

RESEARCH ARTICLE

EXAMINATION OF FANGER'S PMV MODEL IN INDOOR - AIR CONDITIONED ENVIRONMENT OF THE COASTAL STRIP OF BENIN

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

¹Département 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

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

³Département des Sciences et Gestion de l'Environnement - Université de Liège, Équipe BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation), 185 Av. de Longwy, 6700, Arlon, Belgique

Accepted 14th January, 2016; Published Online 29th February 2016

ABSTRACT

Le confort thermique dans le bâtiment est souvent apprécié à partir des mesures internationales, basées sur la théorie des échanges thermiques du corps humain avec son environnement. A partir des mesures faites dans les bureaux du rectorat de l'Université d'Abomey Calavi au Bénin, nous avons apprécié les plages d'appartenance des mesures de température et d'humidité relative en ambiances climatisées dans cette région. Ensuite, il a été testé l'applicabilité du modèle PMV-PPD de FANGER en ambiance climatisée. La prise en considération des sensations réelles thermiques actuelles des occupants des ambiances considérées, nous a permis de montrer que l'utilisation du modèle de FANGER en ambiances climatisées sans une adaptation aux conditions climatiques et thermo physiologiques des populations de cette région, peut introduire une erreur d'appréciation du confort thermique des bâtiments. Cette erreur d'appréciation semblerait être liée aux nuances ethniques de la peau noire et par conséquent stipule que les béninois de la bande côtière du Bénin seraient moins sensibles à la température qu'à l'humidité relative, donc accepteraient des températures élevées que les Européens. Mettant en exergue la complémentarité de la méthode rationnelle de FANGER et l'adaptatif, l'approche systémique du confort thermique dans cette région, confirmerait l'hypothèse selon laquelle, la méthode rationnelle de FANGER serait suffisante pour décrire le confort thermique en ambiance climatisée dans la bande côtière du Bénin, à la seule condition qu'elle soit entre temps adaptée aux réalités climatiques et thermo physiologiques des personnes vivant dans cette région.

KEY WORDS: Pmv, Ambiances Climatisées, Confort Thermique, Climat Tropical Et Humide.

INTRODUCTION

Le confort thermique pour un individu caractérise son état de bien être dans certaines conditions d'environnement thermique. Cette satisfaction se traduit par l'impossibilité pour ce sujet de préciser s'il préfère un environnement plus froid ou plus chaud : c'est la neutralité thermique. Dans les bâtiments, la sensation de confort ou d'inconfort semble, a priori, être liée à la température de l'air ambiant. Néanmoins, ce paramètre ne constitue pas à lui seul le facteur d'appréciation du confort; en fait c'est l'effet conjoint du rayonnement solaire, de la température ambiante, de l'humidité relative, de l'agitation de l'air, de l'activité et de l'habillement qui détermine le confort thermique de l'homme dans son environnement proche. Il est souvent apprécié à partir des normes internationales basées sur la théorie des échanges thermiques du corps humain avec son environnement. Cette théorie a été abondamment étudiée par FANGER (1970), à partir des expériences conduites dans des ambiances bien contrôlées en température et en humidité relative. Ces tests qui ont tenu compte de l'âge, du sexe et du comportement humain des sujets permettent de fournir une meilleure appréciation du confort thermique dans le bâtiment.

Ils ont donné lieu à la norme ISO 7730 qui recommande d'avoir recours à l'indice de vote moyen prévisible PMV et au pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD, pour une appréciation objective des conditions de travail dans un environnement donné, en prenant en compte aussi bien des paramètres microclimatiques ambiants, que la dépense énergétique relative à l'activité professionnelle ainsi que la typologie d'habillement utilisée. La majorité des travaux mettant en évidence cette approche du confort thermique concerne le plus souvent les pays du Nord et certains pays de l'Asie. L'Afrique subsaharienne reste la partie du globe terrestre où, très peu d'investigations ont été faites dans ce domaine. Dreyfus (1960) fait partie des pionniers de l'étude du confort thermique en Afrique. Il a fait l'heureux constat que les architectures traditionnelles de l'Afrique occidentale permettaient un meilleur confort aux occupants. Nguessan (1990) quant à lui, utilise les paramètres du confort thermique pour faire l'analyse thermique des bâtiments en climat chaud. Jeannot et Djiako (1993) vont dans le même sens, mais proposent les types d'habitats et les matériaux de construction les mieux adaptés à chaque climat tropical.

*Corresponding author: Aurélien OLISSAN

Département 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

Le constat général est que ces études sont très théoriques et ne prennent pas en compte les sensations bien que subjectives, réellement exprimées par les occupants des bâtiments. Ceux qui ont eu le mérite de prendre en compte les sensations subjectives ont préféré utiliser soit l'approche adaptatif ou statistique en évaluant soit le pourcentage d'insatisfaits dans une ambiance donnée. Parmi ceux-ci nous pouvons citer Appah, DJ and Koranteng, 2012 au Ghana ; Mike ADEBAMOWO and Olumide OLUSANYA, 2012 au Nigéria (Oluwafemi *et al.*, 2010) ; et Noel DJONGYANG; 2010 au Cameroun (Noel Djongyang, ?). La plupart des études ailleurs, sur le confort utilisant cette approche, 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 (Baker and Standeven 1996) ; Hien et Tanamas, 2002 (Hien and Tanamas, 2002); Bellayat et autres, 2002 (Bellayat *et al.*, 2002) ; Mallick, 1994 (Mallick, 1994) ; Auliciems, 1977 (Auliciems, 1977) ; Auliciems & de Dear, 1986 (Auliciems and de Dear, 1986) ; Baillie, Griffiths & Huber, 1987 (Baillie *et al.*, 1987) ; Bragger *et al.*, 1994 (Brager *et al.*, 1994) ; Bussch, 1992 (Busch, 1992) ; Cena & de Dear, 2001 (Cena and de Dear, 2001) ; Cena, Spotila & Ryan 1988 (Cena *et al.*, 1998) ; Croome, Gan & Abwi, 1992 (Croome *et al.*, 1992) ; de Dear & Auliciems, 1985 (De Dear and Auliciems, 1985) ; de Dear, Leow & Ameen, 1991 (De Dear *et al.*, 1991) . Particulièrement, Doherty et Arens (1988) (Doherty and 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 (1994) (Humphreys, 1994) a 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 et Nicol (Fergus Nicol, ?) ont 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 climatisés 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. 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, ?) (Chaffa Gédéon, 2004).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

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. Actuellement en conurbation avec les villes comme Cotonou et Ouidah, Abomey-Calavi est à 20m d'altitude du niveau de la mer sur la côte béninoise et 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. Au niveau d'Abomey-calavi, 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. Au mois de janvier, la température moyenne est de 26.1°C (26). La valeur moyenne minimale des précipitations observée au mois de janvier est de 12.2mm (Chaffa Gédéon, 2004). 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 ces villes, le plus bas taux d'humidité de l'air est observé au mois de janvier de chaque année.

Expérimentation

Deux séries d'expérimentations ont été réalisées:

Pour la première série, les mesures de température, d'humidité relative et de température rayonnante des parois sont effectuées au mois de janvier, dans des bureaux d'une personne que nous considérons comme étant des ambiances individuelles. Ces bureaux sont tous climatisés. Ces mesures nous ont permis de préciser les plages de mesure de ces paramètres dans le sud côtier du Bénin en ambiances climatisées. Ces ambiances étant individuelles, il ne nous semble pas judicieux de les utiliser pour définir les sensations thermiques moyennes correspondantes donc au PMV moyen. Pour la dernière série, les expériences ont été réalisées au laboratoire d'Énergies renouvelables et laboratoire d'informatique de l'École Polytechnique d'Abomey Calavi et dans des salles de cours. Ce sont des ambiances collectives climatisées. Ces salles ont une capacité de 12 à 25 étudiants. Les occupants des ambiances ont été soumis à un questionnaire et ont renseigné les informations personnelles concernant l'activité et la vêtue. Leur sensation thermique a été évaluée à l'aide de l'échelle ASHRAE (Figure 1).

Au moment des enquêtes, les mesures ont été ponctuellement prises pendant 20 mn à l'aide d'un capteur TESTO mesurant à la fois l'humidité relative, la vitesse de l'air ambiant, la température de l'air ambiant et celle moyenne radiante. La valeur moyenne de chaque paramètre mesuré a été calculée. Les valeurs de l'isolement vestimentaire ont été déterminées pour chaque sujet à partir de la liste des pièces vestimentaires selon les valeurs indiquées dans la norme ISO 9920 (AFNOR, 1995). La résistance thermique de l'habillement a été déterminée en utilisant la formule de Olesen (1985) : $I_{cl} = \sum I_{clu,i}$ où I_{cl} est la résistance de l'ensemble de l'habillement et $I_{clu,i}$ est la résistance de chaque composant i de l'habillement. Quant aux valeurs du métabolisme, elles ont été calculées à partir de la norme ISO 8996 (AFNOR, 1994).

Les participants aux enquêtes exercent des activités de bureau et sont assis sur des chaises durant les enquêtes. Ce qui correspond à une valeur uniforme de 1.2 met soit $70W/m^2$ d'activité métabolique sur la table de classification des activités métaboliques de la norme ISO 7730. Pour une activité métabolique uniforme de bureau de valeur $70W/m^2$, il n'y a pas de travail produit. Au total 12 expériences ont été réalisées en ambiances climatisées avec un total de 450 étudiants. Les mesures de températures, d'humidité relative et de vitesse de l'air ambiant ont été faites. L'appareil de mesure utilisé a une précision de mesure inférieure à 3%.

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 and Pearsons, ?). Il permet de déterminer les valeurs théoriques des indices PMV et PPD. Il s'agit d'un ensemble d'équations qui prend en compte aussi bien le métabolisme physiologique des occupants d'un bâtiment que des paramètres microclimatiques de l'ambiance (température, humidité et températures rayonnantes des parois de l'ambiance). On utilisera alors pour le modèle, les valeurs moyennes des paramètres mesurés, et celles des résistances thermiques de l'habillement déterminée pour chaque participant aux enquêtes. La pression de vapeur d'eau sera calculée à partir de la valeur moyenne de l'humidité relative mesurée en fonction de la pression de vapeur d'eau saturante qui est ici une donnée empirique, fonction de la valeur moyenne de la température mesurée. En considérant l'absence de travail pour l'activité métabolique des occupants de chaque ambiance considérée, le modèle s'exprime par la séquence d'équations suivante :

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

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

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

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2I_{cl} \text{ si } I_{cl} \leq 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl} \text{ si } I_{cl} > 0.5clo \end{cases} \quad (4)$$

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

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

Ambiances individuelles

Le Tableau 1 présente les valeurs des différents paramètres de température et d'humidité relative mesurées pour chaque bureau. Les températures varient de 22°C à 31.83°C. Si l'on doit faire une comparaison aux températures admises en ambiance intérieure en climats tempérés, les températures allant de 26°C à 31°C sont considérées comme élevées. Aux bureaux B4 et B10, les portes et fenêtres sont normalement ouvertes.

Tableau 1. Valeur des paramètres mesurés pour chaque bureau

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
RH%	57.16	50.017	40.00	63.94	66.57	62.353	59.77	68.51	51.21	70.47	67.57
t_a °C	25.50	23.50	22	31.83	27.65	26.48	21.79	27.96	22.44	29.25	27.35

L'ambiance intérieure est alors influencée par le climat extérieur. C'est pour cela que les températures sont ici élevées et ont les valeurs respectives de 31.83°C et 29.25°C. Nous allons les considérer comme telles, car ce sont les réalités souvent rencontrées dans les administrations de cette région et, celles-ci pourraient influencer ou caractériser dans une certaine mesure la sensation thermique des bâtiments dans le sud côtier du Bénin. Quant à l'humidité relative, elle est comprise entre 40% et 70.47%. A partir de 60%, le taux d'humidité est considéré comme trop élevé pour les pays tempérés. Evidemment, le taux d'humidité admis par la norme ASHRAE 55-1992 serait de 60% (Harim Djamila *et al.*, 2014). Au-delà de cette limite, la moisissure pourrait commencer à se développer.

Ambiances collectives

Mesures

Les mesures dans ces ambiances ont été dépouillées et traitées. Le traitement des données sera illustré à partir des 5 premières expériences en ambiances climatisées. Les Figures 2, 3, 4, 5 et 6 donnent les sensations thermiques des personnes ayant participé aux enquêtes à partir de l'échelle de la Figure 1.

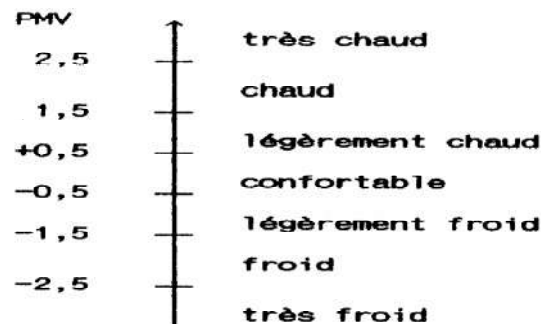
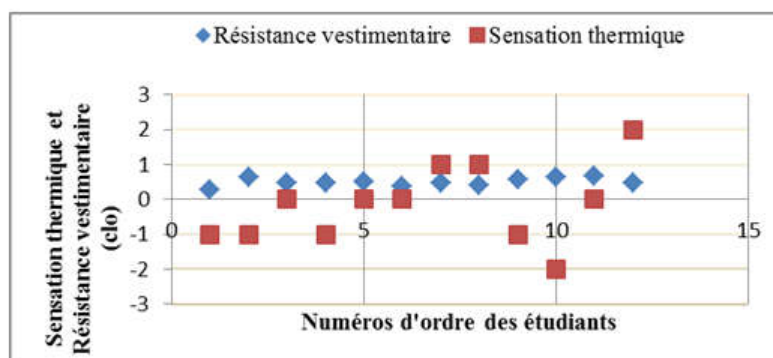


Figure 1. Echelle de PMV

Figure 2. Expérience 1 ($t_a=31.46^\circ\text{C}$; RH=62% ; $v=0.10\text{m/s}$ et $t_r=30^\circ\text{C}$)

Pour cette expérience, 1 personne a exprimé une sensation "chaud" (2), 2 personnes une sensation "légèrement chaud" (1), 4 personnes une sensation "confortable" (0), 4 personnes, une sensation "légèrement froid" (-1) et 1 personne, une sensation "froid". Ici durant l'expérience 2 (Figure 3), 1 personne a exprimé une sensation "chaud" (2), 10 personnes, une sensation "légèrement froid" (-1), 3 personnes, une sensation "confortable" (0) et 3 personnes, une sensation "froid" (-2). Dans l'expérience 3 (Figure 4), 1 personne a exprimé la sensation "légèrement chaud" (1), 7 personnes ont exprimé la sensation "légèrement froid" (-1), 8 personnes, la sensation "confortable" (0) et 2 personnes, la sensation "froid" (-2). Ici en expérience 4 (Figure 5), 3 personnes ont exprimé une sensation "légèrement chaud" (1); 7 personnes, une sensation "confortable" (0); 14 personnes, une sensation "légèrement froid" (-1) et 2 personnes, une sensation "froid". En expérience 5 (Figure 6), nous avons 11 personnes, qui ont exprimé une sensation de "confortable" (0), 11 personnes, une sensation "légèrement froid" (-1), 2 personnes "froid" (-2) et 1 personne à très froid (-3).

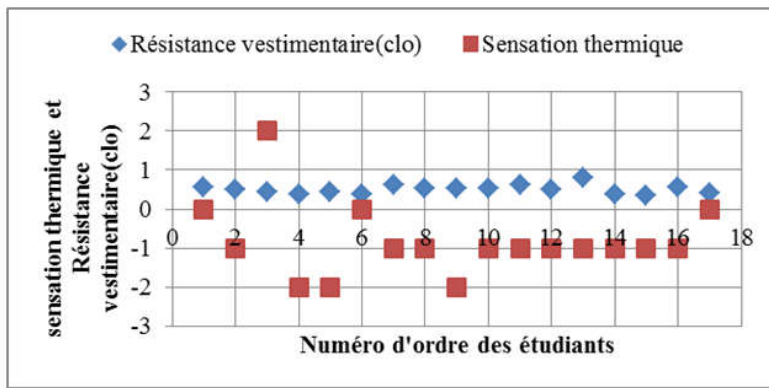


Figure 3. Expérience 2 ($t_a=26.15^\circ\text{C}$, $\text{RH}=60.34\%$; $v=0.02\text{m/s}$ et $t_r=26.04^\circ\text{C}$)

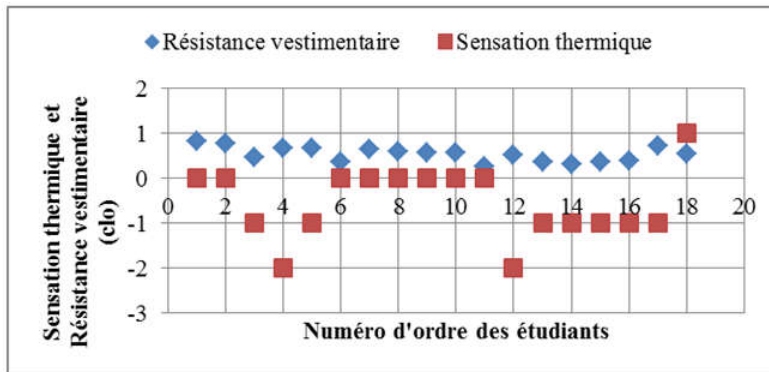


Figure 4. Expérience 3 ($t_a=30.01$, $\text{RH}=60.38$ $v=0.09\text{m/s}$ et $t_r=30.01^\circ\text{C}$)

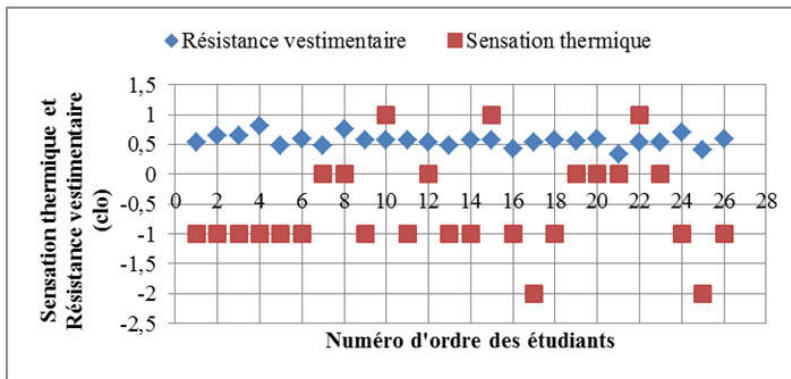


Figure 5. Expérience 4 ($t_a=27.13^\circ\text{C}$; $\text{RH}=65.33\%$; $v= 0.03\text{m/s}$ et $t_r= 27^\circ\text{C}$)

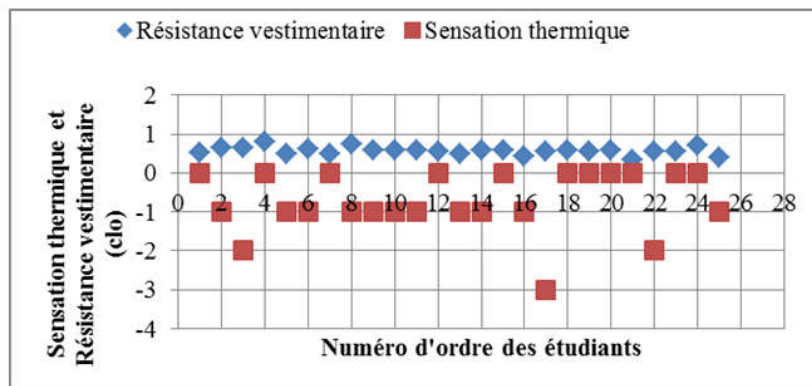


Figure 6. Expérience 5 ($t_a= 26.72^\circ\text{C}$; $\text{RH}=68.9\%$ $v=0.11\text{m/s}$ et $t_r=26.8^\circ\text{C}$)

La dispersion de la distribution des votes de sensation thermique au niveau chacune des expériences a été étudiée. Les observations dont la fréquence est très inférieure à la moyenne par rapport au nombre total de sensations observées durant l'expérience, ont été considérées comme aberrantes.

Exemple: L'expérience 1 nous a permis d'observer $p=5$ sensations thermiques différentes. La population ayant participé à l'enquête dans cette expérimentation étant de $N=12$ personnes, la fréquence moyenne f des observations par sensation est:

$$f = \frac{12}{5} = 2,4 \text{ Personnes, donc ici la sensation "chaud" est aberrante, car n'ayant enregistré qu'1 personne.}$$

Le Tableau 2 donne la répartition des étudiants selon les sensations recueillies au niveau de chaque expérience.

Tableau 2. Répartition des étudiants selon les sensations recueillies

Expériences	Confortable	Légèrement froid	Froid	Très froid	Légèrement chaud	Chaud	Moyenne
Expérience 1	4	4	1	0	2	1	2,4
Expérience 2	3	10	3	0	0	1	4,25
Expérience 3	8	7	2	0	1	0	4,5
Expérience 4	7	14	2	0	3	0	6,5
Expérience 5	11	11	2	1	0	0	6,25

Le Tableau 3 présente les numéros des étudiants dont les observations paraissent aberrantes par rapport à la moyenne.

Les observations aberrantes des différentes ambiances collectives sont retirées de chacune de nos expériences. On calcule le PMV moyen de chaque ambiance ou expérience. Le Tableau suivant présente les résultats obtenus:

Tableau 3. Présentation des observations aberrantes

Ambiances	t_a (°C)	RH(%)	Numéros des sensations aberrantes	Nature de l'ambiance
Expérience 1	31.46	62	10, 12	Climatisée
Expérience 2	26.15	60.34	3	Climatisée
Expérience 3	30.01	60.38	4, 12, 18	Climatisée
Expérience 4	27.13	65.33	10, 15, 17, 22, 25	Climatisée
Expérience 5	26.72	68.9	3, 17, 22	Climatisée

Les températures ambiantes allant jusqu'à 31.46°C (voir Tableau 3), nous sommes ici en dehors du domaine d'applicabilité de FANGER en terme de la température ambiante (ISO, 1994).

Calcul du PMV et Comparaison avec celui mesuré sur le terrain

En utilisant le système d'équations 1, 2, 3 et 4, on calcule les valeurs du PMV dans chacune des ambiances. Les résultats sont reportés dans le Tableau 4

Tableau 4. Paramètres mesurés et calculs

Ambiances	t_a (°C)	RH(%)	I(clo)	PMV mesuré	PMV calculé	t_r	V	PMV
Ambiance 1	26.15	60.34	0.52	-1	0.56	26.04	0.02	1.56
Ambiance 2	31.46	62.00	0.48	-0.20	1.95	30	0.10	2.15
Ambiance 3	30.01	60.38	0.53	-0.46	1.74	30.01	0.09	2.20
Ambiance 4	27.13	65.33	0.57	-0.66	0.98	27	0.03	1.64
Ambiance 5	26.72	68.90	0.56	-0.50	0.82	26.8	0.11	1.32

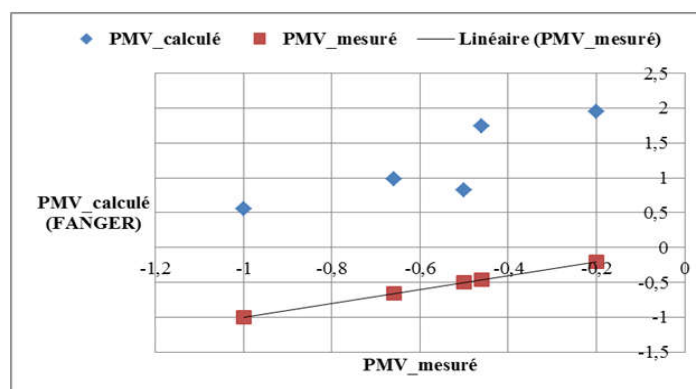


Figure 7. Comparaison PMV mesurés (sensation thermiques actuelles) et PMV calculés (prédits)

Une représentation du PMV calculé (PMV_calculé) par FANGER en fonction du PMV mesuré dans les ambiances (PMV_mesuré), nous a donné la Figure 7. En observant le graphique de la Figure (7), on constate que les points obtenus sont placés au - dessus de la première bissectrice du plan qui matérialise les valeurs du PMV mesuré. On remarque aussi que le PMV calculé par le modèle de FANGER, est positif, tandis que le PMV mesuré dans les ambiances climatisées est ici négatif. Evidemment en ambiances climatisées, il est rare que les Africains aient des inconforts de chaleur. Soit l’ambiance est légèrement froide, ou confortable. C’est d’ailleurs ce qui se note à travers le Tableau (4). Par conséquent, il existe un biais entre les PMV calculés et ceux mesurés sur le terrain, c’est-à-dire les sensations thermiques actuelles. Ce biais que nous notons ΔPMV a été calculée (voir Tableau 4)

Modèle de FANGER adapté à la région côtière du Bénin

La supériorité du PMV calculé par le modèle de FANGER, par rapport au PMV_mesuré nous laisse penser à l’adaptation du modèle de FANGER à cette région du Bénin, par un coefficient correctif. Par conséquent dans les conditions climatiques de la région côtière du Bénin et pour les habitants de cette région, on pourra écrire que:

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

PMV_{new} désignant le PMV de FANGER adapté à la région du Sud côtier du Bénin en ambiance climatisée.

Il faut constater que ce facteur correctif n’est pas constant; mais varie avec le PMV mesuré, autrement dit avec la température et l’humidité relative. Pour le déterminer, nous avons réalisé une régression multiple. Le Tableau 5 présente les spécifications de la régression.

Tableau 5. Synthèse de la régression

R=0.99 ; R²=0.99 ; F(2,4)=798.24 ; p<0.00008				
	B	Ecart -type	t(3)	p
ta(°C)	0.13	0.0151	8.9750	0.0029
RH	-0.032	0.006	-4.8250	0.016966

Le facteur correctif est donné alors par la relation suivante:

$$\Delta PMV = PMV_calculé - PMV_mesuré \tag{7}$$

$$\Delta PMV = 0.13ta - 0.032RH \tag{8}$$

L’expression du PMV adapté à la bande côtière du Bénin, soit le PMV_{new} sera définie:

$$\begin{aligned}
 PMV_{new} = & (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028)[M - 3.0510^{-3}(5733 - 6.99M - p_a) \\
 & - 0.42(M - 58.15) - 1.710^{-5}M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) \\
 & - 3.9610^{-8} f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - (0.13ta - 0.0326RH)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Tableau 6. Comparaison entre PMV_{new} et $PMV_mesuré$

Ambiances	t_a (°C)	RH(%)	PMV_mesuré	PMV calculé	ΔPMV	PMV_{new}	ε_{rel} %
Ambiance 1	26.15	60.34	-1	0.56	1.56	-0.89	1.8
Ambiance 2	31.46	62.00	-0.20	1.95	2.15	-0.15	0.8
Ambiance 3	30.01	60.38	-0.46	1.74	2.20	-0.22	4
Ambiance 4	27.13	65.33	-0.66	0.98	1.64	-0.45	3.5
Ambiance 5	26.72	68.90	-0.50	0.82	1.32	-0.44	1

$$\varepsilon_{rel} (\%) = \frac{|PMV_{new} - PMV_mesuré|}{6} \tag{10}$$

Cependant, nous allons représenter la zone de confort (voir Figure 8 en tenant compte des spécificités du Bénin et pour une vitesse d'air calme de 0.02m/s) dans le diagramme psychrométrique. On remarque que la zone de confort définie est incluse dans celle définie par GIVONI (Givoni, 1992) pour les climats chauds et humides. Pour une même vitesse d'air ambiant, la zone de confort est plus élargie pour une résistance vestimentaire plus élevée.

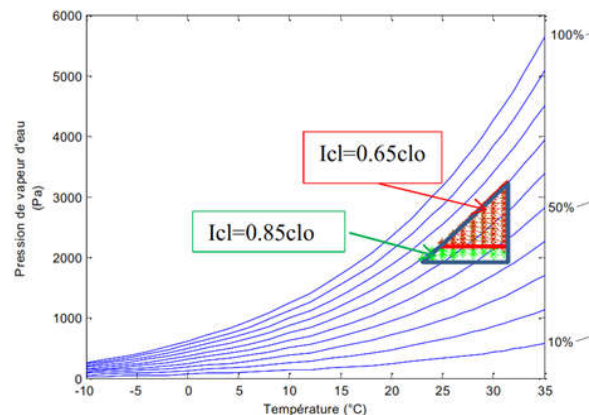


Figure 8. Zone de confort ($v=0.02\text{m/s}$)

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 :

$$PMV_{new} = PMV - \Delta PMV \quad (11)$$

Les sensibilités seront ici exprimées par les dérivées partielles de l'équation (11) respectivement par rapport à la température et l'humidité relative. On pourra écrire alors:

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial ta} = \frac{\partial PMV}{\partial ta} - 0.13 \quad (12)$$

$$\frac{\partial PMV_{new}}{\partial RH} = \frac{\partial PMV}{\partial RH} + 0.032 \quad (13)$$

Aux regards des relations (12) et (13), 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, 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, par rapport à celle des Européens. Cette diminution de la sensation à la température chez les Africains de la bande côtière du Bénin, entraînerait une protection de leur peau ; 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. L'accroissement de la sensation à l'humidité relative de l'air, ne pourrait-il pas être expliqué ici par une perte insensible d'eau transépidermique plus importante chez les Africains de la bande côtière du Bénin par rapport aux personnes des régions tempérées (Flagothier *et al.*, 2005) (Thomson *et al.*, 1954)? Dans ce même ordre d'idée, la diminution de 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 la peau, des infrarouges plus élevé chez les Africains de la bande côtière du Bénin que chez les Européens? Quelle serait cette substance qui confère à la peau noire, cette nuance ethnique par rapport à la peau blanche? Evidemment, les rayonnements infrarouges qui atteignent la peau sont partiellement réfléchis et partiellement absorbés. L'ampleur de cette réflexion pourrait dépendre de la pigmentation, de l'irrigation sanguine de la peau et de sa structure mécanique.

Cet effet protecteur dont bénéficierait la peau des personnes de la bande côtière du Bénin, ne proviendrait – il pas de la mélanine comme c'est le cas avec les ultra - violets du soleil malgré quelques controverses ici et là sur cette hypothèse (Taketsugu Tadokoro *et al.*, 2009) . Au regard de tout ce qui est ci-dessus dit, la sensation de fraîcheur ou de chaleur chez l'Africain du Sud côtier du Bénin, ne s'expliquerait-elle pas par la capacité de l'air ambiant à pouvoir évaporer les pertes d'eau transépidermique insensible, pertes d'eau qui seraient aussi fonction de la température et plus abondante chez l'Africain de la bande côtière du Bénin, que chez l'Européen? Si oui, on dira alors que, plus la température serait élevée, plus abondante serait cette perte d'eau. De cette façon, moins l'air ambiant serait chargé en eau, plus il refroidirait la peau en évaporant facilement cette perte d'eau. N'est – ce pas ce que l'on constate quand on compare les ambiances 1 et 2 (Tableau 3) qui ont à peu près les mêmes humidités relatives, mais des températures très différentes l'une de l'autre (température en ambiance 2 supérieure à celle en ambiance 1) ? Si oui, c'est que les occupants de l'ambiance 2 auraient une perte d'eau plus abondante que ceux de l'ambiance 1.

Par conséquent, les occupants de l'ambiance 1 ressentiraient plus de fraîcheur que ceux de l'ambiance 2. De la même manière, les occupants de l'ambiance 3 auraient plus froid que ceux de l'ambiance 2, tandis que ceux de l'ambiance 5 auraient moins froid que ceux de l'ambiance 4. Ceci étant, le confort thermique des bâtiments dans la bande côtière du Bénin ne serait – il pas ici dépendant plus de l'humidité de l'air que de la température ? Si oui, on dira que chez l'Africain de la bande côtière du Bénin, la température ne participe pas directement à la sensation de la chaleur, mais fait accroître la perte transépidermique insensible d'eau dont l'évaporation va dépendre des caractéristiques hygrométriques 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, sur la perte insensible d'eau transépidermique des personnes habitant la bande côtière du Bénin.

Prise en compte du caractère adaptatif du confort thermique en ambiance climatisée dans la bande côtière du Bénin

En effet le modèle du confort de FANGER qui fait appel à l'équilibre thermique du corps humain dépend des paramètres à savoir la température opérative, la vitesse de l'air ambiant, l'activité physiologique, la résistance vestimentaire, l'humidité relative et la température rayonnante des parois et s'appuie sur l'état stationnaire du comportement humain avec son environnement. L'adaptatif quant à lui est une approche qui prend en compte l'état dynamique de ce comportement humain et son environnement et, consiste à faire réagir dans une situation d'inconfort, le corps humain pour restaurer d'une certaine façon le confort (Humphreys & Nicols, 1998).

Evidemment, les interactions entre l'homme et son environnement ne se limitent pas qu'aux échanges thermiques et /ou au transfert de masse. Dans une ambiance donnée, l'homme a la possibilité d'analyser sa situation actuelle et peut décider d'entreprendre des actions lorsqu'il constate un écart par rapport à ses attentes et ses aspirations. Ces actions pour la plupart visent à l'adapter à l'ambiance dans laquelle il se trouve ou à adapter l'ambiance à sa convenance. Ce sont ces types d'action conscientes ou non qui feront du confort thermique du bâtiment décrit par des méthodes analytiques tels que le modèle de FANGER, se révéler inadéquats dans certaines situations d'ambiance.

La sensation thermique de l'homme dans un environnement donné est complexe. Elle peut être représentée comme une boîte noire à l'intérieur de laquelle s'opèrent plusieurs phénomènes d'ordre physique. En empruntant à l'automatique la démarche de représentation système, le comportement de cette boîte sera parfaitement défini dès lors que l'on pourra construire une relation mathématique existant entre une entrée qui dans le cas présent serait représentée par un stimulus. Celui - ci agirait sur le système pour créer une réaction qui sera représentée par la sensation thermique de l'individu en sortie. Ce stimuli, pourrait être représenté par la somme des excitations résultant des paramètres environnementaux à l'intérieur du bâtiment dans lequel se trouve placé l'individu. De ce fait le calcul du PMV_{new} pourra satisfaire à la représentation fonctionnelle de la Figure (9).

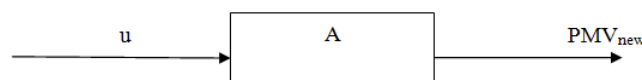


Figure 9. Représentation fonctionnelle sous forme de schéma-bloc de la sensation thermique d'un individu dans une ambiance donnée

Le modèle mathématique A de notre système est représenté par le bilan énergétique du corps humain avec son environnement où les variables physiques dont dépend le PMV_{new} seront considérées comme les paramètres du système. En empruntant toujours à l'automatique les principes de calcul de fonction de transfert ou le calcul dans l'espace fréquentiel du système, on pourra écrire la relation suivante:

$$\frac{PMV_{new}}{u} = A \quad (14)$$

Comme l'a remarqué Humphreys, pionnier de l'approche adaptatif, l'homme utilise différentes stratégies qui réagissent avec le système (environnement – corps humain) pour atteindre le confort thermique lorsque celui-ci est rompu. C'est l'adaptation. Cette adaptation est de trois différents ordres : psychologique, physiologique et comportemental. Elles agissent en retour sur le système et permettent d'adapter l'individu à son environnement par une autorégulation. Ce faisant, l'approche adaptative peut être

considérée ici comme un effet feed-back (chaîne de retour négatif) qui agirait sur le système pour restaurer le confort. En supposant u_c , le stimuli de confort correspondant aux paramètres de confort recherché ou attendu dans l'environnement, les différentes formes d'adaptation de la chaîne de retour donneront naissance à un stimuli d'adaptation correspondant à un ensemble de paramètres d'ambiance, qui va être comparé au stimuli de confort u_c . De cette comparaison, naîtra une certaine différence de stimuli ou erreur de stimuli, qui excitera le corps pour obtenir la sensation thermique résultante ou un $PMV_{résultant}$. Ce phénomène se répétera jusqu'au moment où le stimuli de confort u_c sera obtenu, donc les conditions de confort attendus. Si l'on suppose que, la température est le paramètre dont dépend le confort par exemple, la chaîne de retour produira au bout du compte un stimuli identique au stimuli correspondant à la température de confort attendu. De ce fait, l'erreur ou la différence entre les stimulus sera nulle et par conséquent, il n'y aura aucune autre action sur le système. On aurait atteint de cette manière, la situation de confort recherchée. La sensation thermique résultante obtenue en combinant les deux approches du confort thermique, peut être représentée par le schéma fonctionnel de la Figure (10)

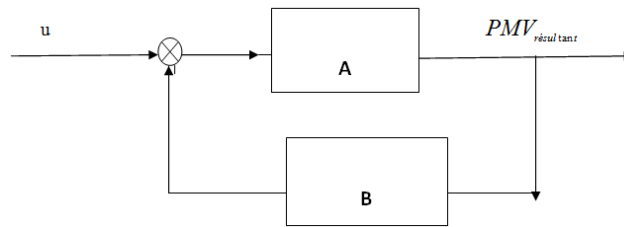


Figure 10. Mise en évidence de l'adaptation dans le schéma-bloc du système

En utilisant le principe des fonctions de transfert des systèmes en boucle fermée, on pourra écrire:

$$PMV_{résultant} = \frac{A}{1 + AB} u = \frac{PMV_{new}}{1 + AB} = \frac{PMV_{new}}{1 + \frac{B}{u} PMV_{new}} \tag{15}$$

Si nous appelons $\gamma = \frac{B}{u}$, on pourra dire que la sensation thermique résultant des deux approches à savoir, l'approche classique de FANGER et l'adaptatif pourra s'écrire de la façon suivante:

$$PMV_{résultant} = \frac{PMV_{new}}{1 + \gamma PMV_{new}} \tag{16}$$

En définitive, l'effet de l'adaptation sera de ce fait vu comme celui d'un régulateur proportionnel qui agirait pour adapter le corps humain à l'environnement dans lequel il se trouve. En analysant la relation (16), on constate que si $\gamma = 0$ alors il n'y a pas d'effet d'adaptation. On est alors en présence des conditions stationnaires de FANGER (ambiance bien contrôlée). Ce résultat avait été trouvé par Runming Yao, 2009 (Runming *et al.*, 2009), qui définit le $PMV_{résultant}$ comme étant le PMV adaptatif, mais fait une adaptation par rapport au PMV de FANGER pour les climats tempérés.

Runming Yao et autres ont déterminé les valeurs de γ qui auraient permis de ramener le système dans la situation de confort attendu. Ils ont obtenu les résultats suivants:

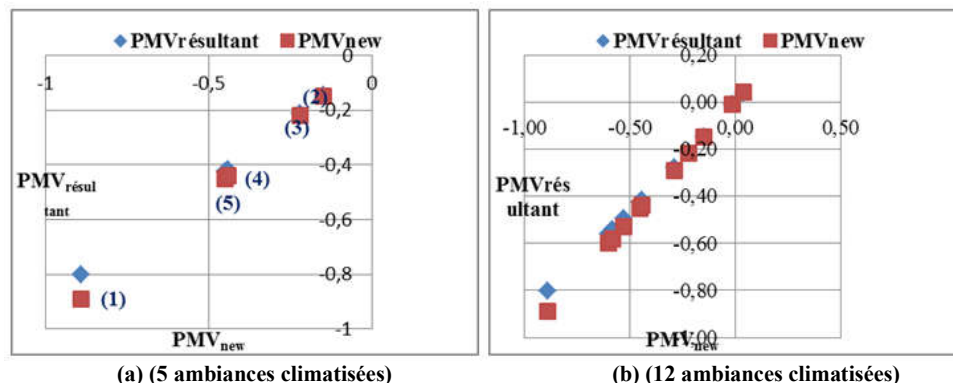


Figure 11. L'approche adaptative du confort thermique ambiances climatisées (a-b)

Dans les conditions de chaleur $\gamma = 0.293$ tandis que, dans les conditions de fraîcheur $\gamma = -0.125$. En utilisant ces valeurs, nous avons calculé en fonction des valeurs du PMV_{new} , c'est-à-dire le PMV de FANGER, adapté à la bande côtière du Bénin, le $PMV_{résultant}$ en tenant compte de l'effet d'adaptation de l'organisme humain. En observant la Figure (11a), on constate que l'effet adaptatif est vraiment remarquable en ambiance 1 où il fait plus froid. L'effet adaptatif ici apporte un peu plus de chaleur pour améliorer le confort. C'est pour cela que le $PMV_{résultant}$ est plus chaud que le PMV_{new} . Evidemment en ambiances 2 et 3, on constate que les deux sensations (PMV_{new} $PMV_{résultant}$) sont presque identiques. En ces points on dira qu'aucune adaptation n'est nécessaire. Par conséquent, ces ambiances sont dites confortables. En ambiances 4 et 5, on remarque aussi une légère adaptation qui améliore le confort. L'adaptation se remarque surtout dans les ambiances inconfortables (voir Figure 11 (a)).

Conclusion

En ambiance climatisée, dans la bande côtière du Bénin, les températures peuvent prendre des valeurs allant de 22°C à 31°C alors que l'humidité relative des valeurs entre 40% et 70.47%. Le modèle de FANGER surestimant la sensation thermique des Africains de la bande côtière du Bénin, il ne sera applicable dans cette région, que s'il est corrigé. Ainsi, la théorie de FANGER serait suffisante pour apprécier le confort thermique des bâtiments climatisés dans cette région. Les populations de cette région, accepteraient des températures élevées que les personnes des climats tempérés. Cette acceptation semble être liée aux propriétés mécaniques de la peau noire dont un pouvoir réfléchissant des infrarouges, plus élevée par rapport à celui des personnes du climat tempéré, protégerait les Africains de la bande côtière du Bénin des effets néfastes des ondes électromagnétiques (ondes infrarouges) provenant de la chaleur.

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) (Hoppe, 2002) 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 ? Pour répondre à ces questions, il serait intéressant d'étendre nos investigations aux ambiances naturellement ventilées de la bande côtière du Bénin

Remerciements

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 dirigé ces travaux et analysé nos résultats.

RÉFÉRENCES

- Alexis Kemadjou; Les systems de ventilation et de climatisation. Fiche technique du Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Energie-IEPF (Institut de la Francophonie. [www.ifdd francophone org/docs/prisme/climatisation](http://www.ifdd.francophone.org/docs/prisme/climatisation)).
- Appah, D.J. and Koranteng. A. 2012. Thermal comfort evaluation of a junior high school building in ACCRA, GHANA; Journal of construction project management and innovation vol.2 (2): 403-423.
- Auliciens, A. 1977. Thermal comfort criteria for indoor design temperatures in the Australian winter. Architectural Science Review, 29, 67-75
- Auliciens, A. and de Dear, R. 1986. Air conditioning in Australia: Human thermal factors. Architectural Science Review, 29, 67
- Baille, A.P., Griffiths, I.D. and Huber, J. W. 1987. Thermal Comfort Assessment: Anew Approach to comfort Criteria in Buildings. 5Report to ETSU S- 1177). Guildford, UK: University of Survey
- Baker, N., & 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
- 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.
- CHAFFA Gédéon. Contribution à la conception bioclimatique des habitations dans la région du Sud du Bénin. Thèse de doctorat, soutenue le 22-10-2004
- 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
- Dreyfus J: Confort dans l'habitat tropical
- Fanger, P.O. Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970
- Fergus Nicol. An adaptive thermal comfort standard in the hot – humid tropics. Oxford Centre for Sustainable Development, Oxford Brookes University, Gipsy Lane, Oxford OX30BP, UK
- 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) 11-23
- Harim Djamila, Chi-Ming Chu, Sivakumar Kumaresan. Effect of humidity on thermal comfort in the humid tropics. Journal of building Construction and planning research, 2014, 2,109-117
- 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;
- ISO, International Standard 7730, Moderate thermal environments: determination on PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, International Organisation for Standardisation, Geneva, 1994.
- Jannot et Y. and Djiako, T. Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropical. Département Energies pour le développement rural, Ecole Inter – états d'ingénieurs de l'équipement rural (E.I.E.R)
- Mallick, F.H. 1994. Thermal comfort in tropical climates. An Investigation of comfort criteria in Bangladesch subjects. Proc conf. PLEA. 1994, Israel
- N'gessan M'Gbra. 1990. Thèse pour l'obtention du grade de docteur. Centre expérimental de Recherches d'études du bâtiment et des travaux publics. 9février.
- Noel Djongyang, René Tchinda. An investigation into thermal comfort and residential thermal environment in an intertropical sub-Saharan Africa region:Field study report during the Harmattan season in Cameroon. Energy conversion and Management. Journal homepage:www.elsevier.com/locate/econman. Elsevier
- Olesen BW, Pearsons KC. Introduction to thermal standards and to the proposed new version of En ISO 7730
- Oluwafemi, K., Akande and Michael A. 2010. Adebamowo. 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>
- Runming Yao, Baizhan Li, Jing Liu. 2009. A theoretical adaptive model of thermal comfort-Adaptive Predicted Mean (aPMV). Building and Environment 44 2089-2096
- 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 Runming Yao, Baizhan Li, Jing Liu. A theoretical adaptive model of thermal comfort-Adaptive Predicted Mean (aPMV). Building and Environment 44(2009) 2089-2096
- Thomson. M. L. 1954. A comparison between the number and distribution of functioning eccrine sweat glands in Europeans and Africans. *J. Physiol* 123, 225-233
