plan descriptif de l'habitat.

Pour l'estimation des éclairagements reçus sur les différentes surfaces des murs, on utilise un programme de calcul de rayonnement conçu sous Excel pour les 48 wilayas d'Algérie. Il a pour objectif d'une part d'identifier deux modèles de connaissance (modèle de Liu & Jordan et celui de Capderou), et d'autre part de participer au développement de l'outil de simulation correspondant. C'est un outil de simulation qui a pour finalité d'être ensuite couplé à une interface professionnelle, qui soit manipulable de manière conviviale par les chercheurs [4, 5]. La figure 2 représente une interface graphique de programme qui donne l'éclaircement solaire incident sur le mur nord de l'habitat.



Fig. 2. Interface graphique donne les valeurs calculées de l'éclaircement incident sur le mur nord de l'habitat.

Il est légitime de dire que la complexité mathématique de ces problèmes physiques n'est pas un critère suffisant pour juger si le modèle du bilan énergétique de l'habitat est pertinent ou non: il existe des classes de modèles qui font appel à des outils mathématiques très complexes, telle la recherche opérationnelle. Selon les travaux de Bekkouche et al, le modèle de base est acceptable vue que l'expérience s'accorde généralement avec la théorie. Il n'est pas question dans cet article si court de présenter la méthodologie applicable à

toutes les situations. Cependant, ces travaux de modélisation menés au sein de notre équipe ont donc pour objet de proposer des alternatives, aussi bien au niveau des modèles physiques (études asymptotiques, méthodes fluides, etc.) que des méthodes numériques (implicites, pas de temps, etc.), afin de rendre ces simulations utilisables dans un contexte [1, 2, 3, 6-14].

### III. SIMULATION DES TEMPERATURES INTERIEURES ET EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA PIERRE

L'analyse par simulation vise à modéliser le comportement thermique d'un bâtiment heure par heure. Elle permet de déterminer quelques solutions améliorant les conditions de confort et les performances énergétiques de l'habitation. Un programme de simulation dynamique permet de calculer toutes les heures la température intérieure des pièces du bâtiment. La connaissance de l'évolution des températures permet de mieux appréhender les situations de confort ou d'inconfort rencontrées durant l'été et l'hiver et de calculer les besoins énergétiques en tenant compte des variations climatiques jour/nuit. Le programme utilisé permet de réaliser des simulations dès les premières esquisses du projet. Il permet aussi d'effectuer une comparaison entre les températures de l'habitat. Pour ce faire, on prend l'exemple donné par la figure 3 qui représente les courbes des températures de chaque lieu. On remarque que la température de la pièce 2 est généralement la plus élevée. Ces résultats peuvent être justifiés sans doute par le nombre de murs exposés au soleil qui est le plus grand. En partant de ce principe, on peut prévoir sans faire les études que les températures de la toilette et de la salle de bain sont les plus inférieures. On constate aussi que la température du séjour devient plus grande le soir et elle est par contre plus petite le matin par rapport à la température de la pièce 1. Tandis qu'on constate absolument le contraire pour la pièce 1. La raison c'est que les murs Sud et Est sont ceux qui sont exposés au soleil pour la pièce 1. Par contre, pour le séjour, c'est les murs Sud et le mur Ouest qui sont exposés aux différentes conditions climatiques. Donc, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée le matin par les murs de la pièce 1 est plus grande par rapport à celle absorbée par les murs exposés du séjour et vice-versa.

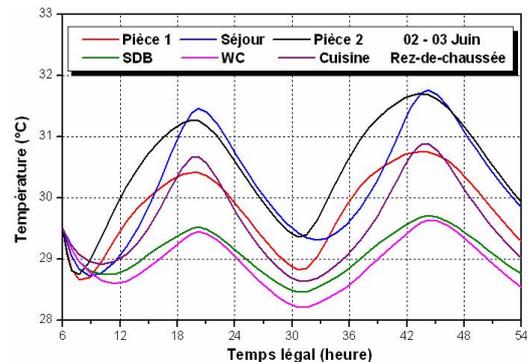


Fig. 3. Températures intérieures. Rez-de-chaussée. 02 - 03 Juin 2008.

Restant toujours dans ce contexte, il est tout à fait légitime de trouver que les températures du premier étage sont les plus

supérieures puisqu'en plus des murs Sud, Est et Ouest, le toit est aussi exposé au soleil.

De plus, l'opinion commune est que des murs épais et denses protègent naturellement des fluctuations importantes de température et n'ont donc pas besoin d'isolation. C'est pour cette raison qu'on va chercher est ce que l'épaisseur des murs suffit pour protéger la maison du froid et du chaud ? Donc, à travers les figures 4 et 5 qui représentent les variations de la température de la pièce 1 par exemple, on prouve qu'un mur épais n'isole pas dans ces conditions.

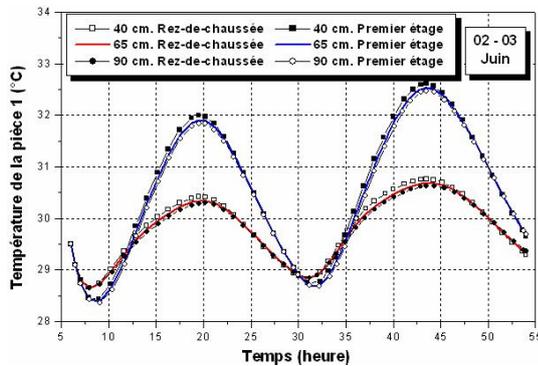


Fig. 4. Effet de l'épaisseur sur la température de la pièce 1, 02 - 03 Juin 2008.

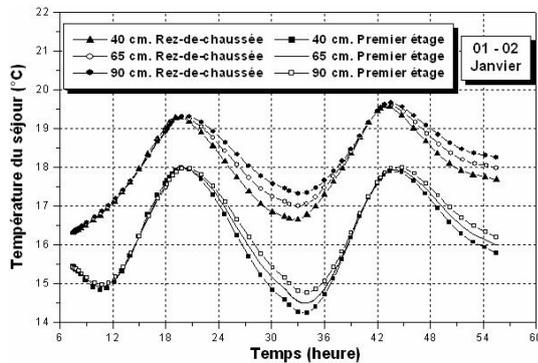


Fig. 5. Effet de l'épaisseur sur la température du séjour, 01 - 02 Janvier 2008.

Mais en principe, il devra ralentir par son inertie, l'entrée de la chaleur ou du froid qu'après un certain temps d'exposition, c'est-à-dire que si les murs n'ont pas accumulé et atteint le seuil de stockage. L'ambiance intérieure doit être restée fraîche en été grâce à leurs murs en pierre à forte inertie thermique. Ces murs épais possèdent un fort déphasage permettant de faire entrer la fraîcheur la nuit dans le mur puis de la restituer la journée. Pour cela, la pierre deviendra le matériau idéal: dense, apte à stocker et conductrice pour favoriser le stockage à condition qu'il existe des nuit fraîches.

Effectivement, c'est ça le problème dans ces régions : en été, les températures ambiantes extérieures restent presque tout le temps élevée même durant la nuit. L'inertie thermique consiste alors en une accumulation que de la chaleur dans l'enveloppe pour une restitution intérieure par radiation. La complexité de ce phénomène réside en ce que le flux de chaleur à travers l'enveloppe augmente successivement la température des matériaux ce qui permet d'augmenter en même temps la température de l'air de l'habitat.

En d'autres termes, le phénomène de déphasage sera absent. Si ce n'est pas le cas, en faisant varier l'épaisseur du mur, on fait

varier le déphasage. Plus un matériau est isolant plus il déphase. C'est logique la chaleur se déplace lentement dans celui-ci. Mais dans notre situation, la chaleur est stockée, le seuil de stockage est atteint, donc on n'attend pas le temps de déplacement de la chaleur.

On peut retenir d'après ces simulations que l'inertie thermique des murs dans ces situations joue un rôle contradictoire. L'optimisation de la forme et la structure fonctionnelle de la construction en vue de faire des économies d'énergie doivent aussi constituer un autre travail pertinent. Une bonne solution pour analyser l'effet de la géométrie de la construction sur la consommation d'énergie est d'utiliser un indicateur, appelé coefficient de forme (Cf) qui est défini comme le rapport entre le volume du bâtiment et la somme de toutes les surfaces qui sont en contact avec l'extérieur.

Ces régions sont aussi connues par leur climat aride caractérisé par des températures basses en hiver et gelées durant les mois de décembre à mi-février. Ce qui en résulte un autre effet contradictoire de l'inertie. Les températures des parois intérieures des murs exposés restent les plus froides par rapport aux celles des surfaces intérieures des murs non exposés malgré la présence de soleil. Et nous savons encore que la durée de la nuit pendant l'hiver peut dépasser parfois les 14 heures (exemple : la durée d'insolation à Ghardaïa le 21 décembre est de l'ordre de 09 h : 52 mn), elle est plus importante par rapport à la durée d'insolation. Ces conditions sont plus favorables pour absorber le froid la nuit et atteindre le seuil d'emmagasinement du froid. On ne peut pas donc bénéficier dans cette situation de l'inertie thermique que possède la pierre.

#### IV. INERTIE THERMIQUE DU BATIMENT ET CONFORT D'ETE

L'été, le bâtiment accumule la chaleur puis la restitue de manière diffuse à l'intérieur du bâtiment avec un décalage plus ou moins important dans le temps suivant son inertie thermique. Le déphasage représente le décalage de temps entre le pic de température extérieure et le pic de température à l'intérieur du bâtiment. Il est donc considéré comme un atout pour le confort d'été car il retarde le transfert de chaleur aux travers des parois du bâtiment dans la journée. La figure 6 représente le déphasage provoqué par l'inertie thermique du bâtiment considéré, elle montre l'évolution journalière de la température de séjour, comparée à la température extérieure.

L'utilisation de la pierre contribue à donner au bâtiment une inertie forte. Elle favorise une plus grande stabilité des températures. Donc, elle offre aux maîtres d'œuvre une réponse constructive pour réaliser des habitations bien conçues en matière de confort thermique d'été dans d'autres régions dont les nuits sont suffisamment fraîches.

Puisque l'inertie de la pierre a un effet contradictoire sur le confort dans notre cas, on peut dire que les faibles variations de température mesurée a pour conséquence de pénaliser le confort à l'intérieur du logement.

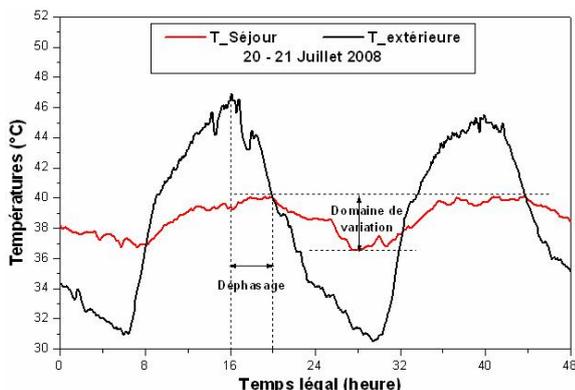


Fig. 6. Températures mesurées intérieure et extérieure, Ghardaia le 20 - 21 Juillet 2008.

## V. RESOLUTION NUMERIQUE DE L'EQUATION DE LA CHALEUR PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS, EXEMPLES D'APPLICATION.

On considère un mur en pierre homogène et isotrope. La diffusion de la chaleur est régie par l'équation aux dérivées partielles:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = g \\ 0 \leq x \leq e, t \geq 0, \rho > 0, C_p > 0, k > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$\rho$  est la masse volumique de la pierre

$$\rho = 1670 \text{ kg/m}^3$$

$k$  est la conductivité thermique de la pierre

$$k = 1.436 \text{ w/(m } ^\circ\text{C)}$$

$C_p$  est la chaleur spécifique de la pierre

$$C_p = 881 \text{ j/(kg } ^\circ\text{C)}$$

$t$  est le temps caractéristique

L'inertie thermique de la pierre se caractérise par deux valeurs:

- La diffusivité  $Df$  qui s'exprime en  $\text{m}^2/\text{s}$ , et exprime la profondeur à laquelle la chaleur a un effet après une période de temps donnée.

$$Df = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho C_p}} t \quad (2)$$

- L'effusivité  $E$  qui s'exprime en  $\text{J K}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{1/2}$ , détermine la capacité d'accumulation de chaleur. Elle se calcule selon la formule

$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (3)$$

L'inertie thermique d'une paroi est définie par sa constante de temps. La constante de temps d'une paroi est la durée qui lui est nécessaire pour passer d'un état stable à un autre sous l'effet d'un changement instantané de la température (régime transitoire). Ce temps de réaction est proportionnel au carré de l'épaisseur et inversement proportionnel à la diffusivité.

C'est la puissance à fournir pour maintenir un degré de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

$$\tau = \sqrt{\frac{e^2}{Df \pi^2}} \quad (4)$$

La fonction  $g$  de l'équation (1) représente la source de la chaleur, les variables indépendantes sont la position  $x$  et le temps  $t$ .

Nous avons pris comme conditions aux limites (conditions de type Dirichlet)  $T(0, t)$  et  $T(e, t)$  et comme condition, dite initiale  $T(x, 0)$ . On suppose que la température est uniforme sur les parois du mur.

$$g = \frac{P}{V} = \frac{G S}{V} = \frac{G}{e} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{G}{e \rho C_p} \quad (6)$$

$$G = R + \frac{0.53 \lambda_{\text{air}} (Gr Pr)^{1/4}}{L} (T_{\text{am}} - T) + \sigma \varepsilon_c (T_{\text{ciel}}^d - T^d) \quad (7)$$

$R$  est la densité du flux absorbé (éclairage) durant trois heures et vingt minutes. Donc,  $t$  vari de  $0 \text{ s}$  à  $12000 \text{ s}$ .

$\lambda_{\text{air}} = 0.026 \text{ w m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  est la conductivité thermique de l'air.

$L$ : l'hauteur de mur (m).

$\varepsilon_c = 0.93$  émissivité du ciel.

L'équation de la chaleur devient :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = & \frac{R}{e \rho C_p} + \frac{0.53 \lambda_{\text{air}} (Gr Pr)^{1/4}}{L e \rho C_p} (T_{\text{am}} - T) \\ & + \frac{\sigma \varepsilon_c}{e \rho C_p} (T_{\text{ciel}}^d - T^d) \end{aligned} \quad (8)$$

La figure 7 est une schématisation du mur considéré, or que les figures 8 et 9 donnent les relevés des températures calculées à l'intérieur du mur selon la profondeur  $x$ .

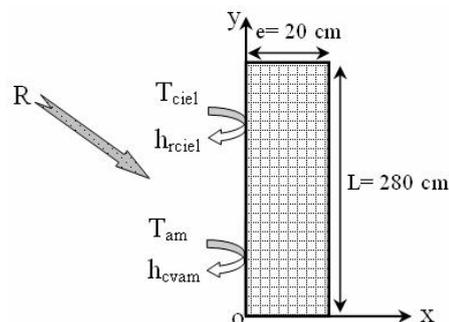


Fig. 7. Schéma descriptif du mur.

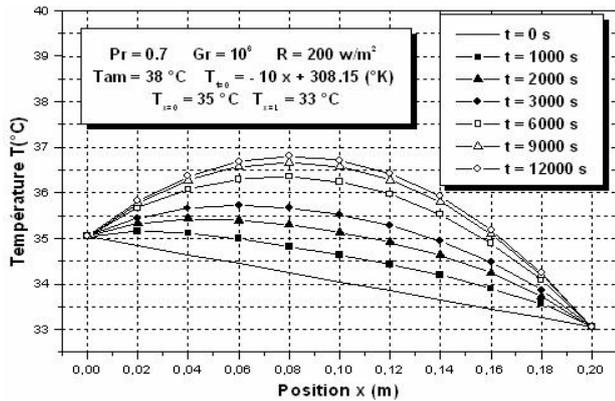


Fig. 8. Température du mur pour différentes profondeurs, conditions chaudes.

À travers des scénarios différents, nous pouvons constater que les températures à l'intérieur du mur sont plus grandes par rapport à celles des températures initiales (figure 8). C'est-à-dire que le profil des températures augmente en fonction du temps durant une période chaude.

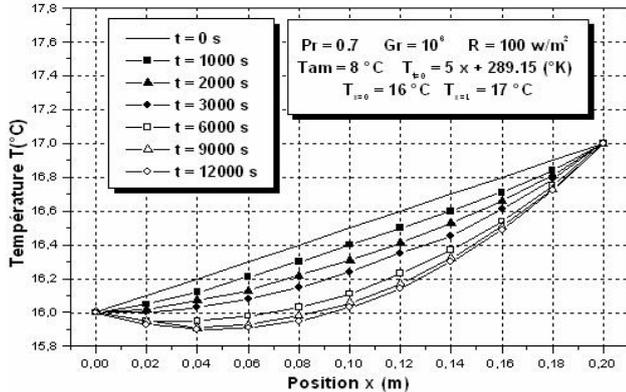


Fig. 9. Température du mur pour différentes profondeurs, conditions froides.

En effet, sur la figure 9, on montre que les relevés des températures intérieures sont plus petites par rapport à celles des températures initiales.

Ces accroissements ou décroissements sont incités entièrement par l'accumulation du flux thermique qui traverse le mur en pierre. C'est tout simplement l'effet de l'inertie ou de la masse thermique. En d'autres termes, l'effet de la capacité d'emmagasinement, de stockage ou de dégagement de chaleur ou de froid que possède la pierre.

## VI. CONCLUSION

Dans le domaine de l'énergétique des bâtiments, le modèle numérique prédictif est devenu en quelques années un outil très utilisé et pertinent.

Il s'avère qu'une bonne utilisation de l'inertie thermique de la pierre joue un rôle essentiel dans le confort thermique d'une habitation. Pour faire, en toute connaissance de cause, des choix constructifs qui améliorent les performances de leurs projets en la matière, les maîtres d'œuvre doivent connaître avec précision l'impact de l'inertie thermique sur le confort.

De même, les murs épais, ne peuvent pas apporter une isolation et un confort suffisants, ni réduire correctement les

consommations d'énergie, ils doivent donc être isolés. Il en ressort aussi les conclusions suivantes:

- L'épaisseur des murs assure une forte inertie thermique.
- On déduit qu'il existe une forte relation entre la forme du bâtiment et la demande en énergie du bâtiment, une économie d'énergie pourra être possible avec des réductions importantes par rapport au cas de référence.
- Généralement, plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte et les variations de température jour/nuit sont faibles. Ces deux résultats ne sont pas parfois favorables au confort thermique pour certaines constructions dans les régions arides et semi-arides. Ceci est justifié par le fait que le phénomène de stockage la fraîcheur nocturne qui est restituée dans la journée est absent.

Il faut respecter soigneusement les normes et les principes de la conception bioclimatique dans la construction des bâtiments au niveau du site.

## REFERENCES

- [1] S.M.A. Bekkouche, "Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires", Thèses de Doctorat en Sciences Physiques Soutenue à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Juin 2009.
- [2] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz T, A. Chekane, "A Modelling Approach of Thermal Insulation Applied to a Saharan Building ", Thermal Science, Vol 13 (2009), No. 4, pp. 233-244.
- [3] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz T, A. Chekane, "Simulation and Experimental Studies of an Internal Thermal Insulation of tow Pieces of Rooms Located in Ghardaïa (Algeria)", International Journal of Advanced Computer Engineering, June 2009, Vol 2 N° 1 p 1 – 9.
- [4] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, " Conception et Validation d'un Logiciel sous Excel pour la Modélisation d'une Station Radiométrique en Algérie Cas d'un Ciel Totalelement Clair ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 677 – 688.
- [5] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, " Conception et Validation d'un Programme Sous Excel Pour l'Estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie. Cas d'un Ciel Totalelement Clair ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 423 – 436.
- [6] J. M. Chasseriaux, "Convection Thermique et Rayonnement Solaire", Ed. Dunod, 1984.
- [7] J. A. Duffie, W. A. Beckman, "Solar Energy Thermal Processes", 2<sup>nd</sup> ed, Wiley Interscience, New York, USA, 1974
- [8] J. F. Sacadura, "Initiation aux Transferts Thermiques", Technical and Documentation, Chapter 4, Convection Heat Transfer, Paris, 1978.
- [9] M. Amir, M. Lacroix, Ns. Galanis, "Comportement Thermique de Dalles Chauffantes Electriques Pour le Stockage Quotidien", International Journal of Thermal Sciences 1999, Elsevier, Paris, Vol 38 p 121 – 131.
- [10] R. Belarbi, M. Spérandio, F. Allard, "Evaluation des Bâtiments Munis de Systèmes de Rafraîchissement Passif. Application au Cas de l'Evaporation Adiabatique". Revue Générale de Thermique 1997, Elsevier, Paris, Vol 36 p 547 – 561.
- [11] J.P. Eggimann, J.L. Badoux, D. Chuard, J.P. Eggimann, C. Scaler, "Architecture Climatique Equilibrée, Conception, Démarche et Dimensionnement", Programme d'Action PACER, Energies Renouvelables, Office Fédéral des Questions Conjoncturelles 1996.
- [12] D. Khaïne., J.Y. Desmons, A. Khaïne, R. Benyounes, M. Ray, "Simulation du Comportement Thermique d'un Local par la Méthode des Fonctions de Green", International Journal of Thermal Sciences 1999 Elsevier, Paris, Vol 38 p 340 – 347.
- [13] C. Lnard, P. Depecker, J.J. Roux, "Un Modèle Simplifié Pour la Prédiction du Champ de Température Dans les Bâtiments", Revue Générale de Thermique 1997, Elsevier, Paris. Vol 36 p 113-123.
- [14] H. Oiry, J. P. Bardon, " Comportement Thermique de Différents Types d'Habitation Soumis à un Ensoleillement et à une Température Extérieure Périodiques ", International Journal of Heat and Mass Transfer, 1985, Vol. 28 N° 11 p 1991 – 2004.