

RESEARCH ARTICLE

EXAMEN DU PMV/PPD DE FANGER DANS LES AMBIANCES NATURELLEMENT VENTILEES DE LA BANDE COTIERE DU BENIN

^{1,2,*}Aurélien OLISSAN, ²Clément KOUCHADE, ¹Philippe ANDRE, ²Cossi Norbert AWANOU and ³Jean-Marie HAUGLUSTAINE

¹Département des Sciences et Gestion de l'Environnement-Université de Liège, équipe BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation), 185 Av. de Longwy, 6700, Arlon, Belgique

²Laboratoire de Physique du Rayonnement de l'Université d'Abomey Calavi, 01 BP 4521 Cotonou, Benin

³Département des Sciences et Gestion de l'Environnement-Université de Liège, équipe energy sud (Energy and Sustainable Development), Bât BE011-185 Av, de Longwy, 6700, Arlon, Belgique

Accepted 20th May, 2016; Published Online 30th June, 2016

ABSTRACT

La fonction principale de tous les bâtiments est qu'ils soient adaptés au climat, à l'environnement et aux objectifs pour lesquels ils ont été construits et, de ce fait fournir aux occupants une ambiance interne confortable. Comme dans le cas des ambiances climatisées, le modèle de FANGER surestime la sensation thermique des béninois dans des ambiances naturellement ventilés de la bande côtière du Bénin et, introduit une erreur de sensation qui semblerait être liée aux conditions climatiques et thermo physiologiques des populations de cette région. Par conséquent, les béninois de la bande côtière du Bénin accepteraient mieux les températures élevées que les températures basses. Celles-ci variant très peu le jour et la nuit dans cette région, l'humidité relative devient le facteur discriminant du confort thermique des bâtiments administratifs dans la bande côtière du Bénin. Le facteur d'espérance 0.5 semble ne pas être applicable dans cette région.

Key Words: PMV, Climat Chaud et Humide, Confort, Ambiances Naturellement Ventilés.

INTRODUCTION

Selon l'ASHRAE et la norme ISO 7730, on peut déterminer les conditions de confort en zone tempérée par le calcul du PMV (Fanger, 1970), indice de confort permettant de prévoir la valeur moyenne des expressions subjectives de confort d'un groupe de personnes dans une ambiance donnée. Cet indice s'étale sur une échelle de 7 points entre très chaud (+3) et très froid (-3). Plusieurs études à travers le monde ont été faites sur le confort thermique. Les approches utilisées sont celles de GIVONI, FANGER, GAGGE, et l'approche adaptative dont le pionnier est HUMPHREYS. Tandis que l'approche adaptative utilise les mesures in situ et les enquêtes de terrain pour apprécier la température de confort, les approches de GIVONI, FANGER et GAGGE en plus des enquêtes et les mesures in situ utilisent le bilan thermique du corps humain pour déterminer les indices de confort dans un environnement donné. En mesurant des températures allant de 28.1°C à 34°C et des humidités relatives comprises entre 30.8% et 75.5%, (OLANIKPEKUN Emmanuel Abiodun, 2014) a constaté que dans les ambiances intérieures des résidences universitaires de l'Université Obafemi Awolowo d'Ile Ife au Nigéria, plus de 80% de résidents se sentent en situation de confort thermique soit moins de 20% d'insatisfaits, contre 58% d'insatisfaits prédits par l'indice PPD, pendant que l'indice PMV de FANGER calculé, donnant une valeur de +1.63, prédit une sensation d'inconfort de chaleur. Par conséquent, il affirme qu'il n'existe aucune correspondance entre le PMV-PPD, calculé selon FANGER et les votes de sensation thermique enregistrés, sur le terrain dans cette région de climat chaud et humide. Dans le cadre de l'étude de l'efficacité énergétique des bâtiments à ABEOKOUTA, ville de même climat tropical humide que Lagos et la bande côtière du Bénin, (Mike ADEBAMOWO et Olumide OLUSANYA, 2012) ont étudié le confort thermique des bâtiments dans les résidences de l'institut de risque de cette ville. L'approche utilisée ici étant de l'adaptatif, une régression linéaire des sensations thermiques sur le terrain en fonction de la température opérative T_{op} et une comparaison aux résultats obtenus par l'utilisation des modèles adaptatifs de Humphreys et d'Aulicems dans cette région ont donné les résultats du tableau 0.

***Corresponding author: Aurélien OLISSAN,**

¹Département des Sciences et Gestion de l'Environnement-Université de Liège, équipe BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation), 185 Av. de Longwy, 6700, Arlon, Belgique.

²Laboratoire de Physique du Rayonnement de l'Université d'Abomey Calavi, 01 BP 4521 Cotonou, Benin.

Tableau 0: Comparaison des températures de confort à ABEOKOUTA

Saison/mois	Moyenne T _m (extérieure mensuelle) (°C)	Ti (intérieure) (°C)	Température prévues de confort		Température de confort idéale	
			Humphreys	Auliciens	TSV (ASHRAE) °C	TCV (Bedford) °C
Saison sèche (Décembre-Mars)	30.3	31.5	28	28.58	29.68 (R=0.358)	30.95 (R=0.267)
Saison des pluies (Avril-Novembre)	28.5	30.3	27	27.75	29.09 (R=0.364)	30.74 (R=0.287)
Toutes les saisons	29.5	30.5	27.5	27.99	29.30 (R=0.269)	30.81 (R=0.202)

La plupart des études réalisées ailleurs, a comparé le vote de sensation thermique actuelle dans une ambiance à la sensation thermique prévue par le calcul du PMV.

Parmi celles-ci, nous pouvons citer les travaux de Becker et autres, 2003 ; Hien et Tanamas, 2002 ; Bellayat et autres, 2002 ; Mallick, 1994 ; Auliciens, 1977 ; Auliciens & de Dear, 1986 ; Baillie, Griffiths & Huber, 1987 ; Bragger et al, 1994 ; Bussch, 1992 ; Cena & de Dear, 2001 ; Cena, Spotila & Ryan, 1988 ; Croome, Gan & Abwi, 1992 ; de Dear & Auliciens, 1985 ; de Dear, Leow & Ameen, 1991 . Particulièrement, Doherty et Arens, 1988 ont montré à travers leurs travaux que la différence entre le PMV prédit par le modèle de Fanger et le vote actuel de sensation thermique peut atteindre une valeur de 1.3 sur l'échelle ASHRAE. De la même manière, Humphreys, 1994a constaté dans ses travaux, que les températures de confort idéal mesurées dans des chambres climatiques peuvent être inférieures de 0.8°C ou supérieures de 3°C à celles prédites par le modèle PMV de confort de Fanger.

Humphreys, 1994 a aussi montré que le biais entre le PMV et les sensations actuelles ne se remarquent pas que dans les bâtiments naturellement ventilés, mais aussi dans ceux climatisés. La présente étude a pour but d'analyser le confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés de l'Université d'Abomey Calavi, facteur important dont dépend la consommation énergétique du bâtiment. L'approche utilisée ici tire son fondement du fait que le confort thermique dépend des paramètres microclimatiques ambiants (température ambiante, vitesse du vent, humidité relative de l'air...) qui varient souvent d'un point du globe terrestre à l'autre. Une première étude a été faite sur les bâtiments climatisés et les résultats sont semblables à ceux de la présente étude. Néanmoins, pour rafraîchir la mémoire de nos lecteurs, nous présenterons ici certains résultats saillants de cette étude sur les bâtiments climatisés pour une comparaison aux bâtiments naturellement ventilés.

En effet, la bande côtière du Bénin est une région comprise entre 1°41'58'' - 2°42'49'' de longitude Est et 6°14'13'' – 6°31'40'' de latitude Nord. Avec une forte humidité moyenne variant entre 73.5% et 84.1% et une température moyenne de l'air ambiant de 28.7°C au mois de mars, mois supposé être le plus chaud de l'année, cette région jouit d'un climat subéquatorial. Cotonou et Abomey-Calavi étant situées dans la zone du Sud côtier du Bénin, le stress thermique résultant de la combinaison de fortes valeurs d'humidité et de température est la source principale d'inconfort dans l'habitat dans cette région. La ventilation des locaux constitue une des principales solutions pour améliorer les conditions d'ambiance et restituer les conditions de confort thermique dans les habitations dans ces villes en conurbation (Cossi Norbert Awanou, 1984).

MATÉRIELS ET METHODS

Situation géographique de la ville d'ABOMEY CALAVI

Située à 6° 22' de la latitude Nord, Abomey-Calavi jouit du même climat côtier de type subéquatorial que Cotonou et se trouve à 20m d'altitude du niveau de la mer sur la côte béninoise, à environ 10 km de Cotonou. Avec une forte humidité relative de plus de 75% en moyenne par an, cette ville est caractérisée par deux saisons sèches respectivement de novembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre et par deux saisons de pluies d'avril à mi-juillet et de mi-septembre à octobre. La température moyenne de l'air ambiant est de 26°C. La température de l'air ambiant atteint sa valeur moyenne maximale de 28.7°C au mois de mars et minimale de 24.4°C au mois d'août, mois supposé être le plus froid de l'année. La proximité de la mer a une influence beaucoup plus importante sur l'humidité de l'air dans ces villes qu'ailleurs au Bénin. Sa valeur moyenne varie entre 73.5% à 84.1%. Dans cette ville, le plus bas taux d'humidité de l'air est observé au mois de janvier de chaque année.

Expérimentation

Le protocole d'expérimentation est le même que celui des ambiances climatisées (Aurélien OLISSAN & al, 2015). Quarante (40) expériences ont été réalisées en ambiances naturellement ventilées avec un total de 700 étudiants au mois de mars, mois supposé être le plus chaud de l'année. Les fenêtres ont été ouvertes dans ces ambiances se trouvant dans un bâtiment bordé d'arbres. Les mesures de températures, d'humidité relative et de vitesse de l'air ambiant ont été faites et les informations quant aux ressenti thermique et les résistances thermiques des habillements ont été prises en compte. L'appareil de mesure utilisé a une précision de mesure inférieure à 3%. Certaines mesures, dans certaines ambiances ventilées ont été faites en même temps que celles de la température et de l'humidité relative extérieures. Celles –ci seront utilisées plus tard pour l'étude du confort adaptatif.

Modèle mathématique de détermination des indices de confort PMV et PPD

Le modèle mathématique utilisé est celui de l'équation de Fanger repris par Olesen [Olesen, 1982]

$$PMV = (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028)[M - 3.0510^{-3}(5733 - 6.99M - p_a) - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5}M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] \tag{1}$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028M - 0.155I_{cl} [3.9610^{-8} f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] \tag{2}$$

$$hc = \begin{cases} 12.1\sqrt{v} si 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1\sqrt{v} \\ 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} si 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v} \end{cases} \tag{3}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2I_{cl} - si - I_{cl} \leq 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl} - si - I_{cl} > 0.5clo \end{cases} \tag{4}$$

$$PPD = 100 - 95 e^{-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \tag{5}$$

La résolution numérique de ces équations permet de calculer les indices PMV et PPD sur la base des renseignements fournis par les occupants des bâtiments.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Monitoring et calcul du PMV

Les sensations thermiques des personnes ayant participé aux enquêtes sont déterminées à partir de l'échelle de la figure 1.

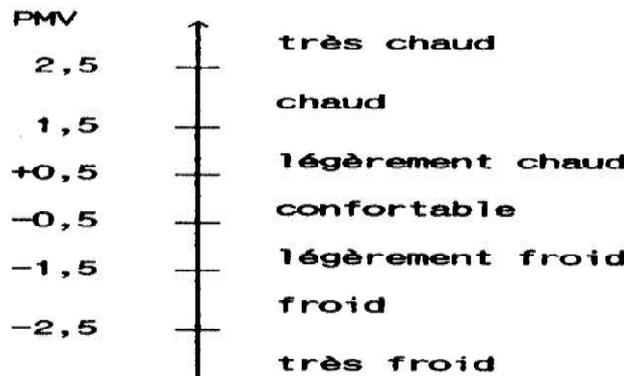


Figure 1. Echelle de PMV

Mesures

La figure 2 présente les résultats obtenus:

De nos mesures (figure 2), on remarque que les températures moyenne radiante et ambiante sont très peu différentes l'une de l'autre. Ceci confirme l'effet de l'ombrage créé par les arbres autour du bâtiment limitant ainsi les gains solaires à l'intérieur de l'immeuble. Les vitesses de vent mesurées sont très faibles (0.01 m/s < v < 0.17 m/s) et varient très peu. L'habillement aussi varie très peu. Cela va sans dire puisque les étudiants ont ici un uniforme vestimentaire pour assister au cours. Les températures sont presque constantes.

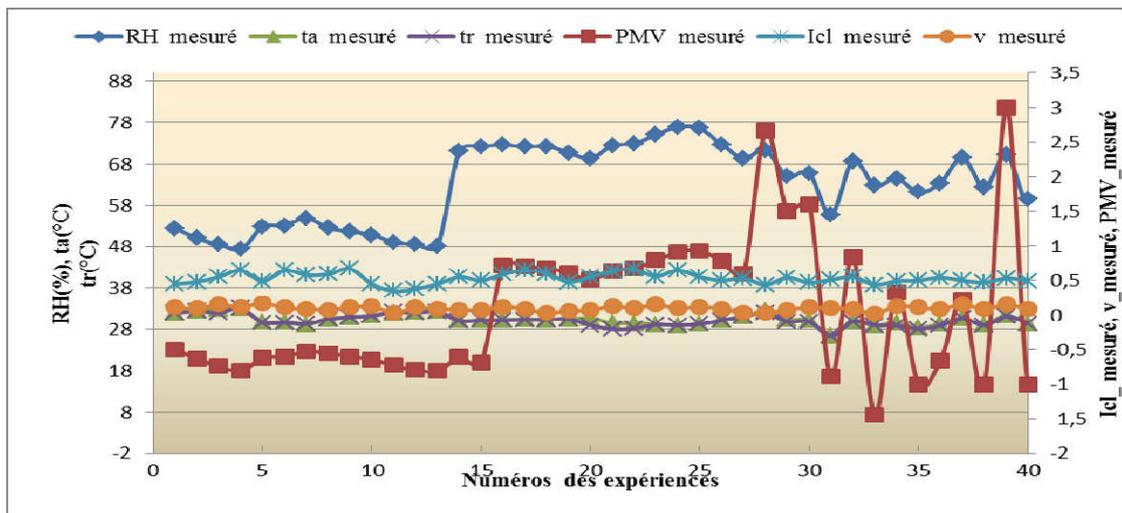


Figure 2. Paramètres mesurés

Les seuls caractéristiques sont l’humidité relative et le PMV. Les 30 premières observations montrent sur la figure 2, que le PMV et l’humidité relative varient de la même manière. A delà des 30 premières observations, on constate que le PMV et l’humidité relative ne sont plus parfaitement en phase. Ceci pourrait s’expliquer par le caractère subjectif que comporte le vote de sensation thermique des participants et pourrait être à l’origine d’une erreur d’appréciation de sensation thermique par certains participants.

Calcul et Comparaison des PMV calculés et ceux mesurés sur le terrain

Une représentation du PMV calculé par FANGER en fonction du PMV mesuré, nous a donné la Figure 3.

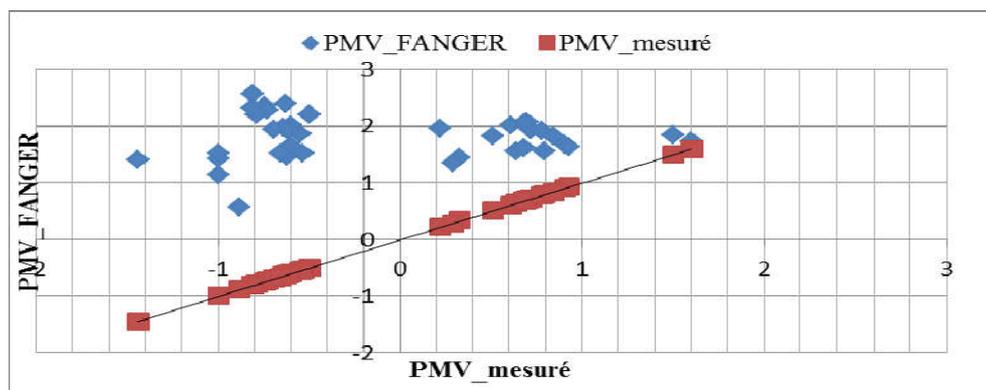


Figure 3. Comparaison PMV mesurés (sensation thermiques actuelles) et PMV calculés (prédits)

En observant le graphique de la figure (3), on constate que les points obtenus sont placés au - dessus de la première bissectrice du plan qui matérialise les valeurs du PMV mesuré, comme ce fut le cas des ambiances climatisées. On remarque aussi que le PMV calculé par le modèle de FANGER, est positif et supérieur au PMV mesuré dans les ambiances.

Modèle de FANGER adapté à la région côtière du Bénin

Comme dans le cas des ambiances climatisées, on remarque ici aussi que le PMV calculé selon FANGER est supérieur à celui mesuré sur le terrain. Cette supériorité, nous laisse penser à l’adaptation du modèle de FANGER aux conditions climatiques du Bénin, par un coefficient correctif comme c’est le cas en ambiances climatisées. Par conséquent dans les conditions climatiques de la région côtière du Bénin et en ambiances naturellement ventilées, on pourra écrire que:

$$\begin{aligned}
 PMV_{new} = & (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028)[M - 3.0510^{-3}(5733 - 6.99M - p_a) \\
 & - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5}M(5867 - pa) \\
 & - 0.0014M(34 - t_a) - 3.9610^{-8} f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - \Delta PMV
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

PMV_{new} étant le PMV adapté à la bande côtière du Bénin

L'expression du facteur correctif est obtenue comme dans le cas des ambiances climatisées à partir d'une régression multilinéaire. Le tableau 1 présente les spécifications de la régression.

Tableau 1. Régression pour modèle validé

R=0.95 ; R ² =0.90 ; F(2,48)=228.27 ; p<0.00006				
N=39	B	Err-type	t(48)	Valeur p
ta(°C)	0.15	0.015	10.16	0.00000
RH (%)	-0.046	0.007	-6.55	0.000000

$$\Delta PMV = 0.15ta - 0.046RH \quad (7)$$

Par conséquent, on pourra écrire que:

$$PMV_{new} = (0,303 \exp(-0,036.M) + 0.028)[M - 3,05.10^{-3}(5733 - 6,99.M - p_a) - 0,42(M - 58,15) - 1,7.10^{-5}M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96.10^{-8}.f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - (0.15t_a - 0.046RH) \quad (8)$$

Les équations 7 et 8 sont semblables à celles obtenues lorsque les investigations ont été faites dans des ambiances climatisées.

Application au comportement thermique d'un immeuble entièrement vitré à Cotonou

Le modèle adapté ayant été validé, nous l'avons testé pour étudier le comportement thermique d'un immeuble entièrement vitré à Cotonou (figure 4).

Le verre utilisé pour ce bâtiment est du simple vitrage ayant 4mm d'épaisseur et de caractéristiques thermiques les valeurs suivantes:

- Le coefficient de déperdition de chaleur $U = 5.68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$,
- Le facteur solaire $g = 0.855$.

Le sol, est composé d'un carrelage, d'un mortier et d'une dalle. Le plafond est quant à lui composé de plâtre, d'une lame d'air, du béton lourd et du carrelage, Les murs internes sont composés de plâtre d'une épaisseur de 0.015m, de briques pleines de 0,09m d'épaisseur et de granite de 0.015m d'épaisseur. La vitesse de l'air ambiant est supposée nulle, L'habillement des personnes à l'intérieur du bâtiment est de 0.6clo. L'infiltration est de 0.6/h. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel TRNSYS. Les données météorologiques utilisées sont celles de Lagos au Nigéria, ville située à moins de 100km de Cotonou et jouissant du même climat que celle de la bande côtière du Bénin.



Figure 4. Bâtiment test

Dans la bande côtière du Bénin, la température le jour et la nuit ne variant quasi pas [GRET, 2009], il est important d'étudier l'influence de l'humidité relative par rapport au confort thermique dans cette région. C'est l'objectif de l'application de ce modèle à l'étude thermique d'un bâtiment test

Simulation thermique du bâtiment

En utilisant les données de météonorme, on obtient le résultat de la figure 5. Le confort thermique est défini pour 4 paramètres physiques à savoir la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air ambiant et de la température moyenne radiante et pour deux paramètres physiologiques que sont le métabolisme et l'habillement. Dans le cas de la simulation thermique du bâtiment, la vitesse de l'air ambiant est prise comme nulle, l'habillement 0.6clo et le métabolisme 1.2met. Les seuls paramètres variant sont la température de l'air ambiant, la température moyenne radiante et l'humidité relative (figure 5).

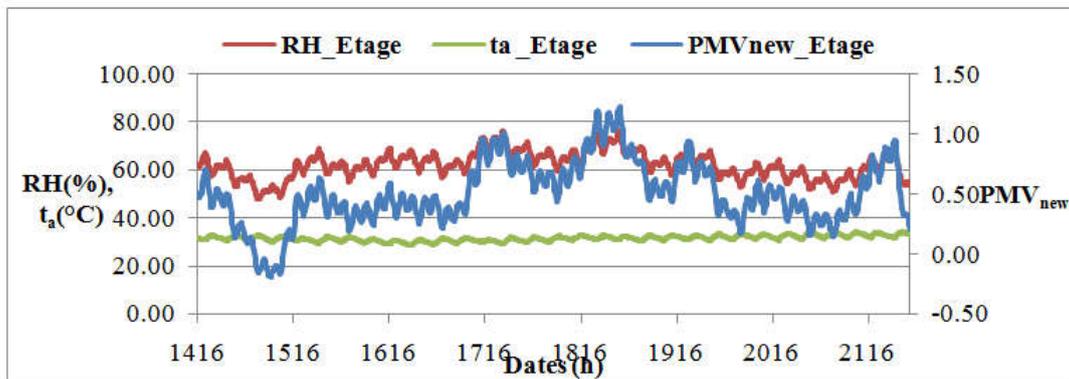


Figure 5. Comportement thermique du bâtiment

La température de l'air ambiant ne variant pas, caractéristique des climats chauds et humides en Afrique, les gains solaires étant atténués ici par le système d'ombrage, la température moyenne des parois et celle de l'air ambiant sont quasi les mêmes. Par conséquent, il en vient que le PMV_{new} varie uniquement en fonction de l'humidité relative. Une régression linéaire du PMV adapté à la bande côtière du Bénin par rapport à l'humidité donne un coefficient de régression $R^2 = 0.81$ avec une pente positive de 0.043 (figure 6). Ceci permet de dire que le PMV_{new} et l'humidité relative varient dans le même sens.

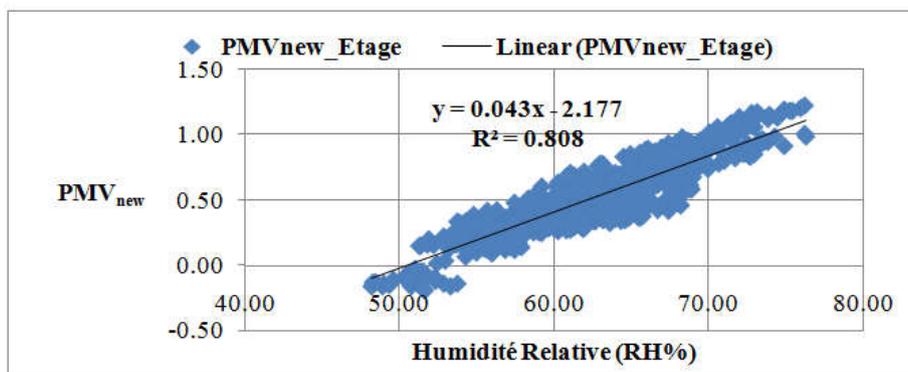


Figure 6: Régression linéaire du PMV_{new} en fonction de l'humidité relative

$$PMV_{new} = 0.043RH - 2.178 \text{ avec } R^2 = 0.81 \tag{9}$$

Evidemment, en comparant la pente de la droite d'équation (9) au coefficient de l'humidité relative dans l'équation (8), on constate une erreur relative d'environ 6.5%, ce qui indique que le terme linéaire de la relation (8) est prépondérant en ce qui concerne l'influence de l'humidité relative sur le niveau de confort dans la bande côtière du Bénin. La corrélation est de plus positive (l'augmentation de l'humidité relative tend à augmenter l'inconfort PMV_{new}). En revanche, l'augmentation de la température tend à diminuer le confort (via le terme $-0.15t_a$). On pourra en conclure alors que contrairement aux pays tempérés où la température a un effet plus important par rapport à l'humidité sur le confort thermique, dans la bande côtière du Bénin, l'humidité relative paraît plus prépondérante par rapport à la température. Cette dernière, ne variant pas dans le temps, l'humidité relative devient alors le facteur discriminant dont dépend le PMV c'est-à-dire le confort thermique dans la bande côtière du Bénin

Interprétation physiologique

Evidemment l'Européen et l'Africain n'ont pas les mêmes sensations thermiques. Les températures et humidités des ambiances considérées dans nos travaux, étant plus élevées que celles admises en climat tempéré, il semble que la sensation thermique est plus sévère (en température élevée) chez les personnes des climats tempérés que chez l'Africain. Cette sévérité ou supériorité de sensation s'exprime par ce biais ΔPMV de l'équation (6).

Si l'on considère que les sensibilités du PMV par rapport à la température, respectivement à l'humidité relative, correspondent à la sensation par rapport à la température respectivement à l'humidité relative de l'individu, on pourra écrire les relations suivantes:

$$PMV_{new} = PMV - \Delta PMV \quad (10)$$

Les sensibilités seront ici exprimées par les dérivées partielles de l'équation (10) respectivement par rapport à la température et l'humidité relative. On pourra écrire alors:

Pour les ambiances climatisées

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial t_a} = \frac{\partial PMV}{\partial t_a} - 0.13 \quad (11)$$

(Aurélien OLISSAN & al., 2016)

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial RH} = \frac{\partial PMV}{\partial RH} + 0.032 \quad (12)$$

Pour les ambiances naturellement ventilées

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial t_a} = \frac{\partial PMV}{\partial t_a} - 0.15 \quad (11')$$

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial RH} = \frac{\partial PMV}{\partial RH} + 0.046 \quad (12')$$

Aux regards des relations (11), (11') et (12), (12') on peut dire ce qui suit:

En considérant comme référentiel, la sensation thermique des personnes du climat tempéré, l'introduction de ΔPMV dans l'équation de FANGER (équation de sensation thermique des personnes du climat tempéré), nous permet de constater que l'adaptation de celle-ci à la région du sud côtier du Bénin, augmenterait la sensation à l'humidité relative de 3.2% en ambiance climatisée, respectivement 4.6% en ambiance naturellement ventilée, chez les Africains par rapport à celle des personnes des climats tempérés. En revanche, la sensation à la température diminuerait de 13% en ambiance climatisée respectivement de 15% en ambiance naturellement ventilée, par rapport à celle des Européens, ce qui exprime que les Africains de la bande côtière du Bénin, seraient moins sensibles à la température que les personnes du climat tempéré, donc accepteraient ici des températures élevées.

La diminution de la sensation à la température chez l'homme noir de la bande côtière du Bénin ne pourrait – elle pas être expliquée par un pouvoir réfléchissant de sa peau des infrarouges plus élevée chez les Africains de la bande côtière du Bénin que chez les Européens? Si oui, quelle serait cette substance qui confère à la peau noire de cette population, cette nuance ethnique par rapport à la peau blanche? Est – ce toujours la mélanine comme c'est le cas avec les ultra - violets du soleil, malgré quelques controverses ici et là sur cette hypothèse (Taketsugu Tadokoro, 2003)? L'augmentation de la sensation à l'humidité relative ne s'expliquerait – elle pas par les pertes d'eau transépidermique insensible et de la sueur chez l'Africain, fonction de la température, plus abondante chez l'Africain que chez l'Européen (Thomson. M. L, 1954), (Flagothier C & al, 2005)? Si oui, ceci ne pourrait que confirmer l'hypothèse selon laquelle, la sensation de fraîcheur ou de chaleur, soit le confort thermique en ambiance ventilé, chez l'Africain du Sud côtier du Bénin, dépendrait de la capacité de l'air ambiant à pouvoir évaporer, les pertes d'eau insensibles et de sueur fonction de la température, soit de l'humidité relative de l'air ambiant.

Toutes ces questions méritent d'être approfondies car très peu d'études ont été entreprises sur les propriétés mécaniques de la peau, des personnes habitant la bande côtière du Bénin. Les équations 11 et 11' sont de la même forme.

Elles diffèrent l'une de l'autre par les valeurs des constantes qui ici expriment le degré de sensation selon que l'on soit en ambiance climatisée ou en ambiance ventilée. Evidemment, en ambiance naturellement ventilée, les paramètres température et humidité relative sont souvent plus élevées que ceux en ambiance climatisée. Par conséquent la sensation chez les personnes des climats tempérés sera plus vive en ambiance naturellement ventilée et s'exprimerait par le coefficient (-0.15) qu'en ambiance climatisée et s'exprimerait par le coefficient (-0.13). Autrement dit, à cause de ces constantes, on dira que l'Africain de la bande côtière du Bénin est plus sensible à la température basse, donc acceptent moins les températures basses que les températures élevées.

De même, les différences entre les équations 12 et 12' se situent au niveau des constantes. L'humidité étant plus élevée en ambiance naturellement ventilée qu'en climatisée, la sensation à l'humidité relative sera plus intense chez l'homme de la bande côtière du Bénin en ambiance naturellement ventilée et s'exprime par le coefficient (+0.046) qu'en ambiance climatisée par rapport aux personnes des climats tempérés et s'exprime par le coefficient (+0.032). Mieux, les températures étant plus élevées en ambiances naturellement ventilés, il en viendrait que les sensation à l'humidité soient beaucoup plus exprimées du fait que les pertes d'eau soient ici plus intenses.

Ventilation

En considérant les limites de vitesse d'air ambiant admises en climat chaud [Santamouris. M., 2006], on obtient la zone de confort définie dans le tableau 2 et représentée à la figure 7. On constate à travers ce tableau que les limites du taux d'humidité admises pour garantir le confort décroissent avec la température.

Plus la température est élevée, plus basses seront les limites admises des taux d'humidité relative pour permettre à l'air ambiant de faire évaporer les pertes d'eau libérées par les glandes sudoripares.

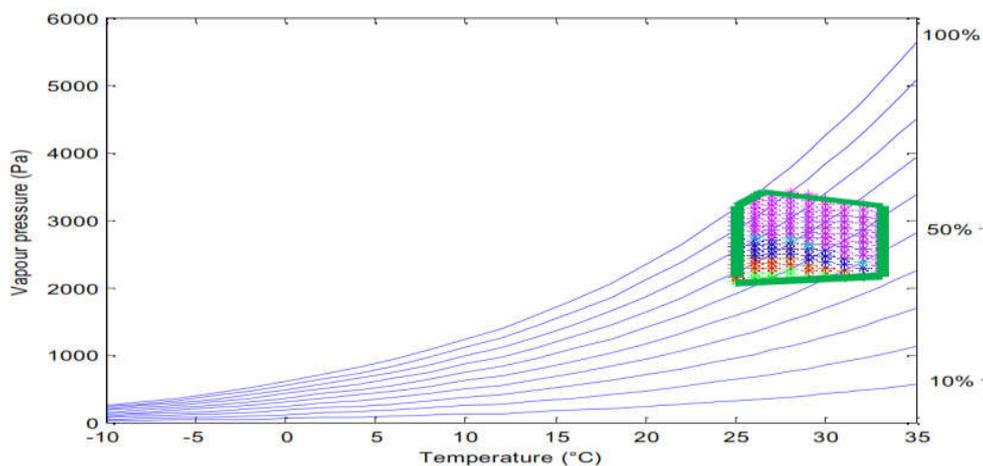


Figure 7. Zone de confort (ambiances naturellement ventilées)

Tableau 2. Zone de confort en fonction de la vitesse de l'air ambiant pour Icl=0.5clo

		ta (°C)									
v(m/s)	RH(%)	25°C	26°C	27°C	28°C	29°C	30°C	31°C	32°C	33°C	
0.02	min (%)	66	64	60	58	54	52	48	46	44	
	max (%)	84	80	78	74	70	68	64	62	60	
0.2	min (%)	68	68	64	62	56	54	50	48	44	
	max (%)	90	86	82	78	72	70	68	64	60	
0.4	min (%)	78	74	70	66	60	56	52	48	44	
	max (%)	94	90	86	82	78	74	68	64	60	
1.2	min (%)	88	82	78	72	66	62	56	50	46	
	max (%)	100	100	94	88	82	78	72	66	62	
1.5	min (%)	90	84	78	74	68	62	56	52	46	
	max (%)	100	100	94	90	84	78	72	68	62	

On constate que plus élevées sont les températures, plus basses sont les humidités relatives pour obtenir le confort. Ceci voudrait alors dire que pour des températures élevées, un contrôle de l'humidité relative à des valeurs basses garantirait le confort.

Facteur d'espérance des béninois de la bande côtière du Bénin : Calcul du PMV étendu de FANGER à la bande côtière du Bénin

Selon FANGER et TOFTUM, 2002, la supériorité du, la supériorité du PMV de FANGER à la sensation thermique en climat chaud s'explique par le fait que les personnes vivant dans ce type de climat soient habituées à la chaleur et par conséquent leurs attentes sont différentes de celles vivant dans un climat tempéré.

Cette attente est matérialisée par un facteur e compris entre 0.5 et 1 et doit multiplier le PMV en climat tempéré. Il vaut 1 pour les ambiances conditionnées ou climatisées. Quant aux bâtiments naturellement ventilés, ce facteur dépend de la durée de la période de chaleur le long de l'année et du nombre de bâtiments climatisés dans la région. Si le nombre de bâtiments climatisés dans une région donnée est très peu et qu'il fait chaud presque toute l'année ce facteur e vaut 0.5 et 0.7 si le nombre climatisé dans la région est élevé. Pour les bâtiments non climatisés d'une région où il ne fait que chaud l'été avec absence ou peu de bâtiments climatisés, le facteur d'espérance est compris entre 0.7 et 0.8 et entre 0.8 et 0.9 pour des régions avec un nombre de bâtiments climatisés élevé. Dans les régions où la période de chaleur est très courte durant l'été, ce facteur est compris entre 0.9 et 1.

Dans la bande côtière du Bénin, il fait chaud tout le long de l'année, avec une période très courte de fraîcheur aux mois d'Août et de Janvier. Par conséquent la bande côtière du Bénin serait classée parmi les régions à faible espérance en matière de confort thermique. Nous avons déterminé la valeur maximale de température pour laquelle, on est à la limite du confort thermique c'est-à-dire la valeur pour laquelle le PMV_{new} à la bande côtière du Bénin vaut 0.5, comme l'exige l'algorithme. En considérant le PMV_{new} comme étant le PMV étendu au climat chaud de Fanger, on va réduire le métabolisme de $1.41 \times 6.7\%$, soit de 9.44% [29] et on recalcule le PMV de Fanger qui devient le $PMV_{réduit}$. En effet, en prenant pour température ambiante $t_a = 30^\circ C$ et une vitesse maximale de $1.5m/s$, un métabolisme de $70W/m^2$ et $Icl=0.55clo$, on a le tableau 3 suivant:

Tableau 3. Calcul du facteur d'espérance pour $t_a=30^\circ C$

RH (%)	69.39	72.39	75.39	77.65	81.39	82	83	90.39	93.39	94.39	97.39
PMV	1.35	1.38	1.41	1.43	1.46	1.47	1.48	1.55	1.58	1.58	1.61
PMV_{new}	0.04	0.21	0.37	0.5	0.71	0.74	0.8	1.2	1.37	1.43	1.59
$PMV_{réduit}$	1.22	1.25	1.29	1.31	1.35	1.35	1.36	1.44	1.47	1.48	1.51

Par conséquent, le facteur d'espérance sera $0.5/1.31 = 0.38$ qui est inférieur à 0.5. On en déduit que $30^\circ C$ ne pourra pas être la valeur de la température maximale pour laquelle on est à la limite de confort. On refait le même calcul pour la température ambiante $t_a = 29.20^\circ C$ et une vitesse maximale de $1.5m/s$, un métabolisme de $70W/m^2$ et $Icl = 0.55clo$, on a le tableau 4 suivant:

Tableau 4. Calcul du facteur d'espérance pour $t_a=29.20^\circ C$

RH(%)	77.65	81.39	81.42	81.90	82	83	84
PMV	1.07	1.11	1.11	1.1	1.11	1.12	1.13
PMV_{new}	0.27	0.47	0.47	0.5	0.51	0.56	0.62
$PMV_{réduit}$	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99	1.007	1.01

Par conséquent, comme précédemment, on obtient $e = \frac{0.50}{0.99} = 0.50$ qui est admise.

On peut alors écrire : $PMV_e = PMV_{new} = 0.5 PMV_{réduit}$ (13)

La relation (14) ci-dessus montre qu'après réduction du PMV de FANGER, il faudrait le multiplier par le facteur de 0.5 pour avoir la sensation thermique dans la bande côtière du Bénin. Ce facteur ne prend pas en compte les sensations de fraîcheur ressentie par les habitants de cette région durant le mois de Janvier où l'air extérieur devient plus sec que d'habitude. Evidemment pour une humidité relative basse entre 45% et 62%, et une température comprise entre $24^\circ C$ et $28^\circ C$, les habitants de la bande côtière du Bénin ont une sensation de fraîcheur (figure 8), tandis que le $PMV_{réduit}$ de FANGER prédirait une sensation de chaleur confortable ou inconfortable qui est une valeur positive n'exprimant pas une sensation de fraîcheur ! Mieux, la régression linéaire de la sensation thermique mesurée sur le terrain en fonction du $PMV_{réduit}$ (figure 9), donne la relation suivante:

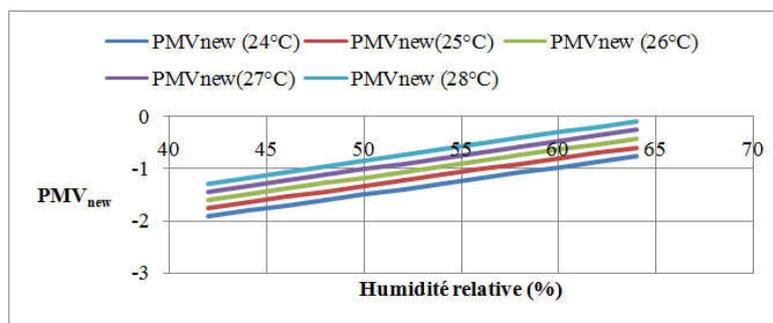


Figure 8. Sensation thermique des béninois de la bande côtière du Bénin pour des températures et humidités de l'air relativement basses

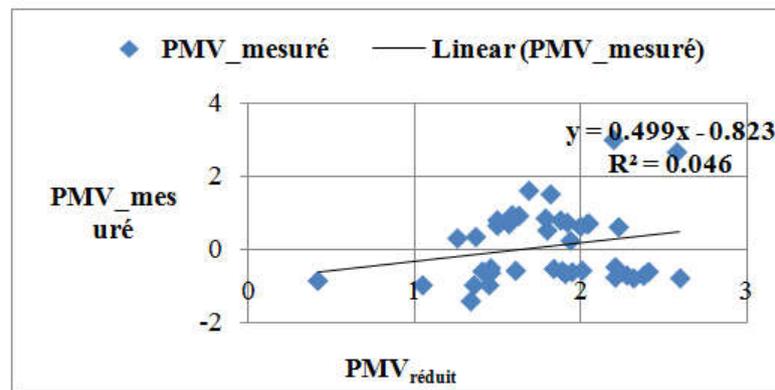


Figure 9 : Vote de sensation thermique ou le $PMV_{mesuré}$ en fonction du $PMV_{réduit}$

$$PMV_{mesuré} = 0.499PMV_{réduit} - 0.823 \quad R^2 = 0.046 \quad (14)$$

Il est facile de constater que l'ordonnée à l'origine de l'équation ci-dessus n'est pas négligeable. Le coefficient R^2 de corrélation est aussi très faible. Par conséquent, il est impossible de recommander dans cette région l'utilisation du modèle étendu de FANGER pour apprécier le confort thermique des bâtiments. Cette remarque a été mise en exergue avec les travaux d'An Tuan Nguyen, 2006, au Vietnam et ceux de Wagner Augusto Andreasi, 2005 à Corumba et à Campo Grande au Brésil. Est-ce ici une erreur de choix de l'espérance des béninois en matière de confort thermique des bâtiments ?

Conclusions et Perspectives

- Le modèle de FANGER surestime la sensation thermique des Africains de la bande côtière du Bénin
- Le biais de sensation thermique entre les Européens et les Africains de la bande côtière du Bénin, semblent être lié aux caractéristiques thermo physiologiques de la population de cette région et en particulier aux nuances ethniques de leur peau.
- En définitive, il en viendrait que les habitants de la région côtière du sud du Bénin, accepteraient plus les températures élevées que les basses, et seraient plus sensibles à l'humidité relative qu'à la température, contrairement aux personnes vivant dans un climat tempéré. Tout ceci, ajouté au fait que la température soit déjà caractérisée par une faible variation (jour et nuit) dans le sud côtier du Bénin, semble témoigner de la primauté de l'humidité relative sur la température et confère à l'humidité relative, le caractère discriminant du confort thermique dans cette région en ambiances naturellement ventilées. Par conséquent, ne serait-il pas intéressant que l'humidité relative soit considéré comme étant le seul paramètre à contrôler en matière de climatisation dans la bande côtière du Bénin pour une efficacité énergétique du bâtiment?
- Ces travaux bien que s'occupant du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments au Bénin, doit permettre de rouvrir le débat sur l'origine de la fréquence des problèmes de la peau et plus précisément celui du cancer de la peau, chez les Européens. Par conséquent, ils doivent donner lieu à la détermination dans les limites admises, de la température optimale à laquelle les bâtiments doivent être chauffés en hiver pour minimiser en même temps que l'exposition des Européens aux infrarouges de la température ambiante, la consommation énergétique des bâtiments!
- Ce faisant, l'implication de ces travaux est alors polyvalente car ils permettent d'apporter d'une part une solution aux problèmes énergétique et environnemental et d'autre part rouvrir le débat sur les affections de la peau et plus précisément celui du cancer de la peau chez les personnes de la race blanche.
- Ceci étant, ne pourra-t-on pas envisager désormais le mariage de deux options à savoir: Science de l'environnement-Energie (Confort thermique des bâtiments) et Sciences de la santé?
- Ne serait-il pas alors envisageable de revoir la théorie de FANGER en tenant compte des spécificités ethniques ou raciales? N'est-ce pas ce que voudrait signifier Hope (2002) [32] dans ses travaux lorsqu'il affirme que l'étude du confort thermique doit prendre en compte trois aspects essentiels à savoir : psychologique, thermo physiologique et celui du bilan énergétique du corps humain avec son environnement ?
- L'humidité relative étant le caractère discriminant du confort thermique dans cette région, il serait intéressant de se poser la question de savoir si l'adaptatif dans cette région ne remet-il pas en cause cette conclusion qui caractérise la sensation thermique dans la bande côtière du Bénin.

Remerciement

Nous remercions la Coopération Universitaire Décentralisée qui a financé nos voyages en Afrique et l'acquisition des équipements de mesure qui nous ont été très utiles durant nos campagnes de mesure. Un énorme merci aux étudiants de l'Ecole Polytechnique et du Département de Physique de l'Université d'Abomey Calavi pour leur disponibilité et le sérieux dont ils ont fait preuve durant toutes nos campagnes de mesure.

Sans ce sérieux, aucune interprétation fiable de nos résultats n'aurait été faite. Merci aux Professeurs Philippe ANDRE, Jean-Marie HAUGLUSTAINE, le Recteur Norbert Cossi AWANOU et KOUCHADE Clément pour avoir accepté diriger ces travaux et analyser nos résultats.

RÉFÉRENCES

- American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). 1992). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ASHRAE Standard 55-1992)
- Anh Tuan Nguyen, Manoj Kumar Singh, Sigrid Reiter. 2012. An adaptive thermal comfort model for humid South-East Asia. *Building and Environment* 56 291-300
- Arens, E., Xu, T., Miura, K. Hui, Z., Fountain, M., & Bauman, F.S. (1998). A study of occupant cooling by personally controlled air movement. *Energy and Buildings*, 27, 45-59
- Auliciems, A. and de Dear, R. 1986. Air conditioning in Australia : Human thermal factors. *Architectural Science Review*, 29, 67
- Auliciems, A. 1977. Thermal comfort criteria for indoor design temperatures in the Australian winter. *Architectural Science Review*, 29, 67-75
- Auliciems, A. 1998. Towards a psycho-physiological model of thermal perception. *International Journal of Biometeorology*, 25, 109-122
- Aurélien OLISSAN. Jean-Marie H., Clément K., Cossi Norbert A. Philippe A. Examination of FANGER's PMV model in indoor-Air Conditioned Environment of the coastal strip of BENIN. *International Journal of Innovation Sciences and Research* vol, 5, No, 02, pp. 617 – 629, February 2016
- Baille, A.P., Griffiths, I.D. and Huber, J. W. 1987. Thermal Comfort Assessment: A new Approach to comfort Criteria in Buildings. 5Report to ETSU S- 1177). Guildford, UK: University of Surrey
- Baker, N. and Standeven, M. 1996. Thermal comfort for free – running buildings. *Energy and Buildings*, 23(3), 175-182
- Bellayat, E.K, Nicol, J.F. and Wilson, M. 2002. Thermal comfort in Algeria. Preliminary Results of field studies. Proc. Epic 2002 Conference Lyon
- Boudan, C. and Ghrab N. 2001. Thermal comfort in Tunisia, results of a one year survey. Proc. Conf. Moving thermal comfort standards into the 21st century, Windsor, UK, 197-206
- Brager, G.S., Fountain, M.E., Benton, C.C., Arens, E. A. and Bauman, F.S. 1994. A comparison of methods for assessing thermal sensation and acceptability in the field. In N. A. Oseland & M.A. Humphreys (Eds), *Thermal Comfort: Past, Present and Future* (pp. 17-39), Garston UK: Building Research Establishment
- Busch, J.F. 1992. A tale of two populations: Thermal comfort in air – conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. *Energy and Buildings*, 18, 235-249
- Cena and de Dear, R. 2001 Thermal comfort and behavioural strategies in office buildings located in a hot-arid climate. *Journal of thermal Biology*, 26(4), 409-414.
- Cena, K.M., Spotila, J. R. and Ryan, E. B. 1998. Effect of behavioural strategies and activity on thermal comfort of the elderly. *ASHRAE Transactions*, 94(1), 83-103.
- Cossi Norbert AWANOU, Etude de réfrigération passive par toiture diode. Thèse en vue de l'obtention du doctorat du troisième cycle
- Croome, D.J., Gan, G. and Awbi, H.B. 1992. Air flow and thermal comfort in naturally ventilated offices. *Roomvent'92-Aalborg, Denmark* (pp. 401-417)
- De Dear, R. J. and Auliciems, A. 1985. Validation of predicted mean vote model of thermal comfort in six Australian field studies. *ASHRAE Transactions*, 91(2), 452-468
- De Dear, R.J., Leow, K.G. and Ameen, A. 1991. Thermal comfort in humid tropics part 1 : Climate chamber experiments on temperature preferences in Singapore. *ASHRAE Transactions*, 97 (2).
- Doherty, T.J. and Arens, E. 1988. Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models *ASHRAE Transactions*, 94(1), 1371-1385
- Doris Hooichyee Toe, Tetsu Kubota. Development of an Adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot humid climates using ASHRAE RP-884. *Frontier of Architectural Research*, volume 2, Issue 3 september 2013, pages 278-291
- Fanger, P.O. 1970 *Thermal comfort : analysis and application in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Fanger, P.O. and Toftum, J. Prediction of thermal sensation in non –air conditioned buildings in warm climates. *International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark*
- Fergus Nicol. An adaptive thermal comfort standard in the hot – humid tropics. Oxford Centre for Sustainable Development, Oxford Brookes University, Gypsy Lane, Oxford OX30BP, UK
- Feriadi H. 2002b. Natural ventilation via courtyard for tropical buildings. *Int Symposium Building Research and sustainability of the Build Environment in the tropics*, 14-16 october, Jakarta
- Feriadi, H, 2002a. Thermal Comfort for naturally ventilated houses in Indonesia- *symposium Building Research and sustainability of the Build Environment in the tropics*, 14-16 october, Jakarta
- Flagothier, C., Piérard- Franchimont, C., Piérard, G.E. 2005. La peau et ses nuances ethniques. *Revue Med Liege* 60: Sup, I: 53-56
- Givoni, B. 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines, *Energy Build*, 18(1) (1992) 11-23

- GRET; Groupe de Recherche et d'Echange Technologique. Etude Préliminaire d'adaptation au changement climatique en Afrique (Contribution au projet Négociation Climat pour tout l'Afrique Réussie (NECTAR). Juillet 2009
- Hien, W.N. and TANAMAS, J. 2002. The effect of wind on thermal comfort in the tropical environment. In Proceedings of the International
- Hoppe, P. 2002. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort energy and Buildings. Vol. 34, pp.53-62.
- Humphreys, M.A. 1994. Field studies and climate chamber experiments in thermal comfort research. IN: Humphreys NA, editor. Thermal comfort: past, present and future. UK: BRE.
- Kemajou, A., Tseuyep, A. et N.E. Egbewatt. 2012. Le confort thermique en climat tropical humide vers un réaménagement des normes ergonomiques. Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3(2012) 427-438
- Mallick, F.H. 1994. Thermal comfort in tropical climates. An Investigation of comfort criteria in Bangladesch subjects. Proc conf. PLEA. 1994, Israel
- Ogbona, A.C., Harris Dj. 2008. Thermal comfort in Sub-Saharan Africa: field study report in Jos-Nigeria Appl Energy, 85:1-11
- OLANIKPEKUN Emmanuel Abiodun. 2014. Examination of thermal comfort in a naturally ventilated hostel using PMV-PPD model and field survey. American Journal of Engineering Research (AJER) e-ISSN:2320-0847 p-ISSN: 2320-093 Volume-3, Issue – 8, pp-63-78
- Olesen, B.W. and Pearsons, K.C. Introduction to thermal standards and to the proposed new version of En ISO 7730
- Olesen, B.W. 1982. Technical Review ISSN 0007-2621 No.2 -1982
- Oluwafemi K. Akande and Michael A. Adebamowo. 2010. Indoor thermal comfort for residential buildings in hot – dry climate of NIGERIA. Proceedings of Conference: Adapting to change: New thinking on comfort. Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April. London: Network for Comfort and Energy Use in buildings, <http://nceub.org.uk>
- Rajasekar, E. and Ramachandriah. A. 2010. Adaptive comfort and thermal expectations- a subjective evaluation in hot humid climate. Proceeding of conference: Adaptive to change; New Thinking on comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK 9-11 April 2010. London
- Santamouris. M. 2006. Adaptive thermal comfort and ventilation. Air infiltration and ventilation centre. Ventilation Information. Paper n° 12 June.
- Taketsugu Tadokoro, Nobuhiko Kobayashi, Barbara Z. Zmudzka, Vincent J. Hearing. U-V- Induced DNA damage and melanin content in human skin differing in racial/ ethnic origin. The FASEB Journal express article 10.1096/fje. Published online April 8, 2003
- Thomson. M. L. 1954. A comparison between the number and distribution of functioning eccrine sweat glands in Europeans and Africans. *J. Physiol* (1954) 123, 225-233
- Wagner Augusto Andreasi and Roberto Lamberts, 2005. Thermal comfort in buildings located in regions of hot and humid climate of Brazil
