



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2016



Comportement thermique d'une maison inerte dans une période d'intersaison propice à l'intégration des MCPs

R. Djéffal¹, S.M.A. Bekkouche¹, M. Samai², M.K. Cherier¹, Z. Younsi

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie

² Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre de Sétif, Algérie.

djeffall_rby@hotmail.fr

Résumé — L'incorporation d'un matériau à changement de phase (MCP) dans les tissus de construction a été considérée comme un moyen efficace pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone liées aux bâtiments. On verra dans ce travail l'influence des MCPs sur les températures intérieures d'une maison Saharienne à forte inertie thermique. Les conditions climatiques intégrées dans les bilans sensible et latent sont relatives à des données réelles et correspondent à une période d'intersaison. Les résultats obtenus prouvent que le renforcement de l'inertie du bâtiment à l'aide de MCP peut écrier plus les pics de température interne

Mots clés — MCP – Bilan énergétique – Température – inertie.

I. INTRODUCTION

Dans les futurs bâtiments (neufs), il est souhaitable de diminuer l'épaisseur des parois, tout en respectant les normes pour limiter les pertes thermiques pour l'amélioration de la performance énergétique. Cependant, de telles structures ne permettent pas d'avoir une inertie thermique suffisante capable d'amortir les fluctuations de la température extérieure. Une des façons de diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment est donc la conception d'une enveloppe économe en énergie et limiter les émissions des gaz à effet de serre. Il est nécessaire de gérer la production et l'utilisation de l'énergie consacrée au chauffage et à la climatisation des bâtiments.

Les caractéristiques des bâtiments conçus pour faire usage du stockage thermique doivent inclure différents moyens ou dispositifs techniques permettant d'accroître la masse thermique. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour le stockage seul ou peuvent servir également d'éléments de structure. La capacité thermique d'un bâtiment devrait être suffisante pour stabiliser de grandes variations quotidiennes de température et pour augmenter le déphasage entre les pics des températures intérieure et extérieure [1].

Cependant, les bâtiments actuels utilisent de plus en plus des structures légères et il serait intéressant que ces structures puissent servir aussi d'éléments de stockage. Ceci peut être réalisé en y incorporant des MCPs en profitant de leur chaleur latente de changement d'état qui permet de stocker/déstocker une grande quantité d'énergie. Intégré dans les parois de bâtiment, la présence de matériau à changement de phase (MCP) joue le rôle de régulateur de température grâce à sa capacité à stocker et restituer la chaleur de manière déphasée : durant la saison estivale ses caractéristiques permettent de ralentir la montée en température intérieure d'un local par le stockage de la chaleur au fur et à mesure de la journée

permettant d'éviter les pics de chaleur. Le confort thermique est ainsi amélioré [2-4].

L'utilisation des MCP pour la climatisation et le chauffage des bâtiments a donné lieu à de nombreux travaux de recherche durant les dernières décennies et on peut trouver les principaux résultats dans plusieurs articles de revue. Par exemple, des études ont rapporté que les MCPs peuvent potentiellement réduire la température maximale quotidienne jusqu'à 2°C et éliminer environ 47% du pic consommation d'énergie et 12% de la consommation d'énergie en hiver pour la zone climatique de Pékin (la Chine). Dans une autre étude, des réductions de 15-17% de la charge de refroidissement a été observée pour des MCPs intégrés à des murs de briques en Espagne. En France, les MCPs wallboards intégrés réduisent les températures intérieures maximales jusqu'à 3,9 °C et 2,3 °C en été et en intersaison, respectivement, et ont augmenté la température minimale d'environ 0,4°C -0,8°C [5].

Tout d'abord, on s'intéresse à modéliser le comportement thermo-aéraulique d'une habitation multizones à Ghardaïa par un modèle mathématique. On intègre ensuite un modèle de paroi contenant un MCP dans notre programme de calcul. La température de fusion du matériau est de 22.6 °C. On verra l'influence des MCPs sur les températures intérieures d'une zone d'une maison Saharienne à forte inertie thermique et les possibilités d'optimisation qui en découlent. Les conditions climatiques intégrées dans les bilans sensible et latent sont relatives à des données réelles et correspondent à une période d'intersaison.

II. MODELISATION MATHÉMATIQUE MULTIZONE

La modélisation d'un bâtiment dans sa globalité est en général constituée d'un réseau complexe de résistances et de capacités thermiques entre les différentes zones internes du bâtiment et entre ces zones et l'environnement du bâtiment. La connaissance des fondamentaux en thermique de l'habitat permettra de bien analyser ces flux d'énergie. En assumant qu'une zone i est en contact avec $N+1$ zones et en supposant que l'ambient extérieur est représenté par le noeud $N=0$, nous avons prouvé que le bilan enthalpique sensible peut se transformer en un bilan de température. En thermique de l'habitat, la variation temporelle de la masse d'air est une quantité très faible, c'est pourquoi que le bilan enthalpique sensible est donné par la relation suivante :



$$\rho_{as} C_{as} V(i) \frac{dT_{al}(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) C_{as} (T_{al}(n) - T_{al}(i))] + \sum_{j=1}^{NV(i)} [S_j h_{cij} (T_{sij}(i) - T_{al}(i))] + P_s + CI_s \quad (1)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (6)$$

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{Pi} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad (7)$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{Pj} e_j S_j \delta_j \quad (8)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{Pi} e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{Pj} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (9)$$

$$\beta_i = \frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (10)$$

$$\delta_j = \frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (11)$$

Nous obtenons un système de N équations avec N inconnus qui sont la température d'air de chaque zone. Les températures de surface T_{sij} peuvent être obtenues en établissant le bilan thermique des murs. De la même manière, en négligeant le terme dm_{as}/dt , et en utilisant l'équation simplifiée de la conservation de la masse d'air sec, nous obtenons l'équation 2:

$$m_{as}(i) \frac{dH_s(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) (H_s(n) - H_s(i))] + \frac{P_L}{L_v} + \frac{CI_L}{L_v} \quad (2)$$

Pour calculer l'humidité relative de l'air de chaque zone, on utilise la formule empirique de Nadeau and Puiggali, 1995 [6]. L'humidité spécifique peut être donnée en fonction de l'humidité relative par les relations suivantes:

$$H_s = \frac{0.622 P_{sat}(T) Hr}{101325 - P_{sat}(T) Hr} \quad P_{sat}(T) = e^{23.3265 - \frac{3802.7}{T} - \left[\frac{472.68}{T}\right]^2} \quad (3)$$

Pour calculer les températures de surface T_{sij} , nous utilisons un modèle proposé par Rumianowski et al [7] en 1989 et repris par Con et al en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud à l'intérieur d'un mur. La figure suivante est une illustration du principe de décomposition.

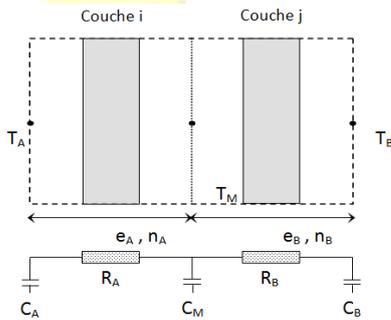


Fig. 1. Modèle de conduction.

Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes:

$$n = n_A + n_B \quad (4)$$

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (5)$$

Le bilan énergétique du bâtiment pour les surfaces est représenté par les équations suivantes:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{Surf-i} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{conv} (T_{air} - T_A) \quad (12)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{ground\ out\ side}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{sky}^4 - T_B^4) + S h_{conv\ amb} (T_{amb} - T_B) \quad (13)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = - \frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (14)$$

Le bilan énergétique d'une zone de l'habitat représenté par un nœud 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:

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = - \frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (15)$$

Le modèle proposé repose sur les hypothèses suivantes:

- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour les radiations de grandes longueurs d'ondes.
- Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels, perpendiculairement à ces parois
- La convection est naturelle.
- La distribution de la température sur les parois est uniforme (principe de la méthode nodale).



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies
Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2016



- Les caractéristiques des matériaux sont constantes et indépendantes des conditions météorologiques.

TABLE I.
COEFFICIENTS DE TRANSFERT CONVECTIFS

Description de la surface	Régime d'écoulement	Domaine de validité $R_n = Gr Pr$	Expression
Mur vertical	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1,42 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1,31 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface supérieure d'une plaque chaude horizontale ou surface inférieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1,32 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1,52 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface inférieure d'une plaque chaude ou surface supérieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 0,59 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	

III. DESCRIPTION THERMO-AERAIQUE DE LA CONSTRUCTION

Le modèle de notre étude est un espace bureau avec une toiture terrasse exposée, d'une superficie de 16 m² environ. Le système constructif est un système poteaux poutres, avec des planchers à corps creux. Les caractéristiques utilisées sont indiquées dans le tableau 1. Un certain nombre d'information sont connectés à un nœud type, traduisant par exemple l'affectation de ce nœud dans cette zone ou encore de la topologie du réseau électrique global associé. En effet, par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes différents. Ensuite, il apparaît nécessaire d'attribuer un type à chaque nœud comme il est indiqué dans les références [8-10]. Les caractéristiques utilisées sont indiquées dans le tableau 2.

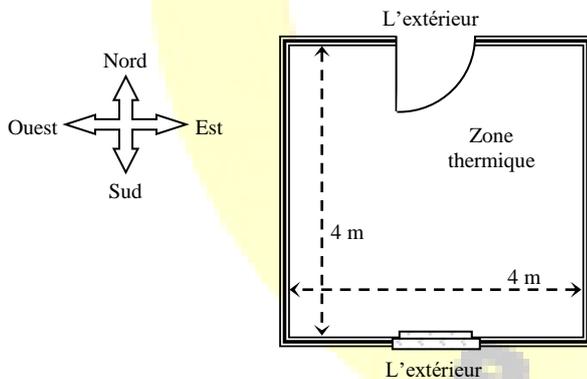


Fig. 2. Plan descriptif de la zone thermique étudiée

TABLE III.
PROPRIETES THERMIQUES, EPAISSEURS DES MURS ET CARACTERISTIQUES DE L'ENVELOPPE

	Matériaux et composition des murs	L (m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Murs extérieurs	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
	Pierre	0,4	2,3	2000	1000
	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
	Plâtre	0,01	0,56	1400	1000
Murs intérieurs	Mortier de ciment	0,015	1,41	1800	1000
	Plâtre argile	0,01	0,45	1200	840
	Pierre	0,15	2,3	2000	1000
	Plâtre argile	0,01	0,45	1800	1000
Sol	Carrelages	0,025	6,14	2300	875
	Ciment	0,02	1,4	1800	1000
	Béton dense	0,2	2,4	2400	800
Toiture	Plâtre	0,015	0,56	1400	1000
	Béton léger	0,12	0,33	800	719
	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000

IV. RESULTATS ET SIMULATION DES TEMPERATURES RESULTANTES & INTEGRATION DES MCPs DANS LES PAROIS

Les journées sélectionnées dans toute cette étude sont caractérisées par un ciel globalement clair, très peu nuageux, une température ambiante qui varie entre 14.8 °C (min) et 30.4 °C (max), une période peu ventée (Vitesse moyenne est de 2.24 m/s) et enfin une atmosphère extérieure très sèche. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel MATLAB car il présente l'avantage de posséder une bibliothèque intéressante. Les progrès des méthodes numériques, Runge-Kutta d'ordre 4 à titre indicatif, permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes.

La construction d'une structure compacte est une des clés de l'efficacité énergétique. La compacité est le rapport entre le volume habitable et l'ensemble des surfaces de déperdition, l'indice de compacité est l'inverse de ce rapport. La figure 3 rassemble les différents comportements prévus pour la température ambiante de l'air intérieur dans deux cas distincts. Le premier cas correspond à un espace exposé à tous niveaux dont l'indice de compacité est de 0.3125. Dans le deuxième cas, nous supposons que le toit et le mur Est sont adjacents à deux autres zones, l'indice de compacité devient 0.1875. Le débit massique de l'air entrant pour les deux cas est considéré nul.

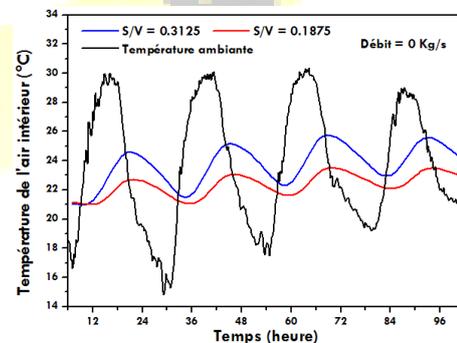




Fig. 3. Températures de l'air intérieur de l'espace bureau, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016

La figure 4 représente une illustration graphique de l'humidité relative correspondante pour débit massique entrant nul et pour une teneur en eau constante (7 g_{eau}/Kg_{airsec}).

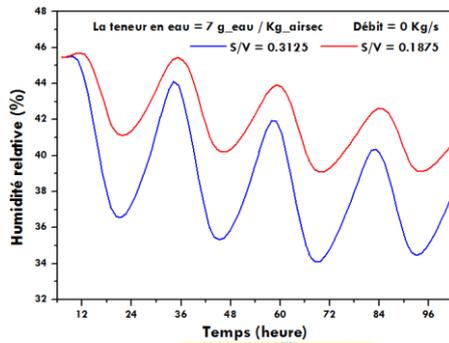


Fig. 4. Humidité relative de l'air intérieur de l'espace bureau, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016

La compacité d'une telle structure a des conséquences significatives sur les performances énergétiques en général. Selon la figure précédente, les températures les plus favorables correspondent aux deuxièmes cas. C'est légitime puisque la compacité favorise le confort intérieur. Le deuxième cas a été retenu pour voir l'apport des MCP sur les températures obtenues.

L'utilisation des matériaux à changement de phase MCP doit permettre de stocker/déstocker l'énergie provenant des apports solaires ou internes. L'intérêt et l'efficacité des MCP dépendent fortement du choix des caractéristiques (principalement de la température de fusion, de la chaleur latente et du coût) du matériau pour une application donnée. Le choix de la température de fusion est particulièrement important à fixer en fonction du type d'intégration et de l'application que l'on souhaite. Pour tirer profit de la chaleur latente, la température de fusion du matériau doit être proche de la température moyenne de l'environnement dans lequel il sera installé. Les plaques de MCP peuvent être intégrées dans toutes les parois verticales de l'enveloppe et dans le plancher. Les simulations réalisées dans ce travail reposent sur un modèle nodal établi [1]. La comparaison a été opérée avec une autre situation dont on s'intéresse à l'intégration intérieure d'une paroi MCP (de 3 cm d'épaisseur) sur deux murs exposés (Sud et Ouest). Pour le plancher, l'épaisseur choisie est de 10 cm. La température de fusion du MCP est une des caractéristiques essentielles du matériau, elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage (la fusion) ou le déstockage de chaleur (la solidification). Elle doit être proche de la température de confort entre 19°C et 27°C. Le modèle de base utilisé dans notre approche est celui développé par Kuznik et al, 2008 [2], les équations formulées pour reproduire

au mieux la courbe de la capacité calorifique sont données par 16 et 17:

$$\lambda = \begin{cases} 0.22 & \text{si } T \leq 22.6^\circ\text{C} \\ 0.18 & \text{si } T > 22.6^\circ\text{C} \end{cases} \quad (16)$$

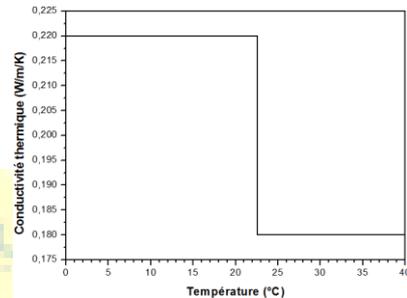


Fig. 5. Conductivité thermique du MCP sélectionné

$$C_p = \begin{cases} 4250 + 10750 \exp\left(-\frac{22.6 - T}{4}\right) & \text{si } T \leq 22.6^\circ\text{C} \\ 4250 + 10750 \exp\left(-\frac{22.6 - T}{3}\right) & \text{si } T > 22.6^\circ\text{C} \end{cases} \quad (17)$$

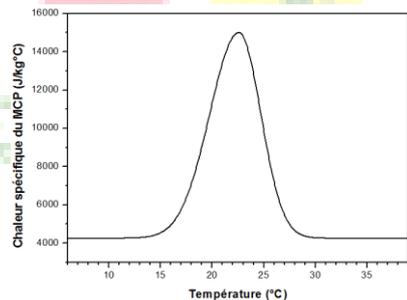


Fig. 6. Chaleur spécifique du MCP sélectionné

Les figures 7-10 donnent en temps réel les valeurs des températures superficielles intérieures et extérieures simulées des murs opaques soumis aux sollicitations climatiques extérieures.

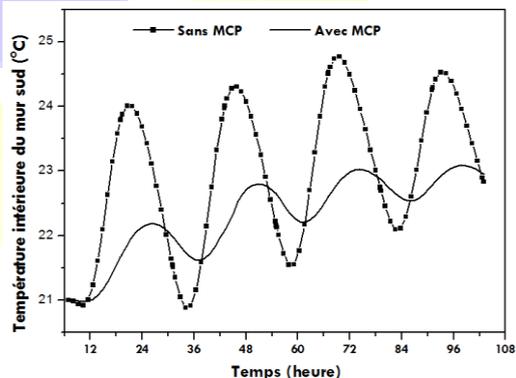


Fig. 7. Températures superficielles intérieures du mur Sud, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies
Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 et 25 Octobre 2016

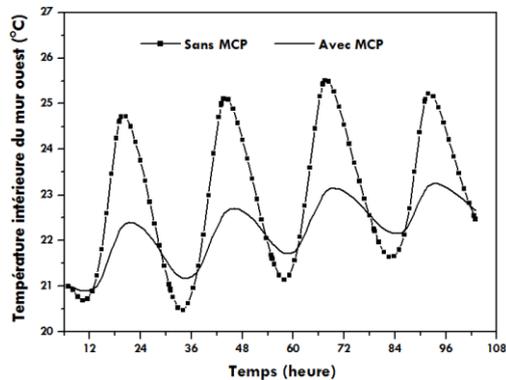


Fig. 8. Températures superficielles intérieures du mur Ouest, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016

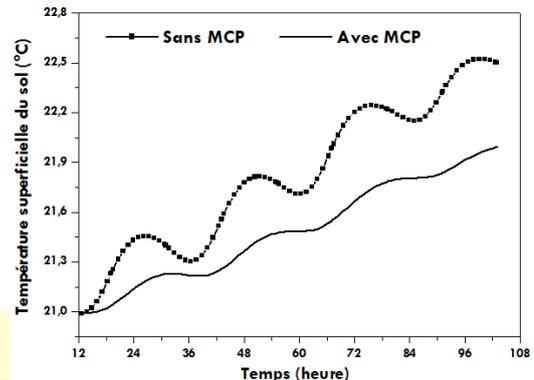


Fig. 11. Températures superficielles extérieures du sol, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016

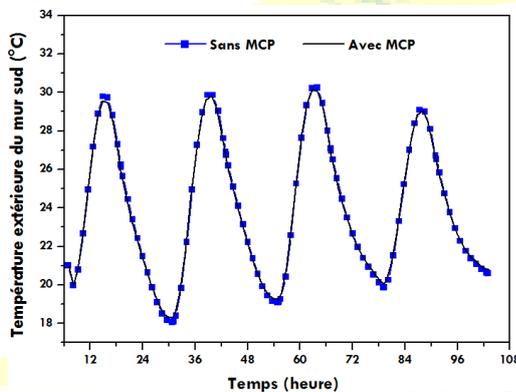


Fig. 9. Températures superficielles extérieures du mur Sud, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016

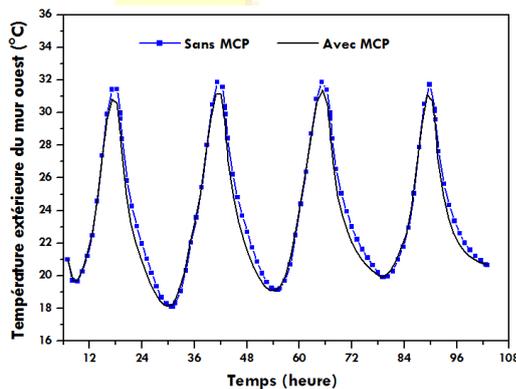


Fig. 10. Températures superficielles extérieures du mur Ouest, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016

On donne aussi une intention particulière sur le comportement de la température de l'air, les figures qui suivent nous décrivent les profils de ces températures.

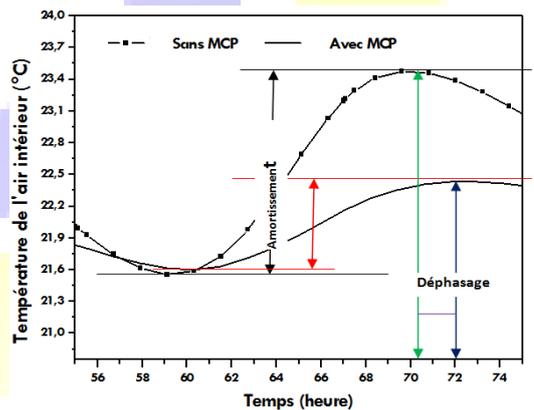
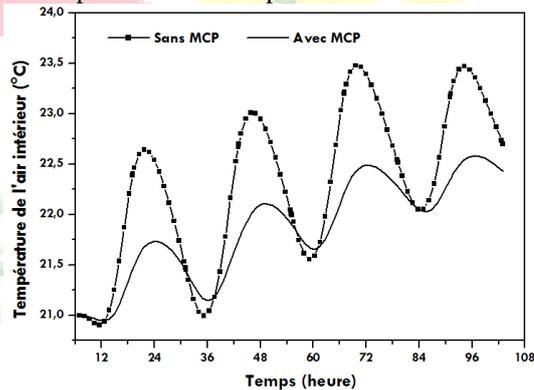


Fig. 12. Températures de l'air intérieur, Ghardaïa du 28 (07h) au 01 (07h) Avril 2016

La figure 3 donne les profils des températures superficielles du sol.

Pour l'interprétation des résultats obtenus, nous devons se baser sur le niveau d'inertie thermique, notamment sur les fluctuations des températures et le déphasage qui représente le



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2016



décalage de temps entre les pics des températures sans et avec l'intégration des matériaux à changement de phase MCP. Le panneau mural en MCP dans cet exemple assure une accumulation additionnelle d'inertie thermique. Le tableau 3 est un exemple indicatif qui permet de démontrer les principaux indices de cet aspect. On s'est intéressé à la détermination du déphasage et de l'amortissement en terme de température.

TABLE IIIII.

L'INFLUENCE DES MCPs SUR LE DÉPHASAGE ET SUR LES FLUCTUATIONS DES TEMPERATURES

	Amortissement des températures °C	Déphasage par rapport à la température ambiante	Différence en terme de Déphasage (sans et avec MCP)
Sans MCP	1.92018	06 h : 07 mn	03 h : 23 mn
Avec MCP	0.67202	09 h : 30 mn	

Par cette étude, il a été démontré que l'intégration des panneaux MCP a permis de ralentir plus le transfert de chaleur à travers les murs opaques et à l'intérieur de la zone thermique. Ainsi, l'amortissement des fluctuations induites en température est nettement clair pour l'air et pour les surfaces intérieures des murs exposés. En ce qui concerne les surfaces extérieures, les profils des températures ne varient pas beaucoup. La couche ajoutée (MCP) sur le coté intérieur du mur joue le rôle d'une barrière thermique. Nous réaffirmons par ces résultats que l'effet de ces types de matériaux sur le confort de l'occupant se traduit par une diminution des amplitudes de variation de la température intérieure de l'espace étudié malgré la forte inertie de cette l'enveloppe extérieure. Les résultats trouvés s'accordent avec de nombreuses études qui ont montré que l'adoption de la chaleur latente de stockage d'énergie thermique avec les PCMs réduit de manière significative les fluctuations de température intérieure et les charges de refroidissement. Le modèle de simulation utilisé permettra d'évaluer et chercher le bon fonctionnement des MCP sur plusieurs jours consécutifs. En se basant sur les propriétés de stockage de chaleur par voie latente, ces panneaux muraux en MCP permettent une protection thermique de la construction vis-à-vis de l'influence extérieure. Les travaux théoriques menés ont montré que l'utilisation des MCP pouvait conduire à une réduction de la température intérieure. Les résultats ont montré aussi qu'on peut envisager une solution pour avoir plus d'économie en énergie puisqu'elle consiste à accroître l'inertie thermique des parois par l'incorporation des MCP, caractérisés par une faible masse structurelle et une inertie thermique améliorée.

V. CONCLUSION

L'étude proposée dans cette communication fait partie d'un projet dont l'objectif final est de permettre une régulation passive de la température intérieure d'un bâtiment durant une période d'intersaison. La solution proposée pour y parvenir est l'incorporation des matériaux à changement de phase MCP. Une approche de modélisation de bâtiments multizones en climat saharien a été introduite dans ce travail. La méthode nodale thermique a été utilisée pour appréhender le comportement thermique de l'air soumis à des sollicitations diverses.

L'utilisation de matériaux à changements de phase dans permet d'augmenter l'inertie thermique tout en gardant de faibles épaisseurs de parois. Le choix du MCP est basé sur sa température de fusion préférablement proche de la température du confort thermique avec une chaleur latente importante. L'épaisseur optimale du MCP doit être choisie légèrement supérieure à celle de la limite de la fusion. Il est connu aussi que les MCP sont donc intéressants dans les bâtiments à faible inertie car ils permettent de limiter les fluctuations de température en été et / ou de puissance en hiver. Pour notre cas, nous avons prouvé que l'incorporation de ces matériaux peut être aussi bénéfique même pour les murs inertes soumises à des conditions sahariennes. Ils peuvent jouer le rôle de régulateur de température grâce à leurs capacités à stocker et restituer la chaleur de manière déphasée durant la saison estivale, hivernale et intersaisons. Le confort thermique sera subséquemment amélioré, l'intervalle d'intersaisons se prolongera et les saisons estivales et hivernales vont être diminuées. Ceci nécessite encore une stratégie de ventilation efficace.

REFERENCES

- [1] A. Maha, *Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments, couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires*, Université Joseph Fourier, Grenoble, Thèse de Doctorat en mécanique énergétique, 23 Novembre 2004.
- [2] A.M. Khudair, M.M. Farid, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*, Energy Conversion and Management, 2004, 45, 263 – 275.
- [3] V.V. Tyagi, D. Buddhi, *PCM thermal storage in buildings: A state of the art*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2007, 11, 1146 – 1166.
- [4] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, *Review on energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*, 2012, Applied Energy, 92, 593-605.
- [5] R. Sayanthan, W. Xiaoming, S. Jay, W. John, *Thermal performance of buildings integrated with phase changematerials to reduce heat stress risks during extreme heatwave events*, article in press, 2016, Applied Energy.
- [6] M.A.C. Haddam, *Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat*, Thèse de Doctorat en sciences physiques option : physique électronique et modélisation, Université de Tlemcen.



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies
**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2016**



- [7] P. Rumianowski, J. Brau, J.J Roux, *An adapted model for simulation of the interaction between a wall and the building heating system*. In Proceedings of the thermal performance of the exterior envelopes of buildings IV Conference Orlando, USA, p. 224-233, 1989.
- [8] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaiche et N Benamrane, *Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate*, Elsevier, Energy and Buildings vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [9] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, *Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region*, Construction and Building Materials 52 (2014) 59–70.
- [10] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, R. M Yaiche, R. Khanniche (2013), *Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria)*, International Scientific Journal, Thermal Science, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 349-364.

NOMENCLATURE

e	: épaisseur (m)	C_{air}	: la chaleur spécifique de l'air est supposée constante et estimée à $1008 \text{ (m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}, \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1})$
n	: nombre de nœud	V_{air}	: volume d'air (m^3)
α	: coefficient d'absorption	$Q_{Chauffage}$: la puissance thermique fournie par un appareil de chauffage (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source d'énergie.
ε	: émissivité thermique	$Q_{Rafraichissement}$: puissance thermique fournie par l'équipement de refroidissement (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source de refroidissement.
G	: éclairement solaire incident sur les surfaces (w m^{-2})	Q_{Inf}	: gain de puissance thermique due à l'infiltration de l'air (p).
S	: surface (m^2)	Q_{Vent}	: gain de puissance thermique due à la ventilation de l'air (p).
λ	: conductivité thermique ($\text{W k}^{-1} \text{ m}^{-1}$)	Q_{Surf}	: puissance thermique due à l'échange entre l'air et les murs surfaces intérieures (i), les fenêtres (ii) et les portes (w).
C_p	: chaleur spécifique ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Q_{Gain}	: gain d'énergie solaire directe grâce à des ouvertures (w), il est supposé que les ouvertures sont fermées, par conséquent, elle est égale à 0.
ρ	: densité (kg m^{-3})	m_{Inf}	: débit d'air due à l'infiltration (kg / s)
F	: facteur de forme entre les surfaces d'échange	m_{Vent}	: circulation de l'air due à la ventilation (kg / s)
σ	: constante de Stéphane-Boltzmann ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)	T_i	: température de l'air à l'intérieur du bâtiment (K)
V_{vent}	: vitesse du vent (m s^{-1})	T_{out}	: température de l'air à l'extérieur du bâtiment (K)
h_{Conv}	: coefficient de flux de chaleur échangé par convection ($\text{w m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)	T_{Vent+o}	: température de l'air à la sortie de ventilation (K)
T	: température (K)	$T_{Vent+in}$: température de l'air à la ventilation d'entrée (K)
ρ_{air}	: densité de l'air (kg m^{-3})	T_{Surf}	: température air- surfaces intérieures des murs (K)
		h_{Conv}	: coefficient de transfert convectif ($\text{w m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
		Gr	: nombre de Grashof
		Pr	: nombre de Prandt
		L	: longueur de la plaque (m)
		ΔT	: différence de température entre les surfaces et l'échange de volumes (K)