

## Echanges thermiques des parois d'un environnement habitable: étude et analyse

Abdellatif Oudrane<sup>1,2</sup>, Benaoumeur Aour<sup>2</sup>, Messaoud Hamouda<sup>3</sup>,  
Sofiane El Mokretar<sup>3</sup> et Mohamed Benhamou<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre Universitaire Ahmed Ben Yahia El Wancharissi de Tissemsilt  
Route de Bougra, Ben Hamouda, 38004 Tissemsilt, Algérie

<sup>2</sup> Laboratoire de Biomécanique Appliquée et Biomatériaux, LABAB  
B.P. 1523 El Mnaour, ENPO, 31000, Oran, Algérie

<sup>3</sup> Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URER'MS  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
B.P. 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie

(reçu le 14 Janvier 2018 - accepté le 30 Avril 2018)

**Résumé** - *Ce modeste travail porte sur l'étude des différents modes de transferts énergétiques entre l'environnement habitable et l'atmosphère. Il s'agit d'échanges d'énergie et de masse qui s'opèrent entre les deux systèmes et qui impliquent donc leur interdépendance. Le microclimat affecte les conditions thermiques intérieures de l'enveloppe habitable, et ainsi sur son comportement énergétique, de différentes façons. Tout d'abord, les rayonnements directs et diffus, reçoivent par les murs de l'enveloppe habitable, influençant le comportement thermique de l'environnement habitable. D'autre part, la température et la vitesse de l'air extérieur influent sur les échanges conductifs et convectifs entre l'habitat et son milieu. Pour cette raison, nous avons modélisé les transferts de chaleur qui se déroulent dans un modèle d'habitat assimilé à une cavité parallélépipédique. Les équations de transfert ont été déduites de bilans thermiques établis en chaque façade de l'enveloppe habitable. Les équations ont été résolues par la méthode implicite aux différences finies à l'aide de l'algorithme de Gauss couplé à une procédure itérative parce que les coefficients de transferts de chaleur par convection et par rayonnement sont fonction des températures des milieux considérés.*

**Abstract** - *This modest work focuses on the study of different modes of energy transfer between the living environment and the atmosphere. It is about the exchanges of energy and mass which take place between the two systems and which therefore imply their interdependence. The microclimate affects the inner thermal conditions of the habitable envelope, and thus its energy behaviour, in different ways. First, direct and diffuse radiation, receive through the walls of the habitable envelope, influencing the thermal behavior of the habitable environment. On the other hand, the temperature and the velocity of the outside air influence the conductive and convective exchanges between the habitat and its environment. For this reason, we modelled the heat transfers that take place in a habitat model assimilated to a parallelepiped cavity. The transfer equations were deduced from thermal balances established in each facade of the habitable envelope. The equations were solved by the implicit finite difference method using the Gauss algorithm coupled to an iterative procedure because the convective and radiation heat transfer coefficients are a function of the environmental temperatures considered.*

**Mots clés:** Transferts - Environnement - Gauss - Enveloppe habitable - Différences finies - bilans thermiques.

### 1. INTRODUCTION

La détermination des consommations énergétiques dans une enveloppe habitable peut se limiter à des bilans de masse et d'énergie, des connaissances sur le champ de température et l'allure des mouvements d'air sont nécessaires pour effectuer une étude plus poussée. En effet ces données permettent d'évaluer le confort des occupants (problèmes de renouvellement d'air, forts gradients de température, courants d'air, stratification) et de prévenir d'éventuelles dégradations (problèmes de condensation, nuisances liées aux polluants ...) [1].

La conception bioclimatique des enveloppes habitables s'intègre dans une démarche de maîtrise de l'énergie et constitue de ce fait un enjeu primordial. Elle nécessite la connaissance des performances énergétiques des composants d'enveloppe et des systèmes associés et doit permettre d'éviter le recours à des dispositifs de chauffage ou de refroidissement, forts consommateurs d'énergie.

Dans ce cadre, les technologies passives sont tout à fait indiquées, dans la mesure où elles permettent de réguler les conditions d'ambiance en utilisant des moyens naturels, sans apport énergétique supplémentaire.

Les parois complexes en sont un exemple, et se présentent sous la forme d'une juxtaposition de matériaux, séparés par une ou des lames d'air [2]. Les enveloppes habitables sont conçues pour jouer un rôle de filtre thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures.

La forme, l'orientation, l'agencement et la composition des éléments constitutifs déterminent les caractéristiques de ce filtre. Les ambiances intérieures ne répondant pas toujours aux exigences de confort des occupants, la réponse de l'enveloppe est corrigée par des appareils de climatisation ou du chauffage agissant comme des sources contrôlées de chaleur ou de froid.

Les normes de confort sont encore relativement frustrées: une consigne de température résultante moyenne à respecter pendant la période de chauffage, une température qu'il est recommandé de ne pas dépasser trop souvent pendant la saison chaude. Ces contraintes sont quelquefois affinées dans des cahiers des charges particuliers, notamment lorsqu'il s'agit d'un habitat à usage individuelle.

Dans tous les cas, les appareils de climatisation et de chauffage consomment de l'énergie et entraînent de ce fait des coûts de fonctionnement qui peuvent être très élevés [3].

Ils n'arrivent d'ailleurs pas toujours à redresser complètement une mauvaise conception architecturale, des périodes d'inconfort pouvant subsister, nous en avons fait l'expérience un jour ou l'autre. Les modèles décrivant le comportement thermique et dynamique des enveloppes habitables permettent de mieux comprendre et concevoir une enveloppe passive en vue d'obtenir de moindres consommations énergétiques et un plus grand confort, de prédire la réponse de l'habitat à des situations extrêmes afin de dimensionner les installations et, enfin, d'aider à mettre au point de nouveaux systèmes ou stratégies de contrôle [3].

L'objectif principal visé par ce travail est d'élaborer un modèle mathématique qui peut décrire les principaux mécanismes de transfert thermique d'un habitat localisé dans le Sud de l'Algérie (région d'Adrar). En plus, à partir des résultats de différentes études des ambiances intérieures et extérieures nous montrons une telle approche systémique permet l'investigation du confort thermique.

## 2. METHODOLOGIE ET MODELISATION NUMERIQUE

Nous avons relevé dans la littérature un nombre important d'approches différentes pour la modélisation thermique des bâtiments mono zones (monobloc). La modélisation des flux thermiques est un axe important, les voies à explorer dans ce domaine restent nombreuses, on pourra notamment citer les paramètres de matériaux, les conditions aux limites, le niveau d'abstraction des modèles, le compromis coût/précision ou encore la réduction de modèle.

Les éléments qui composent un habitat incluent de nombreux matériaux de construction aux comportements thermiques différents et pour certains non linéaires. Quelle que soit la forme canonique du modèle thermique, il est important de réduire le modèle en temps et en espace pour correspondre au plus juste au problème posé.

### 2.1 Description physique de l'enveloppe habitable

Dans la région d'Adrar, le béton armé est le matériau de construction le plus utilisé dernièrement en raison de éviter les inondations et à cause de sa rigidité et de sa durabilité. Le modèle physique retenu dans cette étude est un local résidentiel de type maison individuelle composée d'une seule chambre à 4 façades. La construction est implantée sur une surface de 20 m<sup>2</sup>.

Dans le **tableau 1**, on donne les paramètres thermiques et géométriques de l'enveloppe habitable, qui ont été retenus dans la simulation numérique.

**Tableau 1:** Paramètres thermiques et géométriques de l'enveloppe habitable

Murs	Matière de construction	Longueur "L" (m)	Hauteur "h" (m)	Epaisseur "e" (cm)	Conductivité thermique "λ" (W/m. k)	Masse volumique "ρ" (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique "Cp" (J/kg. k)	Emissivité "ε"	Coefficient d'absorption "α"
Mur Sud	Brique plein en béton	4	3	25	1.75	2200	1000	0.54	0.60
Mur Nord									
Mur Est									
Mur Ouest									
Toiture	Brique plein + Béton armé	5	-						
Plancher	Béton armé		-						

La figure 1 est une illustration de cet habitat, qui a été construite par les éléments suivants :

- Les parois extérieures de l'enveloppe sont constituées d'une structure légère généralement de 15 cm de bloc plein en béton lourd, en deux couches de 2.5 cm de ciment.
- Les parois de l'enveloppe dont les faces intérieures sont en contact avec l'air interne et les faces extérieurs sont en contact avec l'air externe.
- La dalle du plancher est imposée sur une terre pleine et plate. Elle est coulée directement sur une couche de 4cm d'isolant thermique, et il n'occasionne aucune déperdition thermique.
- Le toit est composé d'hourdis du ciment, d'une dalle de béton armé, du sable et du ciment mortier de telle façon que les fondations tiennent le coup et supportent la charge.

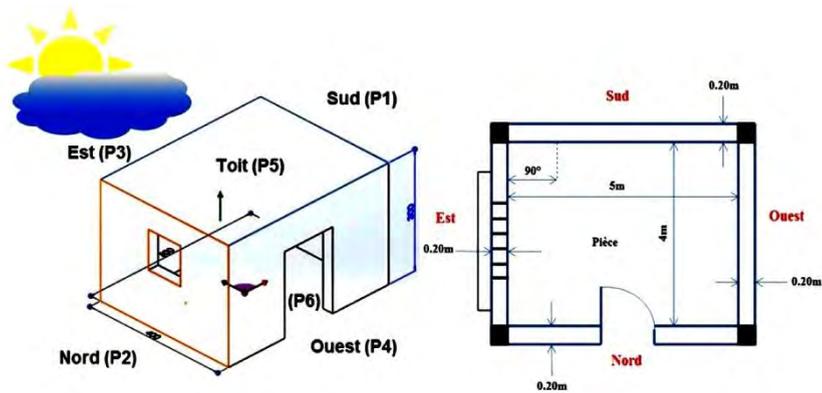


Fig. 1: Description physique de l'enveloppe habitable étudiée

### 2.2 Stratégie de la modélisation des échanges thermiques de l'enveloppe habitable

Dans le domaine de l'énergétique des bâtiments, le modèle numérique prédictif est devenu en quelques années un outil très utilisé. Ainsi, des modèles de simulation ont été

développés essentiellement pour répondre à des besoins de dimensionnement des locaux habitables. Ces modèles ne concernent que les échanges thermiques entre l'ambient et les façades externes, et l'ambient interne avec les façades internes des parois du bâtiment. De plus, on ne peut pas étudier la stratification de l'air d'une zone, l'influence du vent sur les infiltrations d'air, la diffusion d'eau dans les parois, etc. [4].

Les changements d'état ne sont pas non plus pris en compte, donc le stockage par chaleur latente n'est pas traité, ni l'effet des variations d'humidité. C'est donc exclusivement l'enveloppe qui est étudiée. La méthode suivie vise à assurer la maîtrise des hypothèses et équations de base et à développer les aspects de modélisation associés (rayonnement, convection et conduction).

On utilise la discrétisation par la méthode nodale monodimensionnelle pour les équations des bilans énergétiques qui régissent ces échanges thermiques dans l'habitat. Les systèmes d'équations algébriques ainsi obtenus ont été résolus par les algorithmes de Gauss. Le modèle mathématique proposé est basé sur certaines hypothèses qui peuvent se résumer comme suit :

- Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels et perpendiculaires à ces parois.
- La distribution de la température sur les surfaces extérieures et intérieures des murs est uniforme.
- La convection est naturelle (libre) et l'écoulement est laminaire.
- La porte et la fenêtre sont supposées parfaitement fermées.
- L'humidité est négligée (air sec), selon le site d'étude.
- La densité du flux solaire incidente sur les différentes façades du local sont calculées à l'aide du modèle semi-empirique.
- La température du plancher chauffant est variée selon une fonction sinusoïdale.
- Nous avons choisi le dix-septième jour du mois de juillet comme une journée type pour l'année 2014 (notion de la journée type).
- On suppose que la température ambiante extérieure est égale à la température du sol  $T_{amb} = T_{sol}$ .
- On suppose que la brique est pleine et en béton lourd.

### **3. MODELISATION DES ECHANGES THERMIQUES AU SIEN DE L'ENVELOPPE**

#### **3.1 Analyse nodale et échange par conduction et couplage avec les échanges superficiels**

Nous supposons que nous avons deux températures qui sont des conditions aux limites de surface. Le cadre de l'étude est ensuite divisé en un nombre déterminé d'éléments supposés à chaque instant à température uniforme. La transposition du problème thermique de conduction dans un problème électrique est appelée analogie thermoélectrique.

En effectuant cette analogie, la méthode nodale conduit à la mise en place d'un réseau électrique comme indiqué dans la figure 2. Les nœuds qui se trouvent dans les sens électriques équipotentiels symbolisent des lignes isothermes. Ces derniers sont reliés les uns aux autres par la résistance analogique de la couche physique de la paroi qui les sépare. Par conséquent, chacun de ces nœuds permet d'obtenir un condensateur électrique traduisant le stockage thermique de la partie de la paroi correspondante et permettant la traduction des effets d'inertie thermique [5].

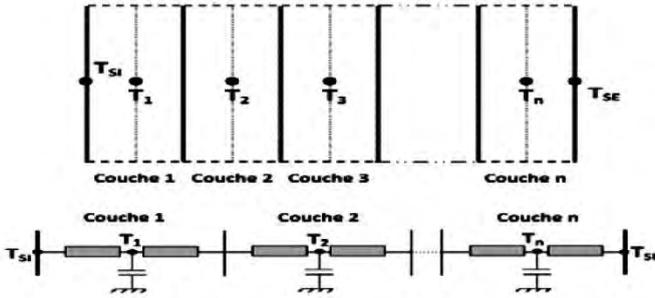


Fig. 2: Discretisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé [5]

Le bilan énergétique d'une zone de l'habitat représenté par un noeud est un modèle de bilan de l'air de la zone, ce qui représente la capacité thermique du volume d'air de la zone. Le bilan de puissance de la construction d'une zone est représenté par l'équation ci-dessous qui constitue la variation de l'énergie de l'air de la zone dans l'intervalle de temps "dt" [6]:

$$\rho_{\text{air}} \cdot C_p \cdot V_{\text{air}} \cdot \frac{dT_{\text{air}}}{dt} = Q_{\text{Gain}} + Q_{\text{Surf}} + Q_{\text{Chauf}} + Q_{\text{Froid}} + Q_{\text{Inf}} + Q_{\text{Vent}} \quad (1)$$

Les conditions aux limites du système comprennent les nœuds de la surface intérieure, y compris les flux d'énergie radiative. Nous notons également que l'énergie d'une couche active et l'énergie stockée dans les murs ne font pas partie de ce bilan énergétique, mais ils font partie du bilan détaillé de surfaces. Les taux de transfert d'énergie thermique de l'infiltration et de l'écoulement de l'air de ventilation sont respectivement calculés par les équations suivantes [6]:

$$\dot{Q}_{\text{inf}} = \dot{m}_{\text{inf}} \cdot C_{\text{pair}} \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{ext}}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{\text{Vent}} = \dot{m}_{\text{Vent}} \cdot C_{\text{pair}} \cdot (T_{\text{vent,extair}} - T_{\text{vent,inf}}) \quad (3)$$

L'énergie thermique due à l'échange entre l'air et les surfaces intérieures des murs est calculées par l'équation suivante [5, 6]:

$$Q_{\text{Surf}} = \sum S \cdot h_{\text{conv}} \cdot (T_{\text{Surf}} - T_{\text{air}}) \quad (4)$$

La convection naturelle se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide (l'air). De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Le transfert thermique dans une couche de fluide s'effectue par la conduction thermique et le mouvement du fluide. Quand on commence à imposer un gradient thermique entre les surfaces de la couche, un gradient de la masse volumique s'installe.

Expérimentalement, on observe qu'au bout d'un certain temps, le fluide se met en mouvement spontanément: c'est le démarrage de la convection. Celui-ci est déterminé par un nombre sans dimension appelé nombre de Rayleigh "Re" dimension [5].

En considérant chaque paroi comme une entité indépendante des autres, il est possible de décrire l'évolution au cours du temps des transferts thermiques dans chaque paroi. D'une façon générale, la variation instantanée de l'énergie au sein d'une paroi (i) de notre modèle est égale à la somme algébrique des densités de flux échangés au sien de cette paroi.

Le bilan énergétique des parois de l'enceinte habitable est déterminé par l'équation gouvernementale suivante [6, 7]:

**Tableau 2:** Expression des coefficients de transfert convectifs [5]

Description de la surface	Régime d'écoulement	Domaine de validité Ra = Gr.Pr	Expression
Mur vertical	Régime laminaire	$10^4 < Gr.Pr < 10^9$	$h_{con} = 1,42.(ΔT/L)^{0,4}$
	Régime turbulent	$Gr.Pr > 10^9$	$h_{con} = 1,31.(ΔT/L)^{0,3}$
Surface supérieure d'une plaque chaude horizontale ou surface inférieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr.Pr < 10^9$	$h_{con} = 1,32.(ΔT/L)^{0,4}$
	Régime turbulent	$Gr.Pr > 10^9$	$h_{con} = 1,52.(ΔT/L)^{0,3}$
Surface inférieure d'une plaque chaude ou supérieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^3 < Gr.Pr < 10^9$	
	Régime turbulent	$Gr.Pr > 10^9$	$h_{con} = 0,59.(ΔT/L)^{0,4}$

$$\frac{m_i \times C_{pi}}{S} \times \frac{\partial T_i}{\partial t} = DFSA_i + \sum_{i+1}^n \times \sum_x \Phi_{xij} \tag{5}$$

avec,

$$DFSA_i = \alpha_i \times \Phi_i \tag{6}$$

En introduisant un coefficient d'échange "h<sub>xij</sub>" et en linéarisant les transferts, nous pouvons écrire:

$$\Phi_{xij} = h_{xij} \times (T_j - T_i) \tag{7}$$

Ainsi, {Eq. (5)} s'écrit:

$$\frac{m_i \times C_{pi}}{S} \times \frac{\partial T_i}{\partial t} = DFSA_i + \sum_{i+1}^n \times \sum_x h_{xij} \times (T_j - T_i) \tag{8}$$

Donc, en peut écrire :

$$m \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} = \sum Q_{absor} - \sum Q_{émis} \tag{9}$$

La figure 3 montre les différents modes de transfert de chaleur au niveau de chaque paroi de l'enceinte habitable assimilée à une cavité parallélépipédique.

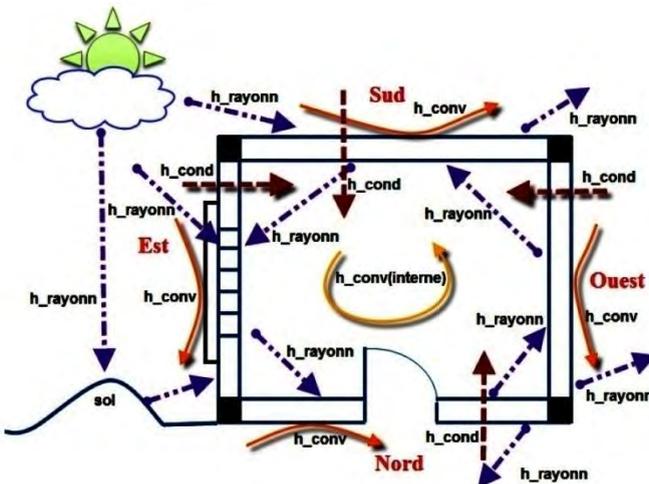


Fig. 3: Schéma descriptif des différents modes d'échanges thermiques dans l'enveloppe habitable [8]

Nous allons par la suite, appliquer {Eq. (9)} aux divers milieux de notre système. En effet, l'établissement d'un bilan thermique en chaque paroi associée au modèle de l'enveloppe habitable conduit aux équations de transfert suivantes selon le schéma partiel ci-après [9]:

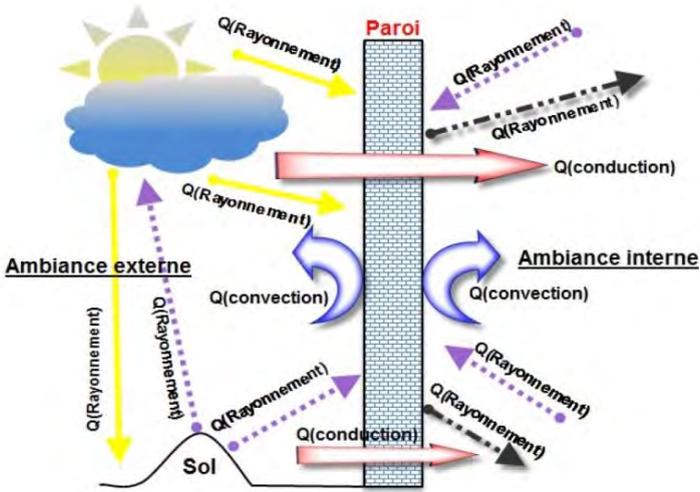


Fig. 4: Schématisation des différents types d'échanges thermiques d'une paroi de l'habitat [8]

**Paroi Sud - Face externe**

$$\frac{M_{PS} \cdot C_{Pb}}{S_{PS}} \frac{T_{PSE}^{t+\Delta t} - T_{PSE}^t}{\Delta t} = h_{Cext} \cdot (T_{Ai}^t - T_{PSE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} (T_{PSI}^{t+\Delta t} - T_{PSE}^{t+\Delta t}) + h_{VC-PSE} (T_{VC}^t - T_{PSE}^{t+\Delta t}) + h_{SOL-PSE} (T_{SOL}^t - T_{PSE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \cdot R_{GIS}) \tag{10}$$

**Paroi Nord - Face externe**

$$\frac{M_{PN} \cdot C_{Pb}}{S_{PN}} \frac{T_{PNE}^{t+\Delta t} - T_{PNE}^t}{\Delta t} = h_{Cext} \cdot (T_{Ai}^t - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} (T_{PNI}^{t+\Delta t} - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + h_{VC-PNE} (T_{VC}^t - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + h_{SOL-PNE} (T_{SOL}^t - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \cdot R_{GIN}) \tag{11}$$

**Paroi Ouest - Face externe**

$$\frac{M_{PO} \cdot C_{Pb}}{S_{PO}} \frac{T_{POE}^{t+\Delta t} - T_{POE}^t}{\Delta t} = h_{Cext} \cdot (T_{Ai}^t - T_{POE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} (T_{POI}^{t+\Delta t} - T_{POE}^{t+\Delta t}) + h_{VC-POE} (T_{VC}^t - T_{POE}^{t+\Delta t}) + h_{SOL-POE} (T_{SOL}^t - T_{POE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \cdot R_{GIO}) \tag{12}$$

**Paroi Toiture - Face externe**

$$\frac{M_{PFP} \cdot C_{Pb}}{S_{PFP}} \frac{T_{PFPE}^{t+\Delta t} - T_{PFPE}^t}{\Delta t} = h_{Cext} \cdot (T_{Ai}^t - T_{PFPE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} (T_{PFPI}^{t+\Delta t} - T_{PFPE}^{t+\Delta t}) + h_{VC-PFPE} (T_{VC}^t - T_{PFPE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \cdot FSSH) \tag{13}$$

**Paroi Est - Face externe**

$$\frac{M_{PE} \cdot C_{pb}}{S_{PE}} \frac{T_{PEE}^{t+\Delta t} - T_{PEE}^t}{\Delta t} = h_{Cext} \cdot (T_{AI}^t - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} (T_{PEI}^{t+\Delta t} - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + h_{VC-PEE} (T_{VC}^t - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \cdot R_{GIE}) \tag{14}$$

**4. EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE**

L'évaluation du confort thermique dans les espaces est un paramètre capital dans toute conception architecturale [10]. Les premières recherches se sont basées sur les enquêtes de terrain avec des questionnaires en classifiant la sensation thermique {très chaud, neutre et très froid}, ainsi que sur les essais de laboratoires sous des conditions climatiques artificielles [11]. Cette évaluation a conduit plusieurs chercheurs à développer et à élaborer des indices de prédiction des niveaux de confort à l'intérieur des bâtiments.

En plus des indices thermiques, des tentatives ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de prédire des zones de confort, connus sous le nom de diagrammes bioclimatiques. Ils sont l'aboutissement direct de la connaissance du climat, ces outils sont également développés pour permettre d'obtenir des bâtiments confortables, adaptés aux variables climatiques.

**4.1 Température opérative (TOP)**

La température opérative "TOP" est un indice de confort thermique intégrant deux paramètres physiques, la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante. Il s'agit donc d'un indice d'appréciation des effets convectifs et radiatifs sur le confort de l'individu [12].

La norme ISO 7730 fournit le calcul simple de cet indice par la formule la suivante [13]:

$$T_{OP} = \alpha T_a + (1 - \alpha) T_{mrt} \tag{15}$$

Le **Tableau 3** nous donne quelques valeurs de "α" en fonction de la vitesse de l'air.

**Tableau 3:** Valeurs de α en fonction de la vitesse d'air

Vitesse (m/s)	0 - 0.2	0.2 - 0.6	0.6 - 0.7
α : coefficient	0.5	0.6	0.7

Avec des vitesses de l'air inférieures à 0.2 m/s, la température opérative est égale avec une bonne approximation, à la moyenne arithmétique des températures citées [14], et pouvant être écrite de la façon suivante.

$$T_{OP} = (T_{air} + T_{mrt})/2 \tag{16}$$

Pour des activités sédentaires ou légères exercées par des personnes portant une tenue vestimentaire estivale normale, la température opérative limite de confort est de 27°C pour un environnement avec 55% d'humidité relative. Elle peut être augmentée jusqu'à 29 °C, si la vitesse de l'air est au-dessus de 0.2 m/s [15]. La température du confort thermique est donnée par l'expression suivante [16]:

$$T_c = \frac{T_{air} + \sum T_{i,j}}{2} \tag{17}$$

$$\sum T_{i,j} = T_{PSI} + T_{PEI} + T_{POI} + T_{PFPI} + T_{PNI} + T_{PPI} \tag{18}$$

## 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 5.1 Gisement solaire de la journée typique choisi dans la région d'Adrar

Dans le **tableau** ci-après, on donne les données astronomiques pour une journée typique, qui seront utilisées pour le calcul des différentes densités du flux solaire, influencent les échanges thermiques dans l'enveloppe habitable.

**Tableau 4:** Données astronomiques de la journée typique

Journée typique (17 Juillet 2014)	
Température d'ambiance maximale en (°C)	47.70
Température d'ambiance minimale en (°C)	32.50
Température d'ambiance moyenne en (°C)	40.70
Flux maximal en (W/m <sup>2</sup> )	1051.00
Flux moyen en (W/m <sup>2</sup> )	323.00
Vitesse moyenne du vent en (m/s)	5.80
Durée du jour en (h)	14.00
Heure du lever du soleil en (h)	5.00
Heure du coucher du soleil en (h)	19.00
Déclinaison du soleil en (°)	-13°12'
Correction d'équation du temps en (minute)	17'.97''

### 5.2 Analyse de la densité du flux solaire pour une façade horizontale (toiture de l'habitat)

La figure 5 présente l'évolution de la densité du flux solaire global (FSGH) incident sur le plan horizontal dans la journée type du mois de juillet 2014. On constate que cette densité du flux atteint son maximum dans la période diurne de 1051 W/m<sup>2</sup> à midi solaire (13 TLG) et nul dans la période nocturne.

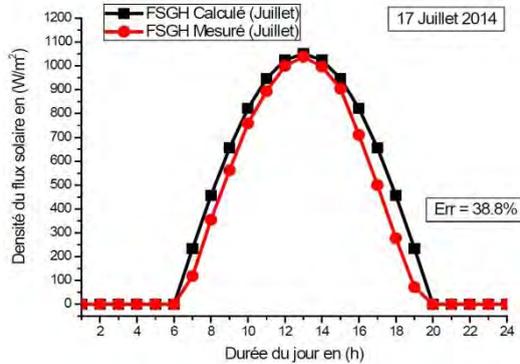


Fig. 5: Evolution de la densité du flux solaire global horizontal au cours de la journée solaire typique

### 5.3 Analyse de la température de l'environnement externe de l'habitat

Les figures 6 et 7 présentent une comparaison entre la température calculée par le modèle numérique développé et la température mesurée par la station radiométrique de l'Unité de Recherche des Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar pour la journée type (figure 6) et pour les quatre (04) journées choisies au milieu de chaque saison (figure 7).

Notant que les illustrations de la figure 6, ont été ajoutées pour élargir l'éventail de comparaison sur d'autres journées des quatre (04) saisons de l'année 2014. On peut constater que les résultats obtenus par le modèle développé sont en accord pour la période comprise entre 6h et 15h. Alors qu'avant 6h ou après 15h une différence remarquable a été constatée. Celle-ci peut être attribuée aux hypothèses simplificatrices et à la négligence d'autres paramètres qui ne sont pas pris en considération par les modèles empiriques actuels.

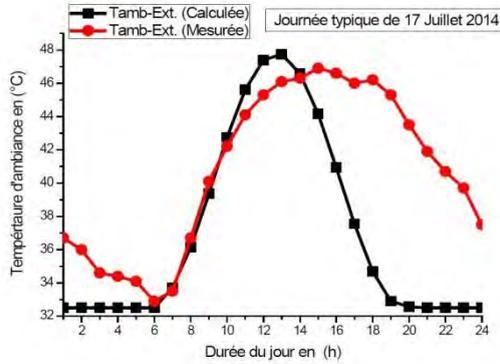
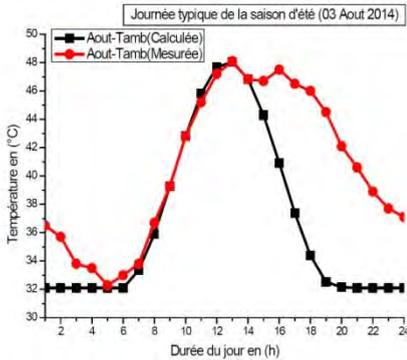
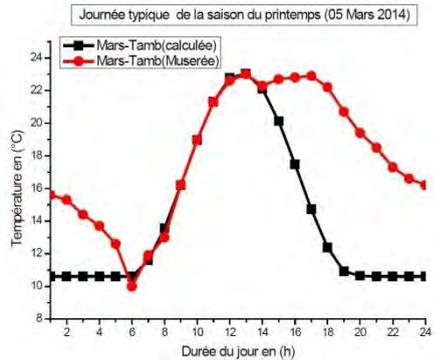


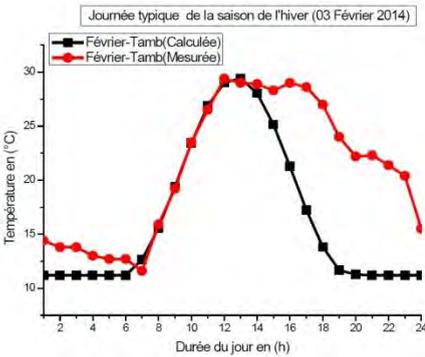
Fig. 6: Evolution de la température ambiante externe pour une journée solaire typique



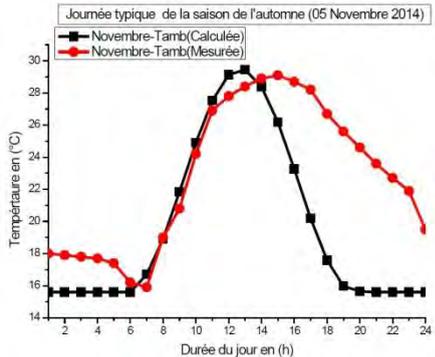
(a) 03 Août 2014



(b) 05 Mars 2014



(c) 03 Février 2014



(d) 05 Novembre 2014

Fig. 7: Evolution de la température ambiante externe au cours des quatre jours types choisis au milieu de chaque saison de l'année considérée.

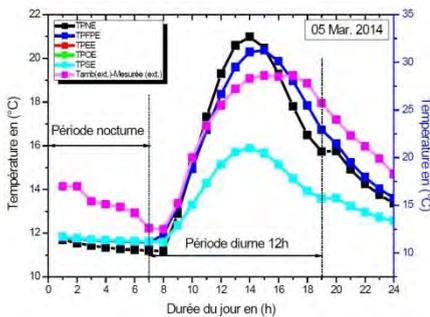
## 5.4 Analyse comparative entre la température externe de différentes façades de l'habitat avec celle de la station radiométrique

Les figures 8 présentent une comparaison entre les températures calculées des façades externes de l'habitat par le modèle numérique développé et la température mesurée par la station radiométrique de l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharien d'Adrar pour les quatre journées choisies au milieu de chaque saison.

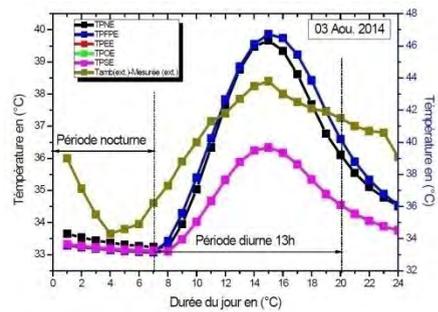
D'après cette figure, on constate que, dans les trois journées typiques des saisons choisies (figure 8 **a**, **b**, **d**) la température qui décrit les échanges thermiques entre la façade externe de la toiture de l'enveloppe habitable (TPFPE) et la température de la face Nord externe (TPNE) est plus grandes par rapport aux autres températures et plus grande que celle de la température de l'air externe mesurée.

Par ailleurs, l'évolution de la température mesurée pour la journée typique 03 février dans la saison d'hiver (figure 8 **c**) est plus grande par rapport aux autres températures des façades externes de l'habitat avec un pic de 17.5 °C à 15h00 du soir. En effet, les températures des façades externes pour les saisons de printemps et de l'été atteignent leurs maximums dans la période diurne comprise entre 11h00 et 15h00, sauf les saisons d'hiver et l'automne, le maximum est compris dans la période diurne midi-solaire et 15h00.

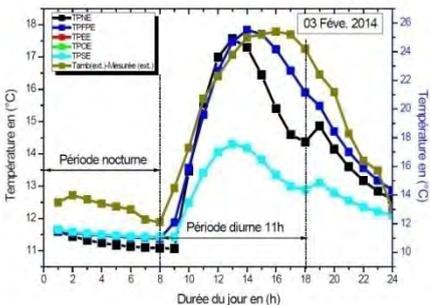
Ce déphasage dans le temps de l'évolution des températures des façades externes entre saison et une autre est parfaitement lié avec la durée astronomique du jour typique, ce qui est fait la différence entre journée par rapport à l'autre et saison à l'autre. En plus, on peut signaler que la durée astronomique de la journée à une influence importante sur l'évolution de toutes les températures des parois de l'enveloppe habitable décrivant les échanges thermiques externes et internes.



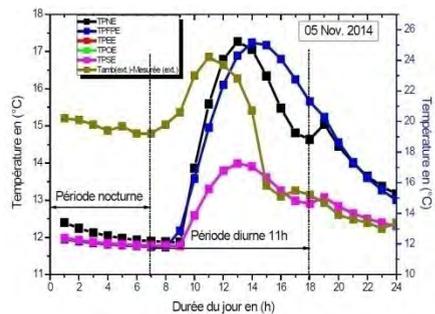
(a) 05 Mars - Saison de printemps



(b) 03 Août - Saison d'été



(c) 03 Février - Saison d'hiver



(d) 05 Novembre - Saison d'automne

Fig. 8: Evolution horaire de la température mesurée de l'air externe par rapport la température de différentes façades externes de l'habitat

## 5.5 Evolution de différentes températures de l'environnement interne de l'habitat

La figure 9 présente la variation horaire de la température des différentes faces internes de l'enveloppe habitable durant la journée type. On peut constater que l'inertie thermique du béton joue un rôle très important dans le transfert thermique au niveau des parois.

En effet, la température du fond plafond (TPTI) est plus grande par rapport aux températures des autres faces internes Sud (TPSI), Ouest (TPOI), Nord (TPNI) et Est (TPEI). Ceci est dû à deux facteurs essentiels qui sont réunis pour engendrer cette augmentation de la température: en premier lieu, l'épaisseur des parois de l'habitat qui implique l'élévation de l'inertie thermique et en deuxième lieu, l'angle d'incidence des rayons solaires de cette façade de la toiture qui est égale à  $0^\circ$ .

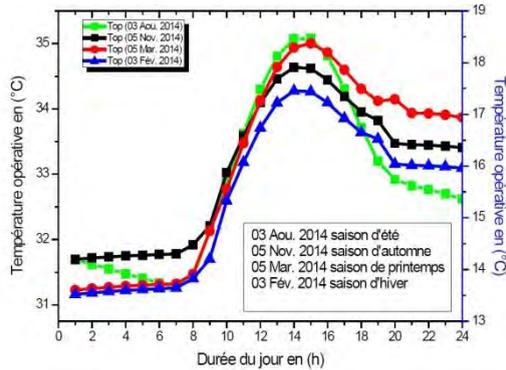


Fig. 9: Evolution de la température de l'air interne de l'enveloppe habitable en fonction du temps local (TLG)

## 5.6 Investigation du confort thermique dans l'environnement habitable

### 5.6.1 Analyse de la température opérative d'habitat pour les quatre saisons de l'année

Dans la figure 10, on présente l'évolution horaire de la température opérative de l'environnement chauffé pour différentes journées typiques en fonction du temps local (TLG) dans les saisons choisies pour l'année 2014 {l'été, l'automne, le printemps et l'hiver}.

On peut dire que cette évolution pour les trois journées typiques {03/08/2014, 05/11/2014, 05/03/2014 et 03/02/2014} est notablement progressive à 8h00 du matin avec des valeurs faibles compris entre  $31^\circ\text{C}$  et  $32^\circ\text{C}$  jusqu'à des valeurs maximales entre  $34^\circ\text{C}$  et  $35^\circ\text{C}$  vers 13h00, puis elle commence à décroître jusqu'à des valeurs minimales comprise entre  $33^\circ\text{C}$  et  $34^\circ\text{C}$  à 20h00.

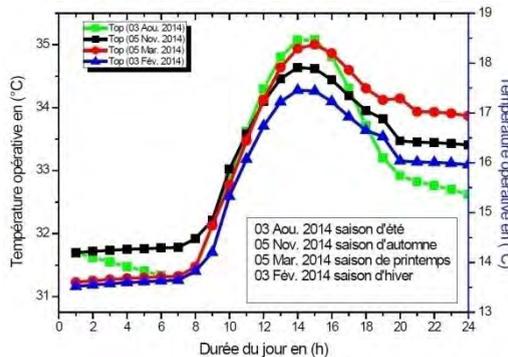


Fig. 10: Evolution de la température opérative de l'habitat pour différentes saisons dans l'année 2014 en fonction du temps local

On note aussi qu'il y avait un écart de température entre les trois évolutions pour les trois journées typiques après 20h00 du soir. Cet écart dans l'évolution de la température opérative de l'espace chauffé est dû au fait des conditions climatologiques pour chaque mois choisi dans l'année considérée.

### 5.6.2 Evaluation horaire de la température du confort thermique de l'enveloppe habitable

La figure 11 présente l'évolution horaire de la température du confort thermique pour différents matériaux de construction en fonction du temps local. D'après cette évolution, on constate que le choix de matériau de la construction a une influence cruciale sur l'évolution horaire de la température du confort thermique.

En effet, quand on utilise par exemple les catégories du béton sélectionnées dans cette étude comme matériau dans la construction des murs de l'enveloppe habitable avec ces conditions climatologiques secs, et son maîtrise d'isolation thermique des parois, la température du confort va être dépassée les normes conventionnelles.

C'est-à-dire une surchauffe un désirable dans l'environnement habitable avec une température de 39°C à 15h00 l'après-midi, ce qui est bien illustré dans cette figure pour les trois catégories du béton (lourd, léger et Pierre).

Par contre, l'exploitation de d'autres matériaux de construction comme les catégories du bois (lourd et léger) dans cette région avec les mêmes conditions climatiques, vont nous permettre de se rapprocher vers des valeurs conventionnelles de la température du confort au sein de l'environnement habitable car, l'utilisation du bois dans la construction pour un climat sec et son isolation thermique de la dalle chauffante ou pour la dalle de la toiture, va nous conduire à la température de 37°C à 15h00.

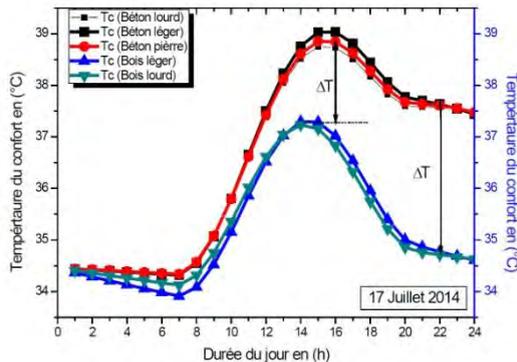


Fig. 11: Evolution de la température du confort thermique et de l'espace chauffé au sein de l'enveloppe habitable pour différentes catégories de matériaux de construction dans une journée typique de l'année 2014

## 6. CONCLUSION

Par les travaux entrepris dans cette étude, nous sommes intéressés dans cette partie aux échanges qui ont lieu au niveau des parois des bâtiments, sans considérer en détail les autres échanges relatifs par exemple aux rejets des systèmes de ventilation ou de climatisation dans la canopée urbaine.

Nous avons donc pu voir qu'une paroi d'une enveloppe habitable est un lieu d'échanges entre l'atmosphère et l'habitat. Des transferts de masse, notamment les échanges de chaleur s'y mettent en place. Ces derniers se divisent en trois catégories: les transferts convectifs qui ont lieu à la surface de la paroi, les transferts conductifs qui

la traversent et les échanges radiatifs avec l'énergie solaire et les flux infrarouges issus de l'environnement de la paroi

Cette étude met en évidence l'influence des conditions de l'air extérieur, qui ont un rôle important pour les flux conductifs et convectifs. Les enveloppes habitables sont également soumises au rayonnement radiatif provenant de l'atmosphère et de leur environnement.

L'utilisation conjointe d'un modèle d'habitat, qui résoudra les équations de transferts thermiques, et d'un code de Fortran capable de procurer des informations plus fines concernant les données extérieures serait donc pertinente aussi bien pour une étude atmosphérique que pour l'étude énergétique d'un habitat.

## NOMENCLATURE

$\alpha_i$ . Coefficient d'absorption de la matière	$h_{c1}$ . Coefficient d'échange convectif entre la paroi 1 et l'air ambiant interne. $W/m^2K$
$\alpha_b$ . Coefficient d'absorption du béton	$h_{c2}$ . Coefficient d'échange convectif entre la paroi 2 et l'air ambiant interne. $W/m^2K$
$\lambda_b$ . Conductivité thermique. $W/mK$	$m_{PS}$ . Masse de la paroi Sud. kg
$\mu_{air}$ . Viscosité dynamique de l'air. $kg/m.s$	$m$ . Masse de la matière. kg
$\eta_{50}$ . Taux horaire de renouvellement d'air	$m_{air}$ . Masse de l'air. kg
$\zeta$ . Coefficient d'exposition au vent du local	$m_{PN}$ . Masse de la paroi Nord. kg
$\rho_i$ . Masse volumique (i). $kg/m^3$	$m_{PS}$ . Masse de la paroi Sud. kg
$Cp_{PS}$ . Chaleur spécifique paroi Sud. $J/kg.K$	$Q_{absorb}$ . Quantités de chaleur absorbées. $W$
$Cp_{air}$ . Chaleur spécifique de l'air. $J/kg.K$	$Q_{fluxsolaire}$ . Densité du flux solaire. $W/m^2$
$Cp_i$ . Chaleur spécifique (i). $J/kg.K$	$e_{PS}$ . Epaisseur de la paroi du béton. m
$Q_{convam}$ . Quantité de chaleur échangée par convection avec l'ambiance. $W$	$R_{GPS}$ . Densité de flux solaire globale incident sur paroi Sud. $W/m^2$
$R_{GPS}$ . Densité de flux solaire globale incident sur paroi Sud. $W/m^2$	$R_{GPO}$ . Densité de flux solaire globale incident sur paroi Ouest. $W/m^2$
$e_i$ . Epaisseur de la matière. m	$g$ . Constante de gravitation. $m/s^2$
$S_{pfp}$ . Surface de la paroi fond plancher. $m^2$	$S_{pfp}$ . Surface du plancher chauffant. $m^2$
$h_{rciel}$ . Coefficient d'échange par rayonnement du ciel. $W/m^2K$	$h_{ac-ext}$ . Coefficient d'échange convectif avec air externe de l'habitat. $W/m^2K$
$h_{conv}$ . Coefficient d'échange convectif. $W/m^2K$	$h_{r-vc,PSExt}$ . Coefficient d'échange par rayonn. entre voûte céleste et paroi Sud ext.
$T_{sol}$ . température du sol. $^{\circ}C$	$T_{amb}$ . Température ambiante. $^{\circ}C$
$T_i$ . Température d'une surface (i). $^{\circ}C$	PS . Paroi Sud
$h_{r-sol,PSExt}$ . Coefficient d'échange par rayonn. entre Sol et paroi Sud ext. $W/m^2K$	$h_{r-PNI,PSExt}$ . Coefficient Echange par rayon. entre paroi Nord int et paroi Sud int. $W/m^2K$
$h_{r-sol,POExt}$ . Coefficient Echange par rayon. entre Sol et paroi Ouest ext. $W/m^2K$	$h_{r-PNI,POInt}$ . Coefficient Echange par rayon. entre paroi Nord int et paroi Que. int. $W/m^2K$
$h_{r-vc,PSExt}$ . Coefficient échange par rayon. entre voûte céleste et paroi Ouest ext. $W/m^2K$	$T_{AI}$ . Température de l'air extérieur de l'habitat. $^{\circ}C$
$t$ . Temps. s	$\Delta t$ . Ecart de temps
$T_{PNI}$ . Température de la paroi Nord Int. $^{\circ}C$	$T_{AI}$ . Température Interne de l'habitat. $^{\circ}C$
$T_{vc}$ . Température de la voûte céleste. $^{\circ}C$	$T_{PSExt}$ . Température de paroi Sud Ext. $^{\circ}C$
$T_B$ . Température de la dalle chauffante. $^{\circ}C$	$T_{POExt}$ . Température de paroi Ouest Ext. $^{\circ}C$
$V_{vent}$ . Vitesse moyenne du vent. $m/s$	PNE. Paroi Nord externe
PNI. Paroi Nord interne	PSE. Paroi Sud externe

## REFERENCES

- [1] E. Wurtz, 'Modélisation Tridimensionnelle des Transferts Thermiques et Aérauliques dans le Bâtiment en Environnement Orienté Objet', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [2] F. Miranville, 'Contribution à l'Etude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment: Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes

de Toitures incluant des Produits Minces Réfléchissants en climat tropical humide', Thèse de doctorat de l'université de la Réunion, 2002.

- [3] G. Lefebvre, '*Comportement Thermique Dynamique des Bâtiments: Simulation et Analyse*', Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Energétique, B2, 041-1.
- [4] A. Oudrane, B. Aour, B. Zeghmami, X. Chesneau et M. Hamouda, '*Analyse Numérique de Transfert Thermique Unidimensionnel d'une Enceinte Habitable Désertique*', Recueil de Mécanique, Vol. 2, N°2, pp. 089 – 102, 2 017.
- [5] M. Yaïche et S. Bekkouche, '*Estimation du Rayonnement Solaire Global en Algérie pour Différents Types de Ciel*', Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4, pp.683 – 695.2010.
- [6] J.P. Nadeau et J.R. Puiggali, '*Séchage: Des Processus Physiques aux Procédés Industriels*', Tec & Doc Lavoisier, (ISBN 2-7430-0018-X), 1995.
- [7] K. Mansatiansin, '*Modélisation et Simulation des Transferts et de l'éclairage dans un Habitat Bioclimatique*', Thèse de Doctorat, Sciences de l'Ingénieur, Spécialité Mécanique Energétique, Université de Perpignan, 2005.
- [8] A. Oudrane and B. Aour, '*Numerical Simulation of Heat Exchanges for a Desert House Type Adrar*', Advanced Engineering Forum, Vol. 24, pp. 63-75, 2017.
- [9] M. Daguinet, '*Les Séchoirs Solaires, Théorie et Pratiques*', Editions, Unesco, 1985.
- [10] B. Givoni, '*L'Homme, L'Architecture et le Climat*', Edition, Le Moniteur, Paris, 1978.
- [11] N. Tixier, '*De la Notion de Confort à la Notion d'Ambiance*', In Revue du Laboratoire Cresson de l'Ecole d'Architecture de Grenoble et CNRS Ambiances Architecturales et Urbaines, France. 2007.
- [12] N. Cordier, '*Développement et Evaluation de Stratégies de Contrôle de Ventilation Appliquées aux Locaux de Grandes Dimensions*', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2007.
- [13] F. Richieri, '*Développement et Paramétrage de Contrôleurs d'Ambiance Multicritères*', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [14] M. Bruant, '*Développement et paramétrages de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance*', in Conception en Bâtiment et Techniques Urbaines, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France, 1997.
- [15] H. Boivin, '*La Ventilation Naturelle, Développement d'un Outil d'Evaluation du Potentiel de la Climatisation Passive et d'Aide à la Conception Architecturale*', Mémoire de Maîtrise, université Laval, Québec, 2007.
- [16] F. Sam, '*Réhabilitation Thermique d'un Local dans une Zone Aride -Cas de Ghardaïa*', Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2012.
- [17] Technical Report, '*Ener MENA High Precision Meteorological Station of Research Unit for Renewable Energies in the Saharan Environment*' in Adrar, Algeria, 2014.