



Modélisation et simulation thermique d'un espace bureau soumis à des conditions Sahariennes

S Bendara ¹, S M A Bekkouche ², T Benouaz ¹, M A C. Haddam ¹

¹ Université de Tlemcen, BP. 119, Tlemcen R. p. 13000, Algérie.

² Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie
smabekkouche@yahoo.fr

Résumé — Cet article a été consacré à l'évaluation du confort thermique et à l'estimation du comportement thermique d'un espace bureau selon trois paramètres; la température, l'humidité et l'indice de confort Humidex. L'analyse du confort a été faite à travers la simulation thermique et à l'aide d'un programme de calcul conçu. Un modèle mathématique validé a été utilisé offre la possibilité de varier le maximum de paramètres et propriétés thermiques dans un temps limité. Les résultats de simulation montrent l'effet de ces trois variables sur la nature du confort thermique à l'intérieur d'un espace architectural.

Mots clés — Bilan énergétique – Température – Humidité relative – Humidex,

I. INTRODUCTION

Sauf exceptions, chaque bâtiment est un prototype unique pour lequel l'étude expérimentale de sa conception est irréalisable en pratique. Par conséquent, la conception des bâtiments, et plus précisément l'évaluation de ses performances thermo-aérauliques doit être assistée par la modélisation des phénomènes physiques [1]. La recherche dans le domaine de l'énergétique des bâtiments couvre un champ très vaste car les applications concernées sont extrêmement variées. La modélisation et la simulation sont devenues un outil très utilisé pour répondre à des besoins de dimensionnement de l'enveloppe en terme de l'efficacité énergétique d'un bâtiment ainsi pour guider les stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-aéraulique des bâtiments multizones.

Dans cette contribution, nous voulons valider et aboutir à un outil fiable, permettant d'analyser la propagation du flux de chaleur et de l'humidité à l'intérieur d'un espace bureau. L'exhaustivité recherchée s'exprime dans la prise en compte de tous les phénomènes physiques nécessaires pour une représentation satisfaisante de la réalité. La fiabilité numérique de cet outil intégré doit également être assurée afin de permettre son utilisation pratique.

II. MODEL DE CONDUCTION

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. 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.

On se base sur une autre approche simplifiée qui permet de représenter le système multicouche par un modèle proposé par Rumianowski et al [2] 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.

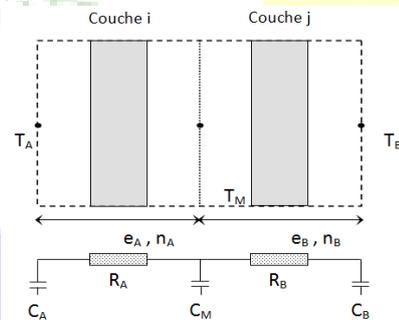


Fig. 1. Modèle de conduction.

Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes:

$$n = n_A + n_B \quad (1)$$

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (2)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (3)$$

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{Pi} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad (4)$$



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016



$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{P_j} e_j S_j \delta_j \quad (5)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_k C_{P_k} e_k S_k \beta_k + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{P_j} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (6)$$

$$\beta_i = \frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \frac{\sum_{k=1}^{i-1} e_k}{\lambda_k S_k} \quad (7)$$

$$\delta_j = \frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \frac{\sum_{k=n_A+1}^{j-1} e_k}{\lambda_k S_k} \quad (8)$$

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

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{\text{Surf-i}} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{\text{conv}} (T_{\text{air}} - T_A) \quad (9)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{\text{Ground out si de}}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{\text{Sky}}^4 - T_B^4) + S h_{\text{conv amb}} (T_{\text{amb}} - T_B) \quad (10)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = - \frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (11)$$

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:

$$\rho_{\text{air}} C_{\text{air}} V_{\text{air}} \frac{dT_{\text{air}}}{dt} = Q_{\text{Gai n}} + Q_{\text{Surf}} + Q_{\text{chauff}} + Q_{\text{refr}} + Q_{\text{Inf}} + Q_{\text{vent}} \quad (12)$$

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. L'énergie thermique due à l'échange entre l'air et les surfaces intérieures des murs est calculées par l'équation suivante:

$$Q_{\text{Surf}} = \sum S h_{\text{Conv}} (T_{\text{Surf}} - T_{\text{air}}) \quad (13)$$

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).
- 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 $R_a = Gr Pr$	Expression
Mur vertical	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^6$	$h_{\text{Conv}} = 1,42 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^6$	$h_{\text{Conv}} = 1,31 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface supérieure d'une plaque chaude horizontale ou surface inférieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^6$	$h_{\text{Conv}} = 1,32 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^6$	$h_{\text{Conv}} = 1,52 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface inférieure d'une plaque chaude ou surface supérieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^6$	$h_{\text{Conv}} = 0,59 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^6$	

III. HUMIDITE RELATIVE

L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air, que l'on définit comme la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à une température et une pression données [3]. Nous utilisons la formule empirique de Nadeau et Puiggali, 1995. L'humidité spécifique peut être donnée en fonction de l'humidité relative par les relations suivantes:

$$H_s = \frac{0.622 P_{\text{sat}}(T) Hr}{101325 - P_{\text{sat}}(T) Hr} \quad P_{\text{sat}}(T) = e^{23.3265 - \frac{3802.7}{T} \left[\frac{472.68}{T} \right]^2} \quad (14)$$

IV. L'HUMIDEX

C'est un indice qui est élaboré à partir de la combinaison de l'humidité et de la température. L'humidex permet d'évaluer l'intensité des conditions météorologiques supportées par les gens [4]. Un indice humidex de:

- moins de 30, aucun inconfort ;
- 30 à 39, un certain inconfort ;
- au-dessus de 40, beaucoup d'inconfort ;
- au-dessus de 45, il y a danger : un coup de chaleur est probable ;
- au-dessus de 54, un coup de chaleur est imminent.

La formule actuelle de l'indice humidex a été développée au Canada en 1979 par J. M. Masterton et F. A. Richardson [5]. Son calcul est assez compliqué:

$$H = T + h \quad (15)$$

T : température relevée sous abri normalisé (°C)



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies**

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



$$h = 0.55(e - 10) \quad (16)$$

e : tension de vapeur saturante telle que

$$e = 6.11 e^{(5417.7530 / ((1/273.16) - (1/Tr)))} \quad (17)$$

Tr : température du point de rosée (C)

Le point de rosée est une donnée thermodynamique caractérisant l'humidité dans un gaz.

Le point de rosée de l'air est la température à laquelle la pression partielle de vapeur d'eau est égale à sa pression de vapeur saturante. Il s'agit donc de la température à laquelle il faut refroidir un volume d'air, à pression et humidité constantes, pour qu'il devienne saturé [5].

Pour calculer la température Tr, nous utilisons la formule d'Heinrich Gustav Magnus-Tetens :

Domaine de validité :

- T, température mesurée : $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Hr, humidité relative: $1\% < R_H < 100\%$
- Tr, point de rosée : $0\text{ }^{\circ}\text{C} < Tr < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Tr = \frac{b \alpha(T, Hr)}{a - \alpha(T, Hr)} \quad (18)$$

Avec :

$$\alpha(T, Hr) = \frac{aT}{b+T} + \ln(Hr) \quad (19)$$

a = 17, 27 et b = 237, 7 (°C).

V. DESCRIPTION DE L'ESPACE BUREAU

L'étude s'est focalisée sur un espace bureau à l'Unité de Recherche de Ghardaïa, l'édifice a une surface habitable de 15.98 m² (4.7 x 3.4) dont la hauteur des murs est de 3.5 m. Le système constructif est un système poteaux poutres, avec des planchers à corps creux. L'enveloppe de la paroi Sud est exposée à l'environnement extérieur, est constituée d'une structure lourde en pierre ($\lambda=1.38\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho=2000\text{ kg m}^{-3}$, $C_p=1000\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) de 40 cm d'épaisseur, entourée de deux couches ayant respectivement une épaisseur de 1,5 cm de plâtre ($\lambda=0,56\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho=1400\text{ kg m}^{-3}$, $C_p=1000\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), 1 cm de ciment mortier ($\lambda=1,41\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho=1800\text{ kgm}^{-3}$, $C_p=1000\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) et un revêtement de finition intérieure. Les parois internes ou les murs de séparation du côté de hall sont considérées comme structures en parpaing ($\lambda=0.952\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho=1400\text{ kgm}^{-3}$, $C_p=1080\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), entourées de deux couches de mortier de ciment de 1,5 cm d'épaisseur et deux couches revêtement de finition (enduit du plâtre).



Fig. 2. Photo générale décrivant la position du bureau

VI. DONNEES CLIMATIQUES ET METEOROLOGIQUES

Dans ce travail, on s'est intéressé à l'utilisation d'un modèle efficace pour l'estimation des éclaircements reçus sur les différentes surfaces des murs. A cet effet, nous avons utilisé le modèle de Perrin Brichambaut qui est généralement le plus favorable pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur un capteur horizontal, même s'il ne présente qu'un peu d'avantage par rapport à celui de R.sun [6]. Les figures 3-4 donnent un aperçu général sur l'évolution instantanée de l'éclairement solaire reçue par les murs opaques en contact avec l'air ambiant extérieur de l'habitat et ceci sous un ciel clair. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel MatLab qui est un outil puissant de calcul numérique, de programmation et de visualisation graphique. Nous construisons ensuite des fonctions d'interpolation qui nous permettent d'avoir l'expression relative de l'éclairement solaire incident et qui va être intégrée dans le programme de calcul conçu. Cette démarche s'explique par le temps d'exécution du programme de calcul qui peut devenir important: le fait d'utiliser une base de données volumineuse, on peut générer par la suite un temps de calcul très important. En mathématiques (en analyse numérique), l'interpolation polynomiale est une technique d'interpolation d'un ensemble de données ou d'une fonction par un polynôme. En d'autres termes, étant donné un ensemble de points, on cherche un polynôme qui passe par tous ces points. Le résultat est toujours à la hauteur des espérances pour notre problématique. D'après les figures ci-dessous on peut remarquer que : en hiver, la façade nord ne reçoit que du rayonnement diffus et que, vu la faible hauteur du soleil, la façade sud reçoit le plus de puissance par rapport à une toiture horizontale. Par contre en été, on remarque qu'une façade nord reçoit quelques rayonnements directs et que, vu la grande hauteur du soleil, une toiture horizontale reçoit le plus du soleil par rapport à une façade sud.



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algeria 24 - 25 Octobre 2016

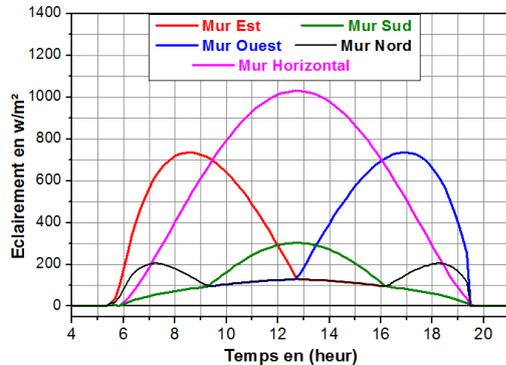


Fig.3. Eclairage solaire incident sur les murs extérieurs, le 13/06/2015.

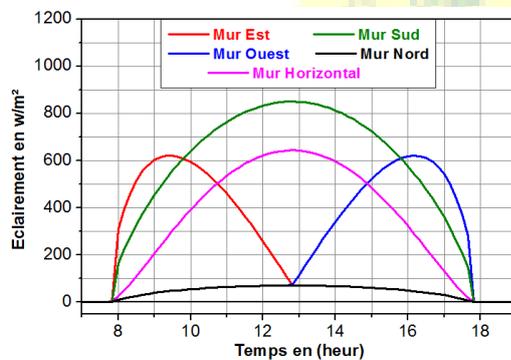


Fig.4. Eclairage solaire incident sur les murs extérieurs, le 01/01/2015.

La température extérieure qui se décline en température d'environnement est parmi les principaux paramètres extérieurs qui varient et qui influent tant sur les températures des parois que sur les relevés des températures de l'air intérieur. Nous utilisons toujours les fonctions d'interpolation qui vont être intégrées dans le programme de simulation. A cet égard, nous avons choisi deux périodes de huit jours chacune correspondant au site de Ghardaïa; huit jours appartiennent à la période estivale de l'année 2015 et les autres font partie de la période hivernale de la même année. Les figures (5-6) montrent le comportement de ces courbes.

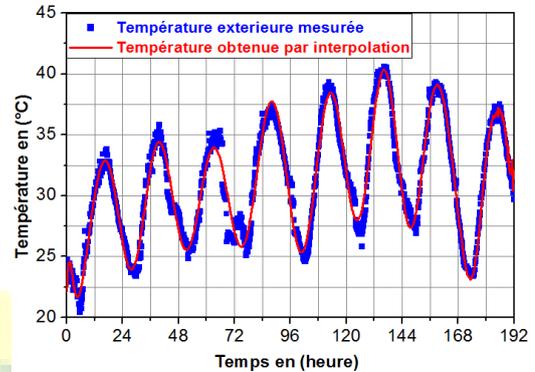


Fig.5. Température extérieure, les 06-13/06/2015.

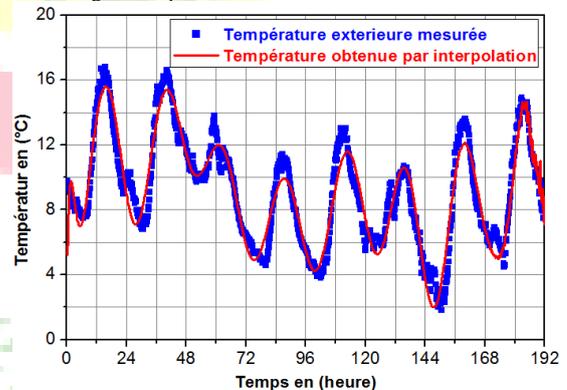
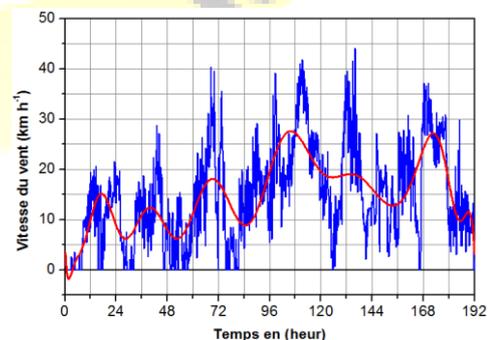


Fig.6. Température extérieure, les 27/12/2014-03/01/2015.

On s'intéresse aussi à la vitesse du vent qui fait partie du bilan global de l'habitat. Le vent est un des éléments les plus caractéristiques du climat. Il est caractérisé par sa vitesse et sa direction. Les vents sont globalement provoqués par un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète provenant du rayonnement stellaire (énergie solaire), et par la rotation de la planète. Sur Terre, ce déplacement est essentiel à l'explication de tous les phénomènes météorologiques. Le vent fait le plus souvent référence aux mouvements de l'air dans l'atmosphère terrestre, les figures (7-8) donnent une idée sur ce paramètre.





Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016



Fig.7. Vitesse du vent, le 06-13/06/2015.

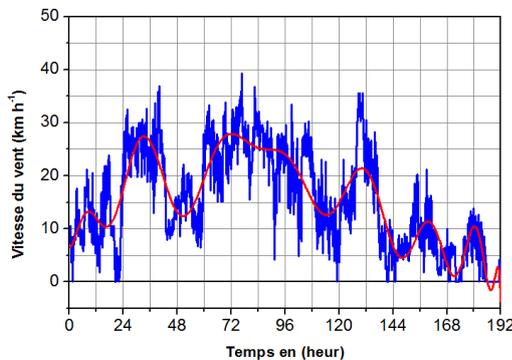


Fig.8. Vitesse du vent, le: 27/12/2014-03/01/2015.

D'après les figures de la vitesse du vent, on remarque que ce paramètre subit un comportement plus compliqué, il est parfois considérable et parfois faible. Le vent accélère l'échange thermique puisqu'il naît sous l'effet des différences de températures et de pression. C'est un flux d'air: l'air chaud et léger monte, l'air froid et lourd descend. Le mouvement de l'air, comme de la grande roue, est circulaire. C'est un mouvement perpétuel: l'air monte et descend, il se réchauffe et se refroidit.

VII. DISCUSSION ET CONFRONTATION DES RÉSULTATS

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 proche du bâtiment. Différents types d'outils sont utilisés en physique du bâtiment. Leur utilisation dépend principalement des étapes de la conception du projet.

En raison du coût et des durées expérimentales, la modélisation-simulation est un moyen efficace pour mettre au point et étudier le comportement thermique des bâtiments en régime variable [7]. Cette modélisation nous permet de décrire l'évolution des températures intérieures et l'humidité en été et en hiver pour un teneur en eau de l'air constant. En conséquence, il est légitime de disposer des méthodes numériques permettant de calculer très rapidement ces grandeurs. La simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant. Les progrès des méthodes numériques, permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes. Conçu pour répondre à ces besoins, Runge-Kutta d'ordre 4 est une méthode numérique qui permet d'appréhender le comportement thermique des murs et de l'air soumis à des sollicitations variées. Les courbes tracées (figures 9-10), représentent l'évolution de la température de

l'air. Le bâtiment sera considéré en évolution libre (sans charges internes, influençant les paramètres thermiques).

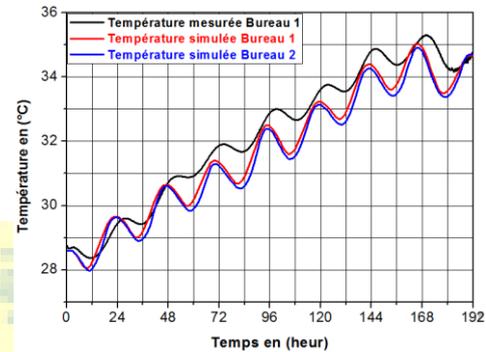


Fig.9. Température de l'air intérieur mesurée et simulée dans les bureaux période estivale.

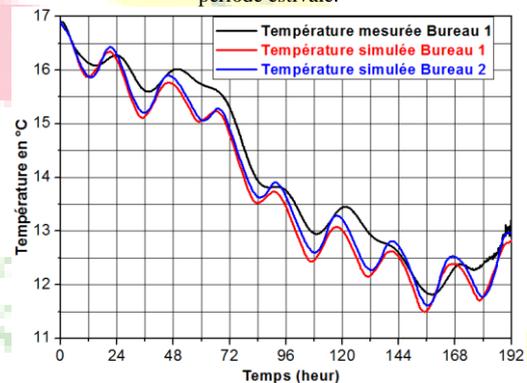


Fig.10. Température de l'air intérieur mesurée et simulée dans les bureaux période hivernale.

A travers les figures 09-10, on prouve que les murs détiennent un déphasage permettant de faire entrer les fluctuations des températures la nuit dans le mur puis les restituer la journée. L'inertie thermique (ou la masse thermique) est le potentiel de stockage thermique d'un local ou d'une maison. En été, le bâtiment accumule la chaleur puis la restitue de manière diffuse à l'intérieur avec un décalage plus ou moins important dans le temps suivant son inertie thermique. Les figures qui suivent (11-12) fournissent les profils des humidités obtenues par mesure et par simulation. Elles donnent un aperçu sur le comportement de l'air du bureau en absence d'un débit massique entrant et d'infiltration.



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016

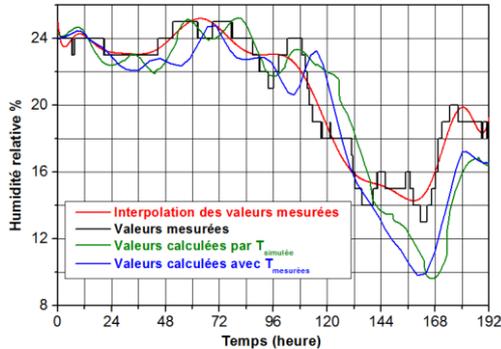


Fig.11. Humidité relative mesurée et simulée dans le bureau période estivale.

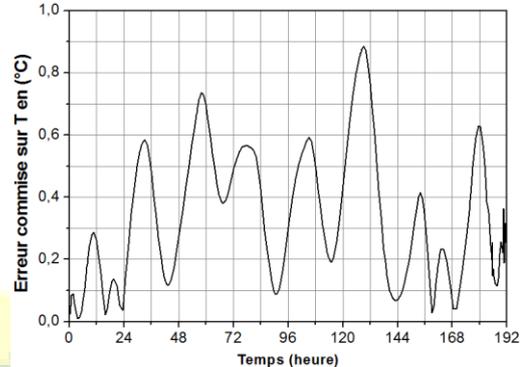


Fig.14. Erreurs absolues entre la température réelle et calculée période hivernale.

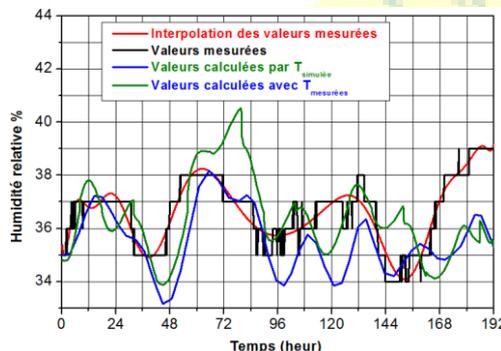


Fig.12. Humidité relative mesurée et simulée dans le bureau période hivernale.

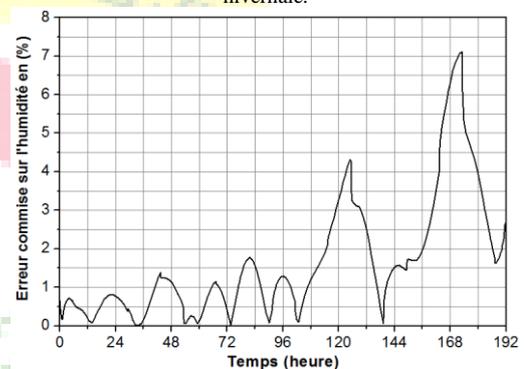


Fig.15. Erreurs absolues entre l'humidité réelle et calculée période estivale.

On peut déduire d'après ces résultats que l'humidité est inversement proportionnelle par rapport à la température pour un teneur en eau de l'air constant. Selon les figures et le tableau récapitulatif, nous remarquons que les valeurs sont globalement proches aux valeurs réelles, particulièrement pour le période hivernale.

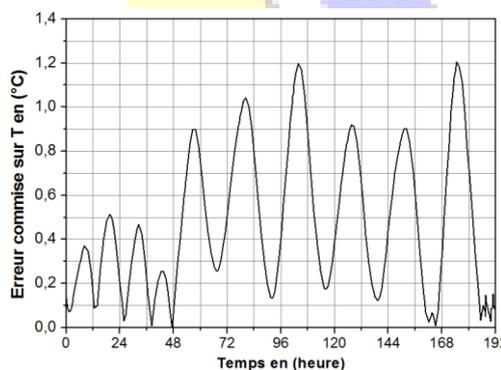


Fig.13. Erreurs absolues entre la température réelle et calculée période estivale.

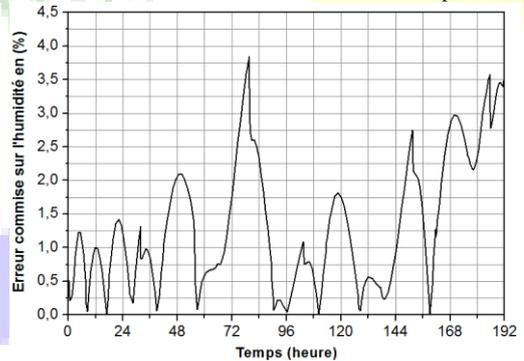


Fig.16. Erreurs absolues entre l'humidité réelle et calculée période hivernale.

TABLE IIIII.

CALCUL D'ERREURS SUR LES TEMPERATURES ET L'HUMIDITE RELATIVE

	Moy Abs	Max Abs	Min Abs	Médiane	Ecart-Type (σ)
T-estivale °C	0.4630	1.2035	7.2459e-005	0.3520	0.3446
T-hivernale °C	0.3474	0.8839	0.0103	0.3211	0.2197
Hr-estivale (%)	1.7083	7.1067	0.0136	1.1833	1.6390
Hr-Hivernal (%)	1.3657	3.8448	0.0045	1.0670	1.0234

Les courbes représentées par les figures 17-18 retracent la variation de l'indice humidex correspondant aux deux cas précédents.



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016

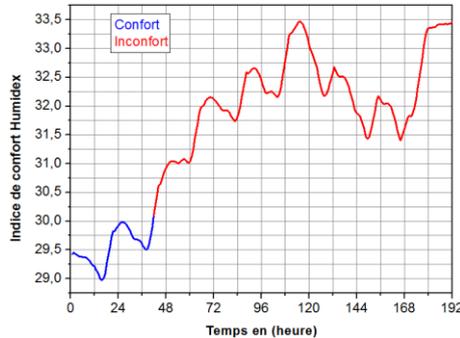


Fig.17. Humidex dans le bureau. Période estivale : 06-13/06/2015

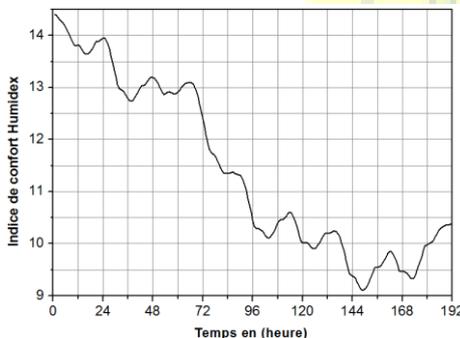


Figure.18. Humidex dans le bureau. Période hivernale : 26/12/2014-03/01/2015.

Selon les résultats obtenus, on remarque qu'il ya un certain inconfort durant la période estivale au cours du deuxième jour lorsque les valeurs de l'Humidex vont dépasser la valeur 30. Pour la période hivernale lorsque les valeurs sont inférieures, l'indice humidex sera proche de la température. L'ensemble des données mesurées s'est révélé globalement en bon accord avec les données simulées. Les résultats obtenus permettent de conclure que le modèle mathématique est assez bon pour prédire le comportement thermique effectif du bâtiment dans des conditions météorologiques réelles.

VIII. CONCLUSION

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. La prédiction de l'humidité et la température de l'air est un pas en avant dans le processus de simulation qui permet la compréhension du comportement du bâtiment, l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et l'estimation des niveaux de confort à l'intérieur.

Cette méthode simplifiée est une approche satisfaisante pour la compréhension du comportement thermique de l'air dans un bâtiment réel. Pour prédire le comportement

thermique d'un bâtiment, il est essentiel de procéder à une phase de simulation précédant l'ensemble de la performance du bâtiment incluant les transferts de chaleur. Cependant, l'erreur entre les valeurs de température estimées et les valeurs mesurées sont acceptables.

L'avantage de ces démarches est qu'elles permettent de transformer un problème très complexe en une série de problèmes plus faciles à traiter.

REFERENCES

- [1] Laurent MORA, *Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet*, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université de la Rochelle UFR sciences fondamentales et sciences pour l'ingénieur, Septembre 2003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_humidex
- [5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_de_ros%C3%A9
- [6] 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, N° 2, pp. 349-364.
- [7] Le Chauffage Solaire Passif Comme Stratégie Bioclimatique, Université Laval, Esquisses, Le Bulletin d'Information de l'Ordre des Architectes du Québec 2004, Volume 15, Numéro 1.

NOMENCLATURE

C_w	:	matrice diagonale de capacité thermique ($J K^{-1}$)
T_w	:	température (K)
A_w	:	matrice carrée de conductivité thermique ($W m^{-1} K^{-1}$)
B_w	:	vecteur
e	:	épaisseur (m)
n	:	nombre de nœud
α	:	coefficient d'absorption
ε	:	émissivité thermique
G	:	éclairage solaire incident sur les surfaces ($w m^{-2}$)
S	:	surface (m^2)
λ	:	conductivité thermique ($W k^{-1} m^{-1}$)
C_p	:	chaleur spécifique ($J kg^{-1} K^{-1}$)
ρ	:	densité ($kg m^{-3}$)
F	:	facteur de forme entre les surfaces d'échange
σ	:	constante de Stéphane-Boltzmann ($W m^{-2} K^{-4}$)
V_{vent}	:	vitesse du vent ($m s^{-1}$)
h_{Conv}	:	coefficient de flux de chaleur échangé par convection ($w m^{-2} K^{-1}$)
T	:	température (K)
ρ_{air}	:	densité de l'air ($kg m^{-3}$)
C_{air}	:	la chaleur spécifique de l'air est supposée constante et estimée à $1008 (m^2 s^{-2} K^{-1}, j kg^{-1} K^{-1})$
V_{air}	:	volume d'air (m^3)



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016**



$Q_{\text{Chauffage}}$: la puissance thermique fournie par un appareil de chauffage (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source d'énergie.
$Q_{\text{Refroidissement}}$: puissance thermique fournie par l'équipement de refroidissement (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source de refroidissement.
Q_{Inf}	: gain de puissance thermique due à l'infiltration de l'air (p).
Q_{Vent}	: gain de puissance thermique due à la ventilation de l'air (p).
Q_{Surf}	: puissance thermique due à l'échange entre l'air et les murs surfaces intérieures (i), les fenêtres (ii) et les portes (w). gain d'énergie solaire directe grâce à des ouvertures (w).
Q_{Gain}	: il est supposé que les ouvertures sont fermées, par conséquent, elle est égale à 0.
m_{Inf}	: débit d'air due à l'infiltration (kg / s)
m_{Vent}	: circulation de l'air due à la ventilation (kg / s)
T_i	: température de l'air à l'intérieur du bâtiment (K)
T_{out}	: température de l'air à l'extérieur du bâtiment (K)
$T_{\text{Vent-o}}$: température de l'air à la sortie de ventilation (K)
$T_{\text{Vent-in}}$: température de l'air à la ventilation d'entrée (K)
T_{Surf}	: température air- surfaces intérieures des murs (K)
h_{Conv}	: coefficient de transfert convectif ($w m^{-2} K^{-1}$)
Gr	: nombre de Grashof
Pr	: nombre de Prandtl
L	: longueur de la plaque (m)
ΔT	: différence de température entre les surfaces et l'échange de volumes (K)