

# LE CONFORT THERMIQUE DES BATIMENTS EN REGION TROPICALE : APPLICATION DU MODELE DE FANGER AU CAS DES LABORATOIRES DE L'UNIVERSITE D'ABOMEY CALAVI (COTONOU-BENIN)

**Aurélien OLISSAN<sup>1,2</sup>, Clément KOUCHADE<sup>2</sup>, Philippe ANDRE<sup>1</sup>, Cossi Norbert AWANOU<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Université de Liège, équipe BEMS (Building Energy Monitoring & Simulation), 185 Av. de Longwy, 6700, Arlon, Belgique

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

**Résumé** - FANGER dans ses travaux a lié l'indice PMV, vote de confort moyen exprimé par une population d'une ambiance donnée au bilan thermique de l'individu. Ce modèle a été utilisé dans nos travaux précédents [1], et a permis de déterminer des conditions de confort dans la région côtière du Bénin. Le présent article a pour but de prendre en compte à travers des enquêtes, la sensation réelle thermique des occupants des ambiances étudiées pour faire une adaptation du modèle de FANGER aux conditions climatiques de la région côtière du Bénin.

## Nomenclatures

PMV = Vote moyen prévisible

M= Métabolisme, W/m<sup>2</sup> (1 met = 58,15W/m<sup>2</sup>)

I<sub>cl</sub>= Résistance thermique de la vêtue, clo  
(1 clo = 0,155m<sup>2</sup>K/W)

f<sub>cl</sub> = facteur de majoration d'aire due à la vêtue

t<sub>a</sub> = température de l'air ambiant, °C

RH=Humidité relative

t<sub>r</sub> = température moyenne radiante, °C=tmrt

v = vitesse relative de l'air, m/s

h<sub>c</sub> = coefficient d'échange de chaleur par convection, W/m<sup>2</sup>K

t<sub>c</sub> = température superficielle externe de la vêtue, °C

p<sub>a</sub> = pression de la vapeur d'eau

PPD = pourcentage prévisible d'insatisfaits

## 1. Introduction

En thermique du bâtiment, deux méthodes sont souvent utilisées pour apprécier le confort thermique. Une méthode statistique et une méthode déterministe basée sur le calcul de la charge thermique du corps humain.

L'ASHRAE 55 et la norme ISO 7730 recommandent d'avoir recours à l'indice de vote moyen PMV et au pourcentage prévisible PPD, pour une appréciation objective des conditions de travail dans un environnement donné en tenant compte des conditions propres à l'individu (métabolisme, activité, habillement) et des conditions liées à l'environnement (température de l'air et des surfaces environnantes, vitesse relative de l'air, la pression de vapeur d'eau ou d'humidité relative).

L'actuel travail concerne une étude effectuée sur le confort thermique dans certains laboratoires de l'université d'Abomey Calavi au Bénin. Dans un travail antérieur [1], nous avons apprécié le confort thermique dans la région côtière du Bénin, à partir du calcul des indices PMV et PPD tirés des travaux de FANGER [2]. Les sensations thermiques des populations des ambiances thermiques dans ces travaux n'ont pas été prises en compte.

La présente étude a pour but de prendre en compte les sensations thermiques des individus des ambiances considérées, et vérifier leur concordance avec les valeurs calculées à l'aide du modèle de FANGER, construit à partir des conditions environnementales des pays du Nord.

## 2. Expérimentation

Les expériences ont été menées au laboratoire d'Énergies renouvelables et dans la salle des travaux pratiques d'informatique de l'École Polytechnique d'Abomey Calavi. Ces salles ont une capacité de 12 à 25 étudiants. Les mesures de température et d'humidité relative ont été réalisées. Une série d'enquêtes a été réalisée pour déterminer la sensation thermique des étudiants. Avant la distribution des feuilles d'enquêtes, les étudiants ont séjourné 1 heure dans cette salle afin de s'acclimater à l'ambiance intérieure qui y règne. Ensuite ceux-ci sont soumis au questionnaire d'enquête. Ils doivent renseigner les informations personnelles concernant l'activité, la vêtue et leur sensation thermique évaluée à l'aide de l'échelle ASHRAE.

Au moment de l'enquête, des mesures de température et d'humidité ont été ponctuellement mesurées pendant 10 à 12mn à l'aide d'une station météo qui enregistre aussi bien les valeurs de l'ambiance extérieure que celle de l'ambiance interne. La valeur moyenne de chacun de ces paramètres 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 font 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<sup>2</sup> d'activité métabolique sur la table de classification des activités métaboliques de la norme ISO 7730. Pour une activité métabolique uniforme de valeur 70W/m<sup>2</sup>, le rendement mécanique  $\eta$  est nul, car aucun travail mécanique n'est réalisé.

Six expériences ont été faites dans six conditions d'ambiances différentes avec plusieurs échantillons d'individus. Les trois dernières expériences ont été faites avec le même échantillon d'individus, mais dans des conditions d'ambiances différentes.

## 3. Calcul des indices de confort PMV et PPD

Le modèle utilisé est celui de FANGER[2], repris par Olesen[3]. Ce modèle s'éclate en cinq équations suivantes

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

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028M - 0,155 \cdot I_{cl} [3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] \quad (2)$$

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

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 0,2I_{cl} - \text{si } I_{cl} \leq 0,5clo \\ 1,05 + 0,1I_{cl} - \text{si } I_{cl} > 0,5clo \end{cases} \quad (4)$$

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

Le calcul des indices PMV et PPD est fait sur la base des renseignements fournis par les occupants des bâtiments. Les salles sont toutes climatisées. Les étudiants étant installés à environ 0.5m des murs, on en déduit que la vitesse du vent ne pourra pas excéder 0.25m/s [4]. N'ayant pas d'équipement adéquat pour mesurer la vitesse du vent, nous allons estimer la vitesse du vent sensiblement égale à 0.15m/s.

#### 4. Résultats et Interprétations

L'échelle ASHRAE en 7 points a été utilisé pour évaluer la sensation thermique des étudiants. Les figures suivantes présentent les sensations thermiques et l'habillement de chacun des étudiants mesurées durant chacune des expériences réalisées en fonction des conditions hygrométriques et thermiques.

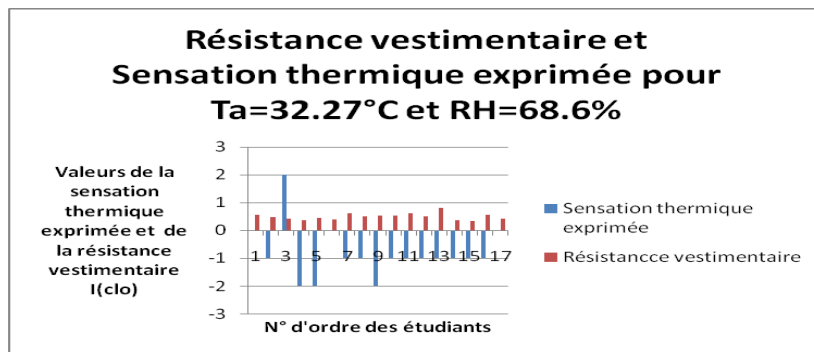


Figure 1. Résultats de l'expérience 1

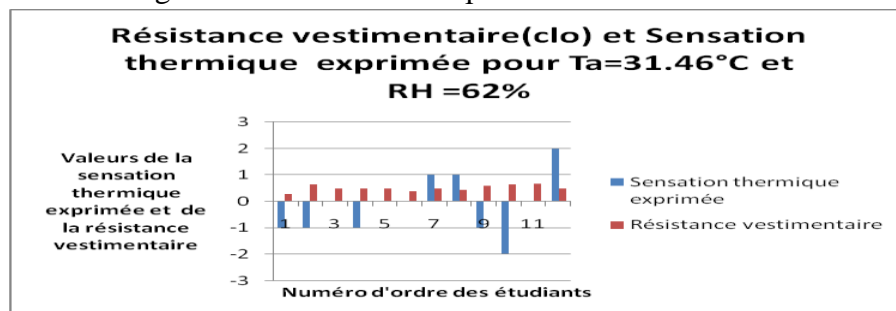


Figure 2 : Résultats de l'expérience 2

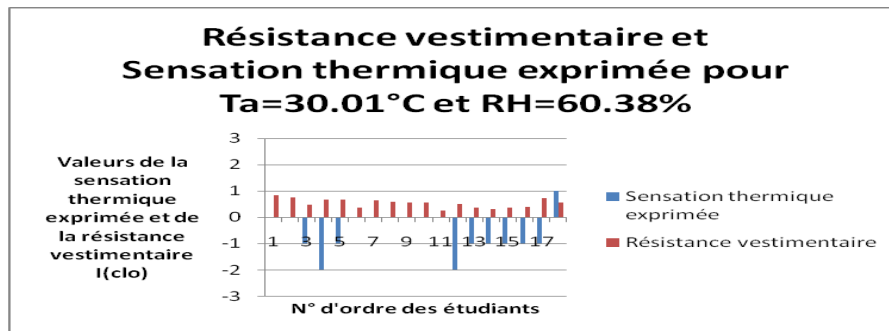


Figure 3. Résultats de l'expérience 3

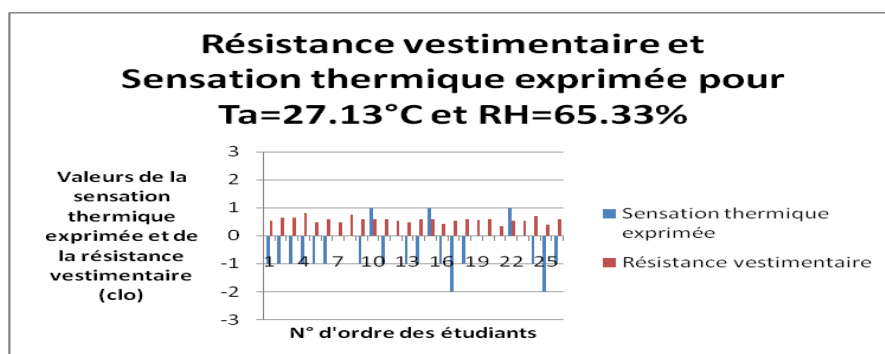


Figure 4. Résultats de l'expérience 4

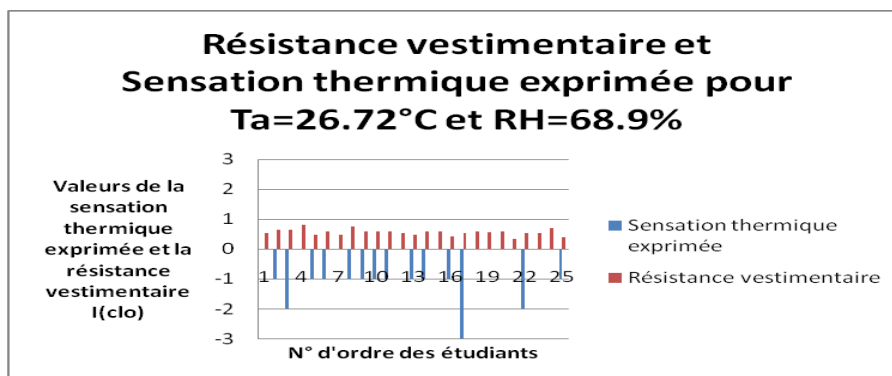


Figure 5. Résultats de l'expérience 5

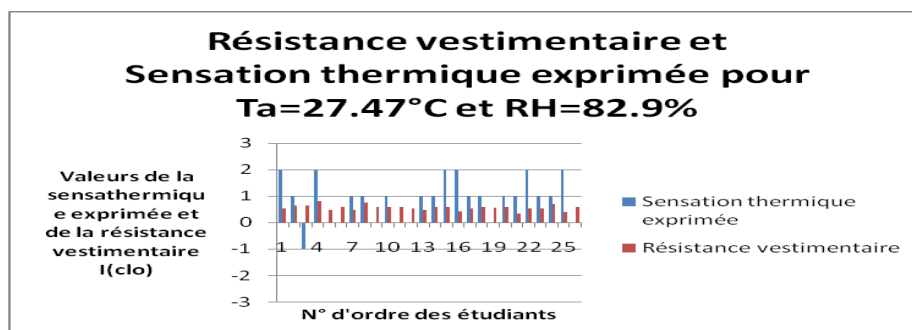


Figure 6. Résultats de l'expérience 6

Au niveau de chacune des expériences 1, 2, 3, et 5, certaines observations paraissent aberrantes par rapport à la moyenne des sensations recueillies au niveau de la population

considérée dans chaque cas. Le tableau suivant présente les numéros des étudiants dont les observations paraissent aberrantes par rapport à la moyenne :

Ambiances	Ta (°C)	RH(%)	Observations aberrantes
<b>Expérimentation 1</b>	31.46	62	10,12
<b>Expérimentation 2</b>	32.27	68.6	3, 4, 5, 9
<b>Expérimentation 3</b>	30.01	60.38	4, 12, 18
<b>Expérimentation 4</b>	27.13	65.33	10, 15, 25, 17
<b>Expérimentation 5</b>	26.72	68.9	3, 17, 22
<b>Expérimentation 6</b>	27.47	82.9	Néant

Tableau 1 : Observations aberrantes

Nous retirons ensuite les observations aberrantes de chacune de nos expériences et on obtient ce qui suit :

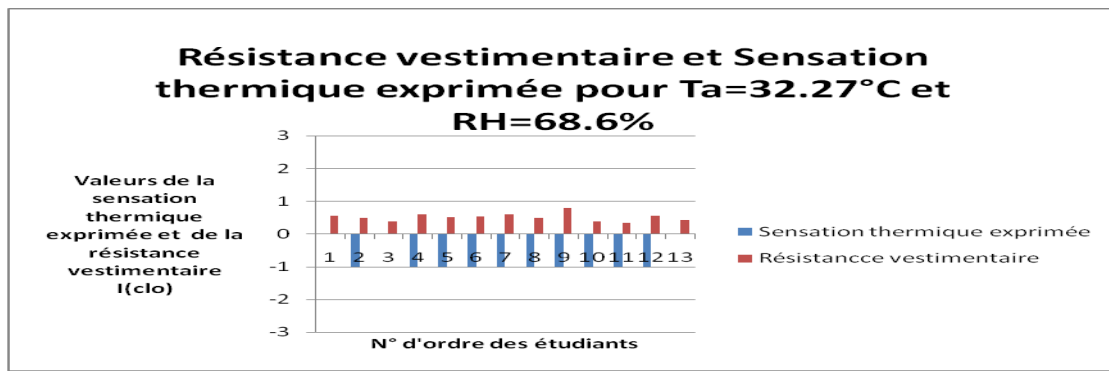


Figure 7. Ambiance 1

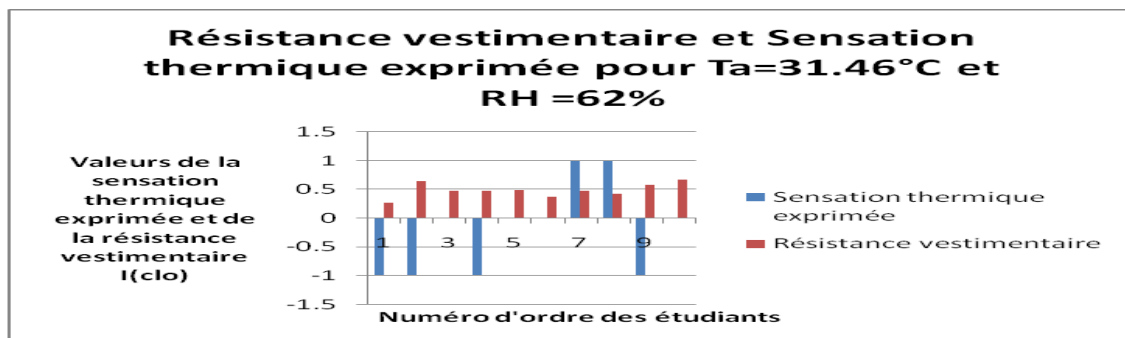


Figure 8. Ambiance 2

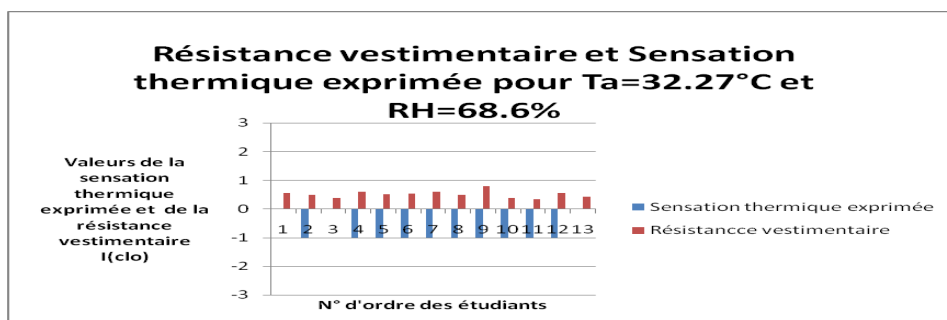


Figure 9. Ambiance 3

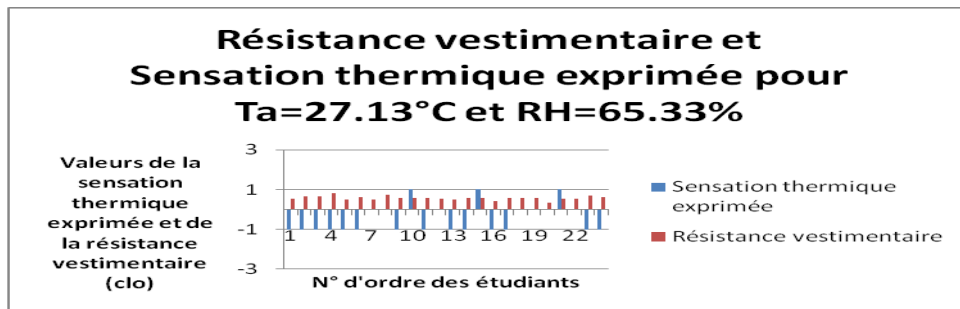


Figure 10. Ambiance 4

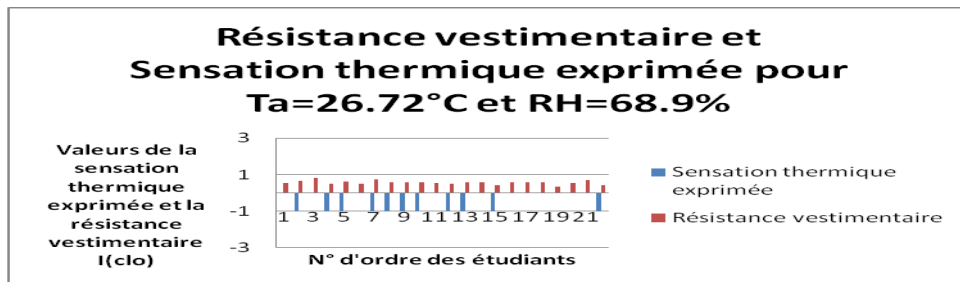


Figure 11. Ambiance 5

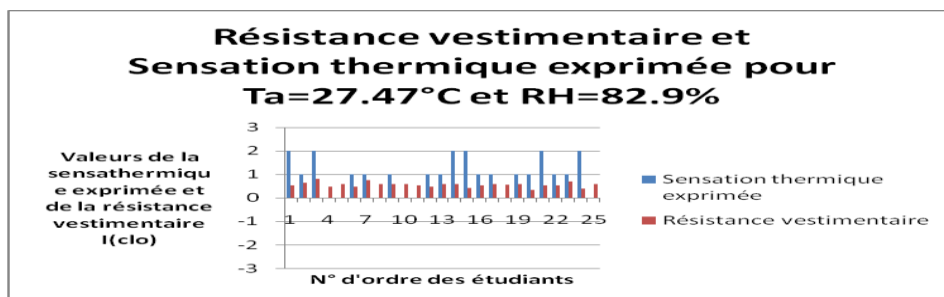


Figure 12. Ambiance 6

A partir des différents votes exprimés, nous avons pu déterminer le PMV moyen de chaque ambiance ou expérience. Le tableau suivant présente les résultats obtenus :

Ambiances	Ta (°C)	RH(%)	I(clo)	PMV mesuré	PMV calculé	ΔPMV	PMV corrigé
<b>Ambiance 1</b>	26.15	60.34	0.52	-0.76	0.42	1.18	-0.92
<b>Ambiance 2</b>	31.46	62.00	0.48	-0.20	2.13	2.23	-0.12
<b>Ambiance 3</b>	30.01	60.38	0.53	-0.50	1.67	2.17	-0.40
<b>Ambiance 4</b>	27.13	65.33	0.57	-0.45	0.84	1.29	-0.38
<b>Ambiance 5</b>	26.72	68.90	0.56	-0.50	0.73	1.23	-0.20
<b>Ambiance 6</b>	27.47	82.90	0.56	0.96	1.07	0.11	0.77

Tableau 2 : Paramètres mesurés et calculés

Les ambiances 1, 2, 3, 4 et 5 présentent une sensation de fraîcheur. Cependant les ambiances 2, 3, 4 et 5 sont confortables. L'ambiance 6 est inconfortable et présente une sensation de chaleur. Evidemment, le taux élevé de l'humidité relative en ambiance 6 ne permet pas de faire évaporer la sueur produite par la température de 27.47°C.

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

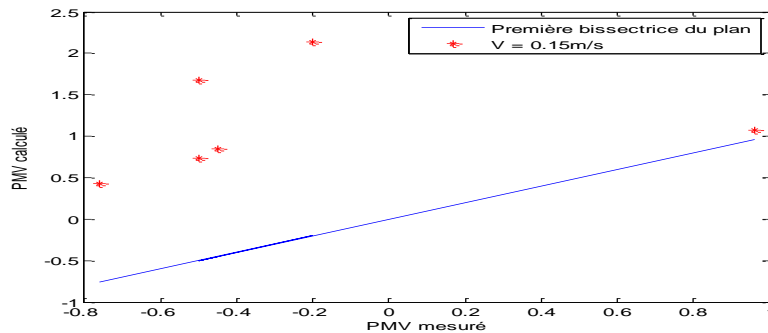


Figure 13. Indices PMV calculés et PMV mesurés

En analysant le graphique de la figure ci dessus, 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 et supérieur au PMV mesuré dans les ambiances.

### 5. Adaptation du modèle de FANGER au Climat de la région côtière du Bénin

La supériorité du PMV calculé par rapport au PMV mesuré par le modèle de FANGER, nous laisse penser à l'adaptation du modèle de FANGER aux conditions climatiques du Bénin, par un coefficient correctif.

Par conséquent dans les conditions climatiques de la région côtière du Bénin, on pourra écrire que :

$$PMV = (0,303 \exp(-0,036.M) + 0,028)[M - 3,05.10^{-3}(5733 - 6,99.M - p_a) - 0,42(M - 58,15) - 1,7.10^{-5}M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96.10^{-8}.f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - \Delta PMV \quad (6)$$

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 la déterminer, nous ferons une régression multiple. Le tableau suivant présente les spécifications de la régression.

Synthèse de la Régression; Variable Dép. : delta_PMV (Feuille de données1)						
R= .99559675 R²= .99121289 R² Ajusté = .98681933						
F(2,4)=225.61 p<.00008 Err-Type de l'Estim.: .18035						
N=6	b*	Err-Type de b*	b	Err-Type de b	t(4)	valeur p
ta(°C)	3.58922	0.308703	0.199789	0.017183	11.62678	0.000313
RH(%)	-2.71439	0.308703	-0.063544	0.007227	-8.79290	0.000923

Tableau 3 : Synthèse de la régression

$$ta(^{\circ}C) \quad b= .19 \quad RH(\%) \quad b= -.06$$

Le facteur correctif est donné alors par la relation suivante :

$$\Delta PMV = 0.19ta - 0.06RH \quad (7)$$

L'expression du PMV corrigé sera :

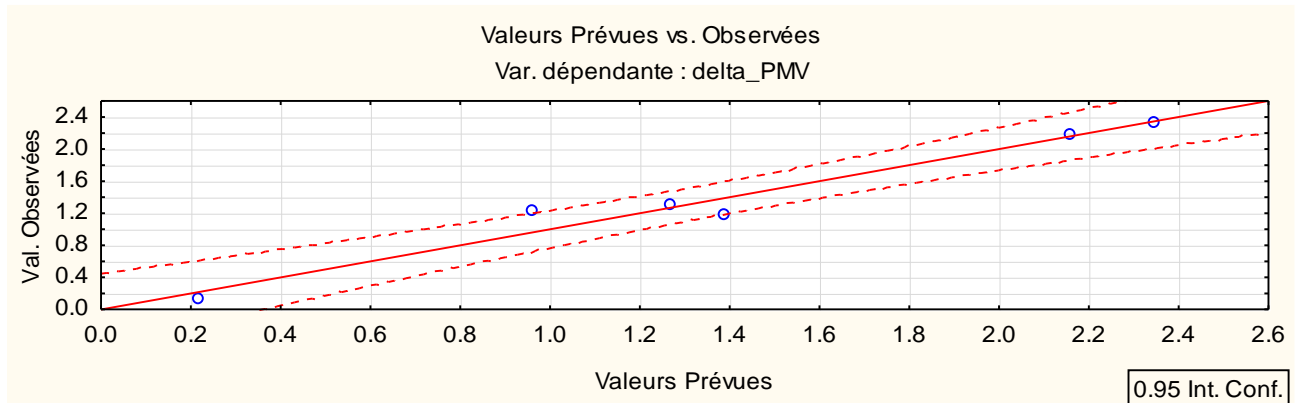


Figure 14 : Répartition des observations par rapport à l'intervalle de confiance à 95%

$$PMV = (0,303 \exp(-0,036.M) + 0,028)[M - 3,05 \cdot 10^{-3}(5733 - 6,99.M - p_a) - 0,42(M - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5}M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)] - (0,19t_a - 0,06RH) \quad (8)$$

## 6. Conclusions

- Les ambiances 2 et 3, on a observé des situations de confort caractérisées par des PMV respectifs de -0.2 et de -0.50. Les paramètres hygrothermiques de ces ambiances avec les mêmes résistances vestimentaires, prédisent avec le modèle de FANGER des situations d'inconfort de chaleur. Par conséquent, on pourrait dire que les personnes des zones chaudes et humides demandent mieux les températures élevées que celles des zones tempérées. Plus la température de l'extérieur est élevée, plus le PMV diminue par rapport à celui prévu par le modèle de FANGER. C'est l'effet de l'acclimatation. L'occupant est habitué au climat chaud. Plus l'humidité relative est élevée, plus la sensation d'inconfort chaud augmente car on est au-delà de la limite supérieure de la zone de confort
- Les températures élevées, avec des valeurs d'humidité relatives adéquates pourraient créer des situations de confort dans cette région du globe terrestre.

Nos prochains travaux s'intéresseront à la validation de cette adaptation du modèle de FANGER aux conditions climatiques de cette région du globe terrestre.

## Références

1. Aurélien OLISSAN, Clément KOUCHADE, Philippe ANDRE, Cossi Norbert AWANOU: Le confort thermique des bâtiment en région tropicale. Cas de quelques bureaux du rectorat de l'Université d'Abomey Calavi
2. Fanger PO. Thermal comfort : analysis and application in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970
3. Olesen BW, Pearsons KC. Introduction to thermal standards and to the proposed new version of En ISO 7730
4. J. Classens, E. Huylebroeck, Jose Flemal. Sensibiliser à la problématique de la climatisation. Guide pour une expertise "climatisation" Approche Syndicale BRISE 2007
5. Y. Jannot et T. Djiako. 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)