

LE CONFORT THERMIQUE DES BATIMENTS EN REGION TROPICALE : CAS DE QUELQUES BUREAUX DU RECTORAT DE L'UNIVERSITE D'ABOMEY CALAVI (COTONOU-BENIN)

Aurélien **OLISSAN** 1^{a,b*}, Clément **KOUCHADE** 2^b, Philippe **ANDRE** 3^a, Cossi Norbert **AWANOU** 4^b

^a Université de Liège, équipe BEMS (Building Energy Monitoring & Simulation), 185 Av. de Longwy, 6700, Arlon, Belgique

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

RÉSUMÉ

Le confort thermique est défini par l'ASHRAE, comme une condition de bien être psycho-physique de l'individu, par rapport à l'environnement dans lequel il vit et travaille. L'évaluation de cette caractéristique subjective peut être objectivée et quantifiée au moyen d'indices thermiques. Parmi ceux-ci, c'est le PMV (vote moyen prévisible) qui reflète avec la plus grande précision, l'influence des paramètres physiques dont dépend le confort thermique.

Les présents travaux ont pour objectif d'évaluer cet indice de confort thermique en région tropicale à partir des mesures dont les premières campagnes sont réalisées dans certains bureaux du bâtiment du rectorat de l'Université d'ABOMEY CALAVI au Bénin.

Mots Clés : Confort, thermique, climat, indices, paramètres physiques

NOMENCLATURE

PMV	vote moyen prévisible	t_r	température moyenne radiante, °C = t_{mrt}
PPD	pourcentage prévisible d'insatisfaits	v	vitesse relative de l'air, m/s
M	métabolisme, W/m ² (1mét=58.15Wm ²)	h_c	coefficient d'échange de chaleur par convection, W/m ² K
I_{cl}	résistance thermique de la vêtture, clo (1clo=0.155m ² K/W)	t_c	température superficielle externe de la vêtture, °C
f_{cl}	facteur de majoration d'aire dûe à la vêtture	p_a	pression de la vapeur d'eau
t_a	température de l'air ambiant, °C	H_{rel}	humidité relative (%)
Bi	numéro de bureau i, i=[1,11]		

1. 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 de l'air, de l'activité et de l'habillement qui détermine le confort thermique de l'homme dans son environnement proche. Le confort thermique dans un bâtiment, 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 âprement étudiée par Fanger (1970) à partir des expériences conduites

dans des ambiances contrôlées en température et en humidité relative. Ces tests qui ont tenu compte de la race, 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 773 et au standard ASHRAE 55 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)[1] 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

* OLISSAN Aurélien

Adresse électronique : olissanaurelien@yahoo.fr

meilleur confort aux occupants. Nguessan(1990)[2] quant à lui, utilise les paramètres du confort thermique pour faire l'analyse thermique des bâtiments climat chaud. Jeannot et Djako (1993)[3] vont dans le même sens, mais proposent les types d'habitats et les matériaux de construction les mieux adaptés à chaque climat tropical.

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.

De même, la détermination du confort thermique est souvent confrontée aux difficultés d'estimation théorique des indices PMV et PPD.

Cette étude a pour but d'analyser le confort thermique dans des conditions climatiques de Cotonou, 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. Cette première campagne de mesures s'est déroulée dans certains bureaux du rectorat de l'Université d'Abomey Calavi durant le mois de Janvier, période pendant laquelle souffle l'harmattan, un vent froid et sec venant du continent. Deux de ces bureaux sont naturellement ventilés et neuf bureaux sont climatisés.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. 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 10km de Cotonou. Avec une forte humidité relative 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 [4]. La valeur moyenne des précipitations observée au mois de janvier est de 12,2mm [4]. 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 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 chaque année.

Cotonou et Abomey-Calavi étant situés dans la zone la plus humide 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 au mois de janvier. 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.

2.2. Expérimentation

Les mesures de température, d'humidité relative et de température rayonnante des parois sont effectuées dans des bureaux dont les occupants ont été soumis à un questionnaire. Ils doivent renseigner les informations personnelles concernant l'activité et la vêtue. Ces mesures ont été ponctuellement prises pendant 10 minutes, à l'aide des capteurs d'humidité et de température au moment de l'enquête. 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 Olsen (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. Une moyenne générale de 0,58 clo a été enregistrée pour tous les participants.

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 1,2met soit 70W/m² 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/m², il n'y a pas de travail produit.

2.3. 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[5]. 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 température rayonnante des parois de l'ambiance). On utilisera alors pour le modèle, les valeurs moyennes des paramètres mesurés, et celle des résistances thermiques de l'habillement déterminée au niveau de chaque bureau. La pression de vapeur d'eau sera calculée à partir de la valeur moyenne de l'humidité relative mesurée dans chaque bureau en fonction de la pression de vapeur d'eau saturante qui ici est 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 bureau, le modèle s'exprime par la séquence d'équations suivante :

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \exp(-0,036M) + 0,028)[M \\
 & - 3,05 \cdot 10^{-3} (5733 - 6,99 \cdot M - p_a) - 0,42(M - 58,15) \\
 & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M (5867 - p_a) - 0,0014M (34 - t_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) \\
 & - f_{cl} hc(t_{cl} - t_a)]
 \end{aligned}$$

(1)

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028M - 0,155I_{cl} [3,9610^{-8} f_{cl} ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} \text{ si } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v} \\ 12,1\sqrt{v} \text{ si } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} \leq 12,1\sqrt{v} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0,2I_{cl} - \text{si } I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1I_{cl} - \text{si } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{cases} \quad (4)$$

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)} \quad (5)$$

3. RESULTATS

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. L'algorithme de ce programme de calcul est en annexe. Le programme est écrit en matlab.

Le tableau 1 présente les valeurs des différents paramètres physiques mesurés pour chaque bureau.

Tableau 1. Valeurs des paramètres physiques mesurés pour chaque bureau

	I _{cl} (clo)	H _{rel} (%)	t _a (°C)	t _r (°C)
B1	0,45	57,16	25,50	28,33
B2	0,50	50,01	23,50	24,91
B3	0,87	40,00	22	22,62
B4	0,56	63,94	31,83	30,95
B5	0,72	66,57	27,65	27,68
B6	0,45	62,35	26,48	26,55
B7	0,40	59,77	21,79	22,96
B8	0,41	68,51	27,96	28,19
B9	0,76	51,21	22,44	24,83
B10	0,82	70,47	29,25	29,16
B11	0,45	67,57	27,35	27,22

En observant le tableau 1, on constate que les occupants des bureaux B3, B5, B9 et B10 ont une résistance vestimentaire respective de 0,87 clo, 0,72 clo, 0,76 clo et 0,82 clo plus élevée pour prévenir la sensation de fraîcheur due au vent sec l'harmattan qui souffle d'habitude au mois de décembre et de janvier. Par contre ceux des différents bureaux B1, B2, B4, B6, B7, B8 et B11 ont une vêtue de type tropicale ou d'été. Aux bureaux B4 et B10, les portes et fenêtres sont normalement ouvertes. 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. Rappelons ici que nous n'avons pas eu de capteur de vitesse pour mesurer la vitesse du vent dans les différents bureaux durant la période de nos mesures. Mais il est à noter que durant nos mesures, le vent était calme dans chacun des bureaux. Pour cela, nous avons fait

l'hypothèse de faire varier la vitesse du vent de 0m/s à 1,2m/s.

A partir des valeurs mesurées (tableau 1), on obtient les valeurs suivantes des indices PMV et PPD. Les tableaux 2, 3 et 4 présentent ces indices pour chaque bureau et pour les valeurs respectives de 0,02m/s, 0,65m/s et 1,2m/s de la vitesse du vent.

Tableau 2. Indices PMV et PPD pour v= 0,02m/s

	PMV	PPD %
B1	0,64	13,65
B2	-0,16	5,58
B3	-0,06	5,08
B4	2,26	87,15
B5	1,32	41,59
B6	0,60	12,71
B7	-0,95	24,10
B8	1,11	31,23
B9	0,13	5,36
B10	1,84	69,60
B11	0,90	22,34

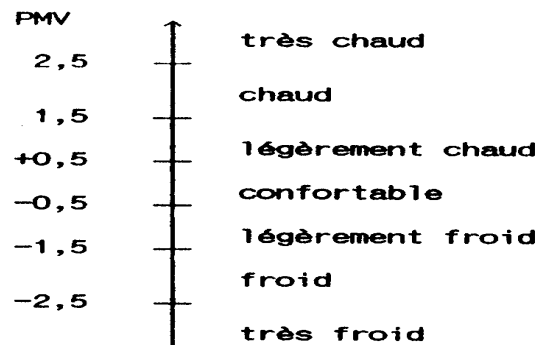


Figure 1. Echelle de PMV

La zone de confort étant définie pour $-0,5 \leq PMV \leq 0,5$ selon la norme ISO 7730, on constate que :

Les bureaux B2, B3 et B9 qui respectivement ont des valeurs de -0,16 ; -0,06 et 0,13 pour PMV pour une vitesse de vent de 0,02m/s, sont confortables selon la norme ISO 7730. Le bureau B3 paraît ici être plus confortable que les deux autres. Par conséquent, les quadruplets (0,5clo ; 50,01% ; 23,50°C ; 24,91°C), (0,87clo, 40% ; 22°C ; 22,62°C) et (0,76clo ; 51% ; 22,44°C ; 24,83°C) donnent les conditions de confort respectivement pour les bureaux B2, B3 et B9. L'humidité relative ayant des valeurs inférieures à 60% au niveau de ces bureaux, son influence sur le confort est très faible. Le bureau B3 est plus confortable que les deux autres et cela s'explique par le faible écart entre la température ambiante et celle radiante dans ce bureau. Evidemment cet écart vaut 0,62°C, 1,41°C et 2,39°C respectivement pour les bureaux B3, B2 et B9. Les autres bureaux inconfortables ont un taux d'humidité relative plus élevé, et parfois supérieure à 60%. L'humidité relative de 57,16% au bureau B1 moins élevée n'a pas d'influence sur le confort. L'inconfort de ce bureau est attribué à l'écart de température qui vaut ici 2,83°C très peu différent de 3°C, source d'inconfort [3].

Pour la vitesse v=0,65m/s, les bureaux confortables sont les bureaux B1, B6, B8 et B11 pour des valeurs de PMV respectives de -0,29 ; -0,16 ; 0,42 et 0,21. Les quadruplets suivants correspondent aux conditions de confort dans ces bureaux et sont respectivement (0,45clo ; 57,16% ; 25,50°C ; 28,33°C) ; (0,45clo ; 62,35% ; 26,48°C ; 26,55°C) ; (0,41clo ; 68,51% ; 27,96°C ; 28,19°C) et (0,45clo ; 67,57% ; 27,35°C ; 27,22°C). Le bureau B6 est plus confortable que le bureau B11, plus confortable que le bureau B1, plus confortable que le bureau B8. Ici les valeurs de l'humidité relative sont élevées et

sont respectivement 62,35% ; 67,57% ; 57,16% et 68,51% pour les bureaux confortables B6, B11, B1 et B8. Les écarts de température sont respectivement 0, 07°C ; 0,13°C ; 2,83°C et 0,23°C pour les bureaux B6, B11, B1 et B8. Malgré que le bureau B1 ait alors le plus faible taux d'humidité et la plus faible valeur en température ambiante, il est moins confortable que les bureaux B6 et B11. L'écart de température trop élevée est une source d'inconfort pour le bureau B1, ce qui le pénalise par rapport au bureau B6 et B11, malgré ses faibles valeurs de température et de taux d'humidité. L'inconfort des autres bureaux est soit lié à la vitesse du vent trop élevée ou à l'action combinée de la température et de l'humidité relative élevée.

Tableau 3. Indices PMV et PPD pour v= 0,65m/s

	PMV	PPD %
B1	-0,29	6,75
B2	-1,14	32,37
B3	-0,68	14,71
B4	2,09	80,99
B5	0,89	21,91
B6	-0,16	5,58
B7	-2,24	86,56
B8	0,42	8,69
B9	-0,60	12,61
B10	1,56	54,45
B11	0,21	5,95

Les bureaux confortables pour la vitesse v=1,2 m/s sont les bureaux B6, B8 et B11 avec pour PMV, les valeurs respectives -0,46 ; 0,15 et -0,04. Par conséquent les quadruplets correspondant aux conditions de confort pour une vitesse du vent de 1,2m/s sont respectivement (0,45clo ; 62,35% ; 26,48°C ; 26,55° C), (0,41clo ; 68,51% ; 27,96°C ; 28,19°C) et (0,45clo, 67,57% ; 27,35°C ; 27,22°C). On constate ici que les bureaux confortables ici sont des bureaux où le taux d'humidité relative et la température sont plus élevés. L'inconfort dans ces bureaux a été annulé par l'action de la vitesse du vent.

Tableau 4. Indices PMV et PPD pour v= 1,2m/s

	PMV	PPD %
B1	-0,66	14,38
B2	-1,53	52,82
B3	-0,89	22,08
B4	2,04	78,96
B5	0,75	16,96
B6	-0,46	9,57
B7	-2,82	98,02
B8	0,15	5,50
B9	-0,87	21,26
B10	1,47	49,80
B11	-0,04	5,04

4. INTERPRETATIONS

La figure 2 présente ici la variation du PMV en fonction de l'humidité relative et permet ici de mettre en évidence ici l'influence de l'humidité relative sur le PMV, donc sur le confort thermique des bureaux. Sur cette figure, nous avons présenté les bureaux confortables pour différentes valeurs de vitesse. Ces bureaux sont présents dans la zone de confort définie par la bande horizontale comprise entre -0,5 et 0,5. Par exemple, le

bureau B3 est confortable pour les vitesses 0,02m/s, 0,15m/s et 0,65m/s. Au-delà de 70%, l'humidité relative a une influence remarquable sur le confort des bureaux et représente alors une source d'inconfort. Ceci se remarque sur la figure 2 où les bureaux B10 et B4, malgré l'évolution en vitesse restent inconfortables. Ne pouvant pas augmenter indéfiniment la vitesse du vent, la limite étant fixée à 1,5m/s, toute vitesse du vent supérieure à cette limite pouvant provoquer de gêne (les feuilles s'envolent) [3], les bureaux B10 et B4 restent inconfortables malgré l'évolution en vitesse du vent.

Sur la figure 3, il a été représenté l'évolution du confort en fonction de la température ambiante. Les bureaux confortables sont aussi présents dans la bande comprise entre -0,5 et 0,5. Elle permet d'apprécier l'influence de la température ambiante sur le confort des bureaux. On remarque ici qu'au-delà de 28°C, le confort n'est plus assuré. Ceci se remarque d'ailleurs avec les bureaux B4 et B10 qui, pour aucune valeur de la vitesse du vent, ne sont confortables.

La figure 4 a les mêmes explications que la figure 3. Elle présente l'influence de la température des parois sur le PMV.

En définitive, pour les mêmes vitesses, les bureaux se trouvant dans la zone de confort sont les mêmes aussi bien que pour la figure 2 que pour les figures 3 et 4.

Dans le diagramme de Givoni, la zone de confort idéale s'étend en température de 20°C à 27°C [6]. En région tropicale et humide, où la source d'inconfort est liée surtout à la mouillure cutanée, la température d'inconfort se manifeste dès que la température dépasse 28°C ou 29°C avec une vitesse de vent relativement faible [4]. Les bureaux confortables selon notre étude (modèle de Fanger) ont une température comprise entre 22°C et 27,96°C et le sont aussi selon le diagramme de Givoni puisque la plage [22°C ; 27,96°C] est incluse [20°C ; 28°C].

L'inconfort des bureaux 10, 4, 5 et 7 est lié soit à l'influence combinée du taux d'humidité élevée (60%-70%) et de la température ambiante trop élevée comprise entre 27°C et 32°C pour les bureaux (B5, B10 et B4) ou de la température basse pour le bureau B7.

Tableau 5 : Valeurs des paramètres de confort en fonction de la vitesse du vent

Vitesses du vent (m/s)	Humidité Relative (%)	Température ambiante (°C)
0,02	50,01 ; 40 ; 51,21	23,5 ; 22 ; 22,44
0,15	57,16 ; 50,01 ; 40 ; 62,35 ; 51,21	25,5 ; 23,5 ; 22 ; 26,48 ; 22,44
0,35	57,16 ; 40 ; 62,35 ; 51,21 ; 67,57	25,5 ; 22 ; 26,48 ; 22,44 ; 27,35
0,65	57,16 ; 62,35 ; 68,51 ; 67,57 ;	25,5 ; 26,48 ; 27,96 ; 27,35
0,85	57,16 ; 62,35 ; 68,51 ; 67,57 ;	25,5 ; 26,48 ; 27,96 ; 27,35
1,2	62,35 ; 68,51 ; 67,57	26,48 ; 27,96 ; 27,35

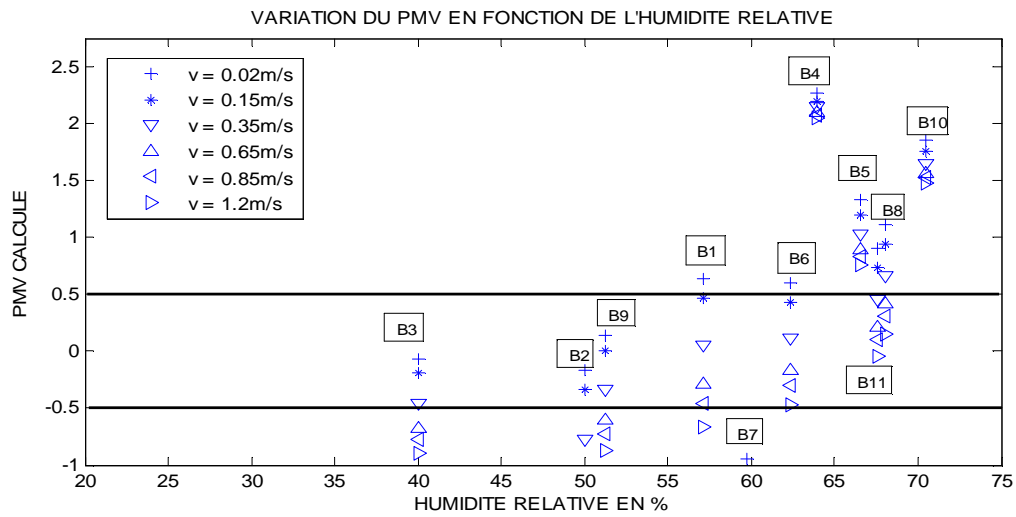


Figure 2 : Influence de l'humidité relative sur le confort thermique

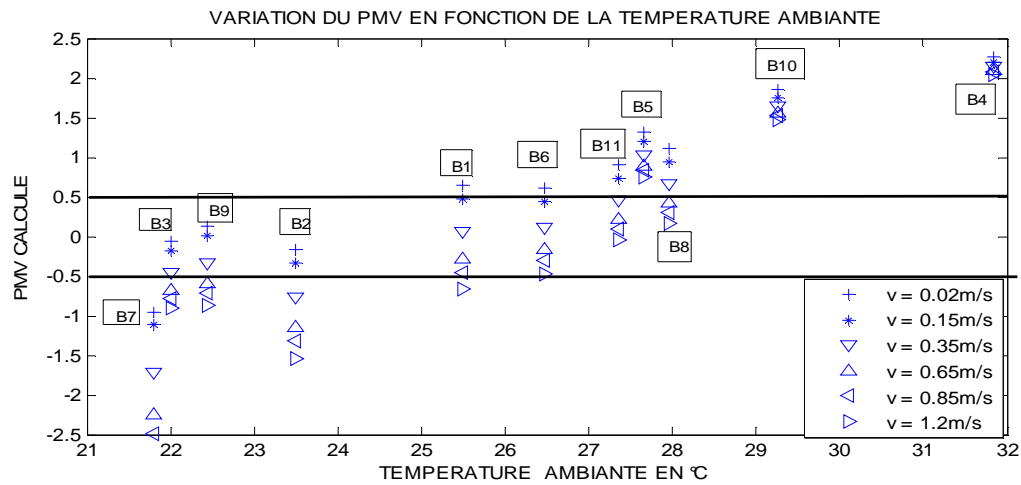


Figure 3 : Influence de la température ambiante sur le confort thermique

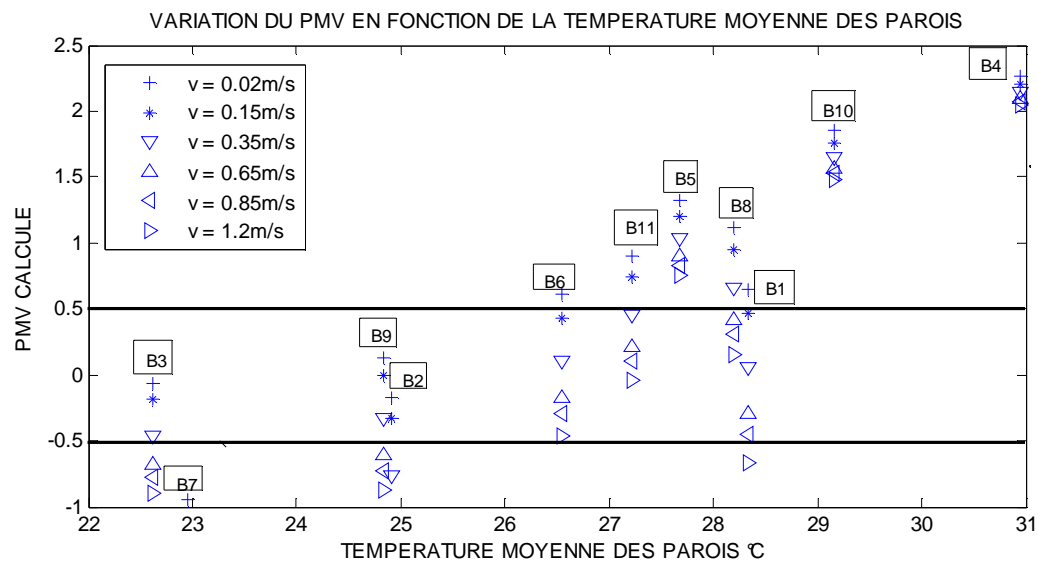


Figure 4 : Influence de la température moyenne des parois sur le confort thermique

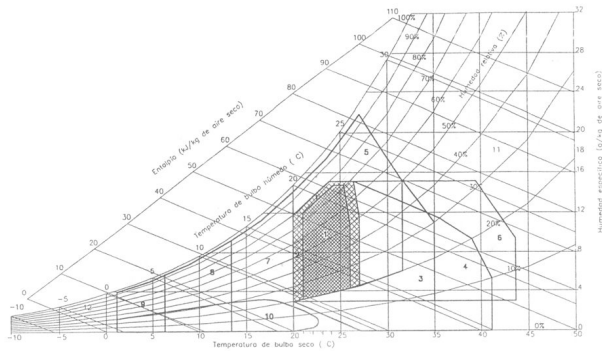


Figure 5 : Diagramme de GIVONI

5. CONCLUSIONS

D'après les tests réalisés, les conditions obtenues par l'utilisation de la théorie de Fanger nous ont permis de déterminer les conditions de confort pour les bâtiments testés. Ces conditions sont en adéquation avec la réalité sur le terrain et sont incluses dans la zone de confort du diagramme de Givoni. Cependant, cette étude ne nous a pas permis de prendre en compte les sensations réelles des occupants pour mieux valider le modèle de Fanger qui initialement est mieux adapté aux climats des pays tempérés. Aussi constate-t-on que la ventilation peu permettre d'améliorer les conditions d'ambiance. En augmentant la vitesse de l'air ambiant, les bureaux qui ne sont pas confortables, le deviennent. Par contre, ceux qui ne le sont pas du fait d'une température basse confortent leur inconfort à mesure que l'on évolue en vitesse du vent.

Les futurs travaux s'inscrivant dans la continuité de cet article pourront mieux nous élucider quant à l'application des résultats des travaux de Fanger, dans les régions à climats chauds et humides en tenant cette fois-ci compte du caractère subjectif de la sensation des occupants.

6. REFERENCES

- [1] Dreyfus J : Confort dans l'habitat tropical
- [2] N'GESSAN M'Gbra. Thèse pour l'obtention du grade de docteur. Centre expérimental de Recherches d'études du bâtiment et des travaux publics. 9février 1990.
- [3] Y. Jannot et T. Djako. Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale. Département Energies pour le développement rural, Ecole Inter-états d'ingénieurs de l'équipement rural (E.I.E.R.)
- [4] CHAFFA Gédéon. Contribution à la conception bio-climatique des habitations dans la région du Sud du Bénin. Thèse de doctorat soutenue le 22-10-2004.
- [5] THERMAL COMFORT by B.W.Olesen Ph.D
- [6] Cossi Norbert AWANOU, Etude de réfrigération passive par toiture diode. Thèse en vue de l'obtention du doctorat du troisième cycle
- [7] Ogbona, AC, Harris Dj. Thermal comfort in sub-Saharan Africa: field study report in Jos-Nigeria Appl Energy 2008, 85: 1-11

ANNEXE ALGORITHME

$$G(t_{cl}) = t_{cl} - 35,7 + 0,028M + 0,155I_{cl} [3,96.10^{-8} f_{cl} ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)$$

