# Evaluation du confort thermique par le Modèle de Fanger dans l'espace d'enseignement universitaire de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin (Afrique de l'Ouest)

# Evaluation of thermal comfort using the Fanger model in the university teaching area of the University of Abomey-Calavi in Benin (West Africa)

[1]BOKO Nouvêwa Patrice Maximilien, [2]MEDEOU Fidèle Kouassi, [3]CHABI Ayédêguê Biaou Philippe, [4]ETENE Cyr Gervais, [5]YABI Ibouraïma, [6]OGOUWALE Euloge, [7]VISSIN Expédit W., [8]HOUSSOU Christophe Sègbè et [9]BŁAŜEJCZYK Krzysztof

## Résumé

**C**ette étude évalue le confort thermique des occupants dans les espaces d'enseignement de l'Université d'Abomey-Calavi, en appliquant le modèle de Fanger (PMV/PPD). L'objectif est d'analyser les paramètres physiques du confort thermique dans des salles de cours ventilées naturellement, afin de mieux comprendre les conditions d'ergonomie thermique au sein de l'UAC.

Pour ce faire, une approche méthodologique a été adoptée. Elle consiste en la collecte et au traitement des données. Ces données concernent la température de l'air (Ta), température radiante (Tr), l'humidité relative (HR), la vitesse de l'air (Va). Ces données ont été collectées in situ. A partir de ces données, les indices PMV et PPD de Fanger ont été calculés. Ces calculs ont été accompagnés d'une évaluation subjective de l'environnement thermique via un questionnaire « longitudinal ». L'enquête a été effectuée durant l'année académique 2022-2023.

Les résultats montrent que, lors de la saison sèche, Les occupants ressentent une sensation thermique neutre (30 %) ou légèrement chaude (25 %), avec une insatisfaction observée (APD) généralement inférieure à celle prévue (Pourcentage Prévisible d'insatisfaits - PPD) par le modèle de Fanger, surtout aux extrêmes thermiques. Par exemple, pour la sensation « Très chaud », seulement 2 % des occupants déclarent être insatisfaits alors que le PPD simule un inconfort de 90 %. En saison des pluies, la majorité des occupants ressentent un confort thermique neutre (35 %) ou légèrement froid (30 %), avec des écarts similaires entre APD et PPD. Cette tendance suggère que les occupants développent une certaine tolérance ou adaptation aux conditions climatiques locales, qui n'est pas toujours capturée par le modèle. Globalement, le modèle reste pertinent pour les plages de confort modérées, mais il surestime l'insatisfaction aux extrêmes thermiques. Ces résultats soulignent l'importance de coupler les mesures objectives avec les perceptions subjectives pour une évaluation plus complète du confort thermique dans les espaces universitaires d'Abomey-Calavi. Il est aussi important d'adapter les stratégies de gestion thermique pour améliorer le bien-être des usagers, notamment par des mesures architecturales et de ventilation ciblée.

**Mots clés : Université d'Abomey-Calavi, Confort thermique, Salles de cours, PMV, PPD, Modèle de Fanger**

## Abstract

This study evaluates the thermal comfort of occupants in teaching spaces at the University of Abomey-Calavi, using Fanger's model (PMV/PPD). The objective is to analyze the physical parameters of thermal comfort in naturally ventilated classrooms to better understand thermal ergonomics within the UAC.

To achieve this, a methodological approach was adopted, consisting of data collection and processing. These data include air temperature (Ta), radiant temperature (Tr), relative humidity (HR), and air velocity (Va). The data were collected on-site. Based on these measurements, Fanger's PMV and PPD indices were calculated. These calculations were supplemented with a subjective evaluation of the thermal environment through a "longitudinal" questionnaire. The survey was conducted during the 2022-2023 academic year.

The results show that, during the dry season, occupants experience a neutral (30%) or slightly warm (25%) thermal sensation, with observed dissatisfaction (APD) generally lower than that predicted by the Fanger model's Predictable Percentage of Dissatisfied (PPD), especially at thermal extremes. For example, for the "Very Hot" sensation, only 2% of occupants report dissatisfaction, whereas the PPD predicts 90% discomfort. In the rainy season, the majority of occupants experience neutral thermal comfort (35%) or slightly cold conditions (30%), with similar discrepancies between APD and PPD. This trend suggests that occupants develop some tolerance or adaptation to local climate conditions, which is not always captured by the model. Overall, the model remains relevant for moderate comfort ranges but overestimates dissatisfaction at thermal extremes. These results emphasize the importance of combining objective measurements with subjective perceptions for a more comprehensive evaluation of thermal comfort in the university spaces of Abomey-Calavi. It is also crucial to adapt thermal management strategies to improve user well-being, particularly through architectural measures and targeted ventilation.
**Keywords: University of Abomey-Calavi, Thermal comfort, Classrooms, PMV, PPD, Fanger model.**

## Introduction

Le confort thermique constitue un facteur clé influençant la qualité de l'apprentissage et la performance des étudiants dans les espaces pédagogiques (S. CELIS-MERCIER *et al.*, 2008, p. 25). En effet, plusieurs études soulignent que l'inconfort thermique nuit à la concentration et au rendement des occupants, en particulier dans des environnements soumis à des variations climatiques marquées (C.P. CORGNATI *et al.*, 2007, p. 953 ; R.L. HWANG *et al.*, 2006, p. 55). Cette influence est souvent peu étudiée dans le contexte tropical, où les espaces d'enseignement sont fréquemment surchargés et mal adaptés aux conditions locales (M.A. NICO *et al.*, 2015, p. 113).

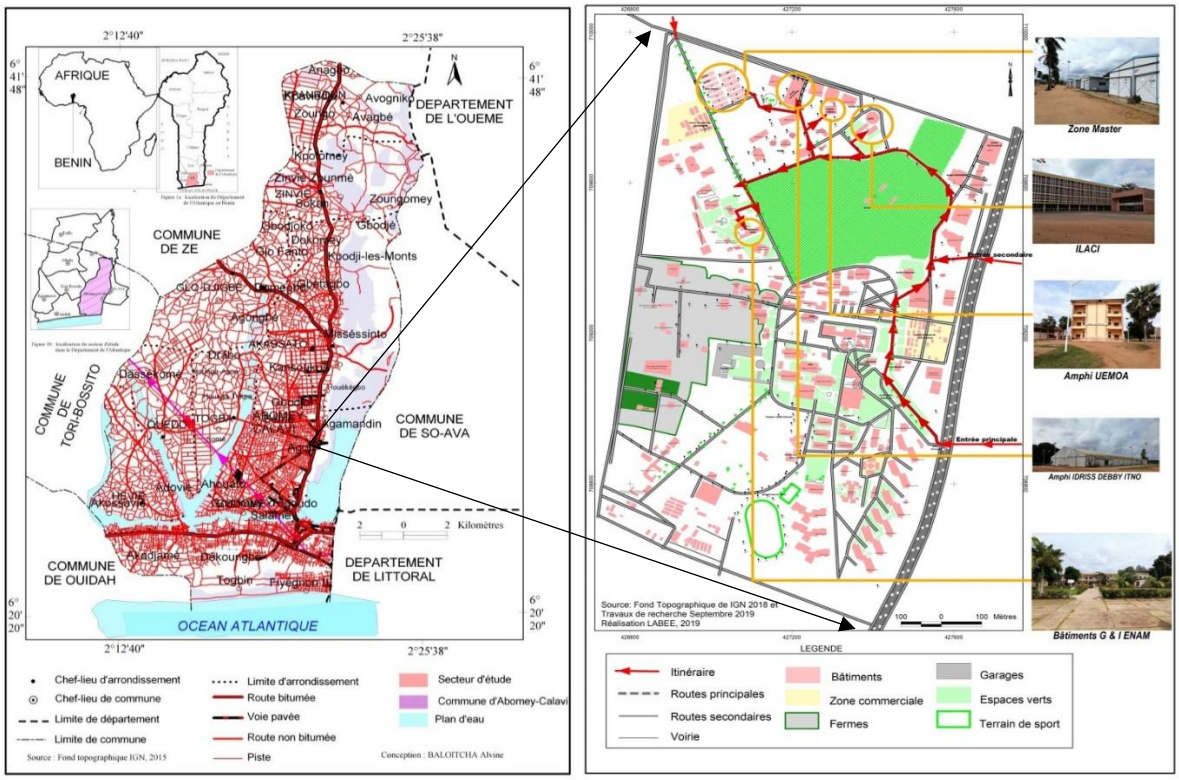
Au Bénin, et plus précisément à l'Université d'Abomey-Calavi, les bâtiments universitaires souffrent souvent d'une inadéquation avec les exigences bioclimatiques tropicales chaudes et humides. Cette situation génère des ambiances thermiques peu confortables qui peuvent impacter négativement la santé, le bien-être et la réussite des étudiants (A. De GIULI *et al.*, 2014, p. 8). Or, les connaissances actuelles restent fragmentaires et une évaluation précise du confort thermique dans ces espaces fait défaut, limitant ainsi la mise en œuvre de solutions adaptées.

La présente étude vise à évaluer quantitativement et qualitativement le confort thermique dans les salles de cours de l'UAC, à travers le modèle de Fanger (PMV/PPD) et les perceptions subjectives des usagers. L'objectif est de caractériser les ambiances thermiques, d'identifier les périodes et zones problématiques, et de formuler des recommandations techniques et organisationnelles permettant d'améliorer les conditions d'apprentissage dans un contexte tropical. Ce travail contribuera ainsi à une meilleure prise en compte du confort thermique dans la gestion des infrastructures universitaires locales.

## 1. Présentation du milieu d'étude

L'objet de cette étude l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) se trouve dans la commune d'Abomey Calavi. C'est la plus grande et la plus ancienne université publique du Bénin. Fondée en 1970 sous le nom d'Université du Dahomey, elle a été rebaptisée en 2001. Elle est située entre 6° 24' 58' de latitude Nord et 2° 20'31" de longitude Est. Sa superficie est environ 53900 ha. La figure 1 présente la situation géographique de l'université d'Abomey-Calavi dans la Commune du même nom.

**Figure 1 : Situation géographique du milieu d'étude**




Le campus principal de l'Université d'Abomey-Calavi est entouré par plusieurs quartiers et arrondissements de la commune d'Abomey-Calavi. Il est bordé par des quartiers dynamiques et estudiantins tels que Zogbadjè (à l'est), Bidossessi (au nord), Togoudo (au sud) et Tokpa Zoungo (à l'ouest). sa plus grans partie se situe dans l'arrondissement d'Abomey-Calavi

L'Université d'Abomey-Calavi (UAC) compte plusieurs facultés, dont les principales sont la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines (FLASH), la Faculté des Sciences et Techniques (FAST), la Faculté des Sciences Économiques et de Gestion (FASEG), et la Faculté de Droit et de Sciences Politiques (FADESP). D'autres facultés incluent la Faculté des Sciences de la Santé (FSS) et la Faculté des Sciences Humaines et Sociales (FASHS).

Elle compte aussi plusieurs Écoles et Instituts. Il s'agit entre autre de École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), l'École Nationale d'Administration et de Magistrature (ENAM),

l'Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques (IMSP), l'École Doctorale Pluridisciplinaire "Espaces, Cultures et Développement".

Sur le plan physique, Calavi. Contenu dans la région Sud du Bénin, possède un climat de type subéquatorial comprenant deux saisons pluvieuses de mi-mars à mi-juillet et mi-septembre à mi-novembre puis deux saisons sèches de mi-juillet à mi-septembre et mi-novembre à mi-mars.

## 2. Données et Méthodes

### *2.1. Données utilisées*

Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent de mesures effectuées directement dans les salles de cours et amphithéâtres de l'Université d'Abomey-Calavi. Les instruments employés comprennent des thermomètres et hygromètres numériques (précision de ±0,1°C et ±2%), des anémomètres pour la vitesse du vent (précision de ±0,2 m/s), ainsi que des pyranomètres pour le rayonnement solaire (précision de ±5%). Les systèmes de ventilation et de climatisation ont été évalués à l'aide de capteurs de débit d'air et de température, avec une précision de ±1%. Les données sur les activités des apprenants, incluant le niveau métabolique et l'impédance thermique des vêtements, ont été collectées via un questionnaire structuré en utilisant des tableaux de référence standardisés. Il s'agit du niveau d'activité métabolique et les vêtements portés par les apprenants (impédance thermique du vestiaire). Le taux métabolique a été fixé suivant le tableau 1.

**Tableau 1 : Valeur métabolique selon les conditions des apprenants**

| Activités | Conditions | Valeurs |
|---|---|---|
| Activité métabolique (Met) | Position assise et activité légère (réflexion et rédaction) | 1.0 Met |
| Impédance thermique du vestiaire (Icl) | Habits légers (saison chaude)<br>Habits chauds (saison frais) | 0.5 Iclo<br>1.0 Iclo |

*Source : BURATTI C, RICCIARDI P, 2009*

Les mesures ont été réalisées dans des conditions réelles, en prenant en compte les températures extérieures et en effectuant les relevés à 1,1 mètre du sol, pendant des heures de cours. Ces données ont été complétées avec des données socio-anthropologiques afin d'appréhender la perception des apprenants/étudiants et enseignants sur le confort thermique. Pour ce faire, 600 questionnaires longitudinaux ont été distribué (300 pour la saison sèche et 300 pendant la saison de pluie). 52 % des répondants sont de sexe féminin contre 48 % de sexe masculin. 95 % des personnes interrogées ont entre 18 et 35 ans. Seulement 3% sont des enseignants. La campagne de mesure, elle s'est déroulée durant l'année universitaire 2022-2023 à partir du mois d'octobre 2022 jusqu'au mois de juillet 2023).

### *2.2. Méthodes de traitement des données*

L'évaluation du confort thermique dans l'espace d'enseignement universitaire a été déterminée en utilisant le modèle de Fanger. Ce modèle développé par Fanger est une approche statique dite analytique basée sur l'équilibre thermique du corps humain en introduisant les deux indices : le vote moyen prévisible PMV (Predicted Mean Vote) et le pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) utilisés dans la norme ISO 7730. Le PMV est calculé en utilisant la formule suivante :

$$PMV = f(T_a, T_r, v, \varphi, \dot{m}, Icl)$$

Avec : Ta : Température de l'air (°C) ; Tr : Température radiante des surfaces (°C) : v : Vitesse du vent (m/s) ; φ: Humidité relative (%) ; m : Métabolisme (activité physique) (met) et Icl : Indice de vêtement (clo)

Les valeurs de PMV peuvent varier de -3 (froid extrême) à +3 (chaleur extrême), avec 0 représentant un confort thermique neutre (tableau 2).

**Tableau 2 : Catégorie de sensation thermique des occupants sur l'échelle de l'ASHRAE**

| N° | Sensations | Valeurs |
|---|---|---|
| 1 | Très froid | -3 |
| 2 | Froid | -2 |
| 3 | Légèrement froid | -1 |
| 4 | Neutre | 0 |
| 5 | Légèrement chaud | 1 |
| 6 | Chaud | 2 |
| 7 | Très chaud | 3 |

*Source : ASHRAE Standard 55, 2004*

Quant au PPD, il est calculé à partir du PMV selon la formule empirique suivante :

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

Le PPD indique la proportion de personnes qui pourraient ressentir de l'inconfort thermique pour chaque valeur de PMV :

- Un PPD faible (inférieur à 10 %) signifie que la majorité des personnes sont confortables.
- Un PPD élevé (supérieur à 40 %) suggère un niveau important d'inconfort thermique au sein de la population étudiée.

Selon la méthode de Fanger, le pourcentage de Satisfaction correspond à la somme des votes (+1,0,-1), alors que celui des insatisfaits correspond à la somme des votes (+2,+3) et (-2,-3), c'est ce que synthétique le tableau 3.

**Tableau 3 : Catégorie de pourcentage de satisfaction et d'insatisfait et seuil d'acceptabilité de l'environnement thermique**

| N° | Sensations | Valeurs | PS – PI (%) | Seuil d'acceptabilité |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Très froid | -3 | Pourcentage des insatisfactions | **80%** |
| 2 | Froid | -2 | | |
| 3 | Légèrement froid | -1 | Pourcentage de Satisfaction | |
| 4 | Neutre | 0 | | |
| 5 | Légèrement chaud | 1 | | |
| 6 | Chaud | 2 | Pourcentage des insatisfactions | |
| 7 | Très chaud | 3 | | |

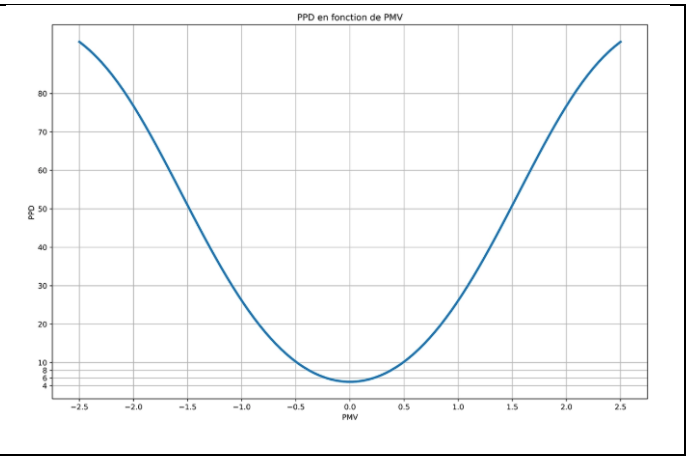
*Source : ASHRAE Standard 55, 2004*

L'environnement thermique peut être qualité "acceptable" si plus de 80 % des occupants s'y accorde. Dans ce travail, l'acceptabilité thermique est analysée en fonction de quatre critères qualitatifs (vote direct « acceptable », somme des votes « +1,0,-1 », vote de sensation thermique « neutre » et vote de préférence thermique « aucun changement »).

Voici des plages typiques de PMV et les valeurs PPD correspondantes. Le graphique de la figure 2 montre la relation entre le PPD et le PMV.

**Figure 2. Pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) en fonction du vote moyen prédit (PMV)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **PMV** | **= 0**: | PPD | ≅ 5 % |
| **PMV** | **= ±0.5**: | PPD | ≅ 10 % |
| **PMV** | **= ±1.0**: | PPD | ≅ 25 % |
| **PMV** | **= ±2.0**: | PPD | ≅ 75 % |




*Source : ISO7730 1994,*

La plage acceptable est d'un écart du PMV de ± 0,5 avec un PPD de 10 %, qui représente un inconfort thermique pour tout le corps. Cependant, avec l'ajout d'un pourcentage de 10 % d'inconfort local, qui peut être ressenti sur une partie du corps, ceci donne un PPD de 20 % pour un écart du PMV de ± 0,5.

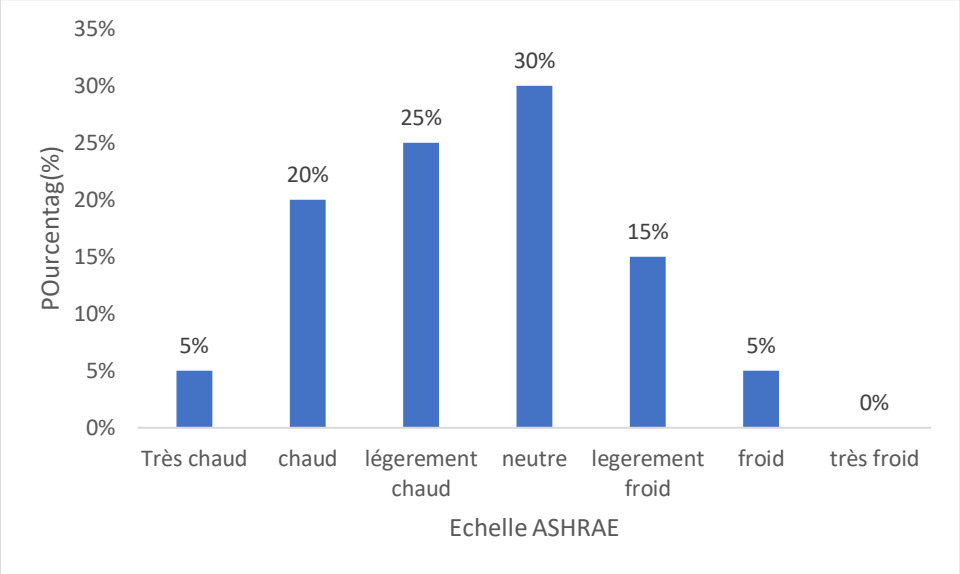
Tous les calculs statistiques classiques ont été réalisés dans le logiciel Excel 2019. Quant au calcul d'indice bioclimatique, il a été réalisé grâce au logiciel BioKlima © v 2.6. Le logiciel peut être téléchargé à partir de : www.igipz.pan.pl/klimat/blaz/bioklima.htm. Ces données et méthodes ont permis d'avoir des résultats.

## 3. Résultats et discussion

### *3.1. Perception de l'environnement thermique en saison sèche et en saison de pluie*

Les figures 3, 4 et 5 représentent le vote de sensation thermique des occupants sur l'échelle de sept points de l'ASHRAE.

**Figure 3 : Vote de sensation thermique pendant la saison sèche sur l'échelle de ASHRAE**




*Source : Résultats travaux de terrain, janvier 2024*

L'analyse de la figure 3 révèle une répartition variée des perceptions selon l'échelle de sept points de l'ASHRAE. On observe que la majorité des occupants (30 %) se sentent neutres, ce qui indique que les conditions thermiques sont globalement perçues comme confortables par une part importante des usagers.

Cependant, une proportion significative des répondants ressent une sensation de chaleur, avec 25 % déclarant une température légèrement chaude et 20 % une température chaude. Ces chiffres indiquent que près de la moitié des occupants perçoivent une certaine chaleur, qui peut potentiellement influencer leur confort et leur concentration pendant les cours.

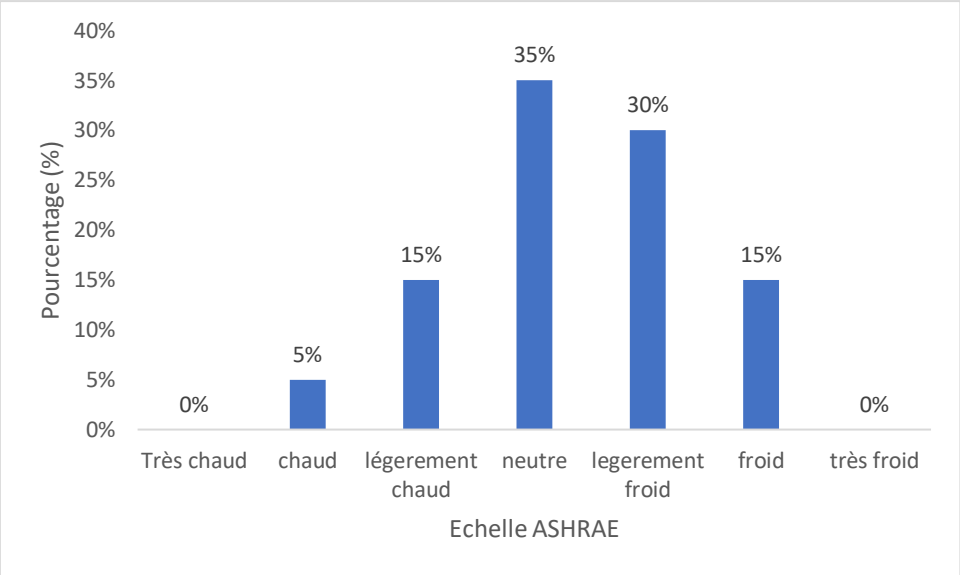
Le pourcentage de personnes se sentant très chaud est faible (2 %), ce qui suggère que les conditions extrêmes de chaleur sont peu fréquentes ou peu ressenties dans l'espace d'enseignement durant cette saison.

Par ailleurs, 15% des occupants ressentent une température légèrement froide, tandis que 5% perçoivent l'environnement comme froid. Aucune personne n'a rapporté une sensation de très froid, ce qui montre que le froid extrême est quasiment absent durant la saison sèche.

Cette distribution indique une certaine diversité dans la perception thermique des occupants, avec une légère prédominance des sensations neutres à légèrement chaudes. Ces résultats

suggèrent que, même si l'environnement thermique est généralement acceptable, il existe des poches d'inconfort, notamment liées à la chaleur, qui pourraient justifier des actions ciblées pour améliorer le confort thermique et ainsi optimiser les conditions d'apprentissage.

**Figure 4 : Vote de sensation thermique pendant la saison des pluies sur l'échelle de ASHRAE**




*Source : Résultats travaux de terrain, janvier 2024*

La répartition des votes de sensation thermique pendant la saison des pluies montre une tendance différente par rapport à la saison sèche. La majorité des occupants (35%) se déclarent neutres, ce qui indique que les conditions thermiques sont jugées globalement confortables par un tiers des usagers.

Toutefois, une proportion notable de personnes ressente une sensation de fraîcheur : 30% déclarent une sensation légèrement froide et 15% une sensation froide, totalisant ainsi 45% des occupants. Cette prédominance des températures fraîches est attribuée à l'augmentation de l'humidité et à la baisse des températures ambiantes caractéristiques de la saison des pluies.

Les sensations de chaleur sont peu présentes, avec seulement 5% des répondants qui sont mode « chauds » et 15% en mode « légèrement chauds ». Personne ne rapporte de sensation très chaude, ce qui confirme que la chaleur excessive est peu ressentie durant cette période.

Enfin, aucun occupant n'a ressenti une température très froide, indiquant que les extrêmes de froid sont également absents.

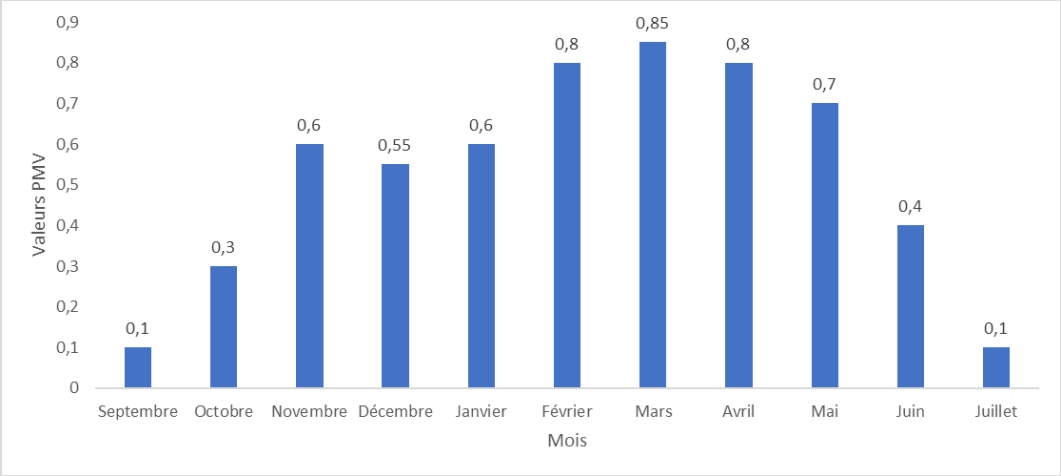
Cette distribution met en lumière une perception majoritairement orientée vers le frais, avec une large part des usagers pouvant ressentir un léger inconfort lié à des températures trop basses, ce qui pourrait affecter leur confort et potentiellement leur concentration. Ces résultats

suggèrent qu'en saison des pluies, les stratégies d'amélioration du confort devraient davantage prendre en compte la gestion des températures basses et de l'humidité.

### *3.2. Evolution du Vote Moyen Prévisible (PMV)*

Les valeurs de PMV pour chaque mois de l'année universitaire à l'Université d'Abomey-Calavi peut fournir une analyse visuelle du confort thermique tout au long de l'année 2022-2023. Selon le calendrier officiel, la rentrée universitaire 2022 – 2023 démarre le lundi 26 septembre dans les universités publiques et privées du Bénin. Elle prend fin le vendredi 31 juillet 2022. La figure 5 illustre l'évolution du vote moyen prévisible par mois.

**Figure 5 : Évolution des valeurs de PMV par mois sur la période universitaire**




*Source : Résultats travaux de terrain, janvier 2024*

L'analyse des valeurs de PMV sur la période universitaire de septembre à juillet révèle une variation saisonnière marquée du confort thermique dans les espaces d'enseignement de l'Université d'Abomey-Calavi. Les mois de septembre (PMV = 0,1) et juillet (PMV = 0,1) présentent les indices les plus bas, suggérant un confort thermique relativement neutre à légèrement frais, propice à de bonnes conditions d'apprentissage.

À partir d'octobre, on observe une augmentation progressive du PMV, avec une montée notable à partir de novembre (0,6), qui indique un début d'inconfort thermique modéré. Ce niveau se maintient de décembre à mai, avec des pics en février (0,8), mars (0,85) et avril (0,8), périodes où la sensation de chaleur devient plus marquée et pourrait impacter négativement la concentration et le bien-être des étudiants.

Le mois de juin marque un léger retour vers des conditions plus confortables avec un PMV de 0,4, indiquant un inconfort moindre, probablement lié à des températures plus modérées ou à

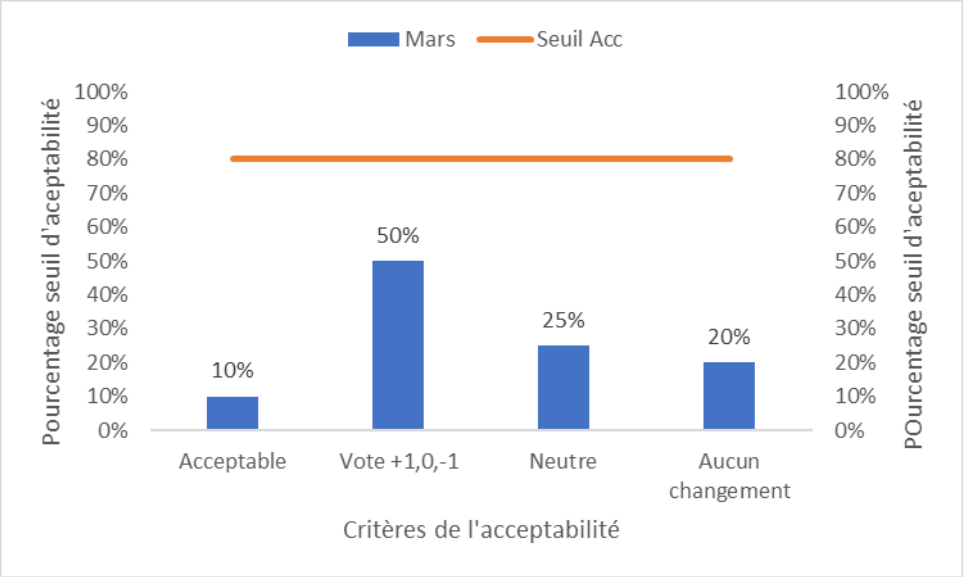
une meilleure ventilation. Cette tendance à la baisse se confirme en juillet, clôturant l'année universitaire sur une note de confort thermique acceptable.

Cette évolution met en évidence la nécessité de mettre en place des stratégies d'adaptation thermique, notamment pendant les mois les plus chauds (février à avril), afin d'optimiser les conditions d'apprentissage et de réduire le stress thermique des étudiants. Ces mesures doivent inclure une meilleure ventilation, l'utilisation de dispositifs de refroidissement passifs ou actifs, et l'ajustement des horaires de cours durant les périodes de pic thermique.

### *3.3. Évolution de l'acceptabilité thermique des salles de cours*

La figure 6 montre le degré d'acceptabilité de l'environnement thermique des salles de cours par saison.

**Figure 6 : Acceptabilité thermique pour le mois de mars**




*Source : Résultats travaux de terrain, janvier 2024*

La figure 6 illustre clairement un niveau d'acceptabilité thermique relativement faible pour le mois de mars, ce qui correspond à la période la plus chaude et donc potentiellement la plus inconfortable pour les apprenants. En effet, seulement 10 % des occupants ont jugé l'environnement thermique « acceptable », ce qui est nettement en dessous du seuil de 80 % généralement considéré comme satisfaisant.

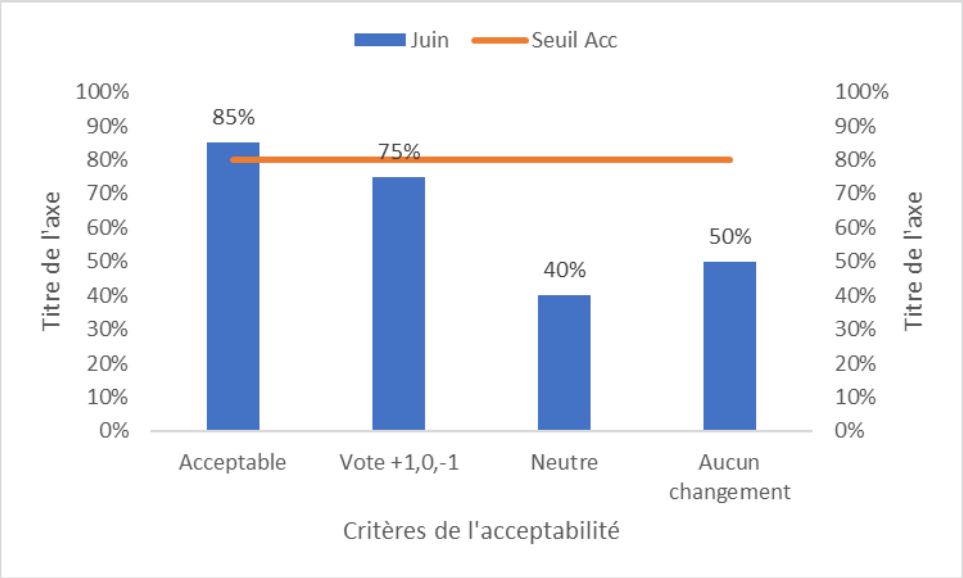
La somme des votes « +1, 0, -1 » atteint 50 %, ce qui indique une division importante entre les occupants satisfaits et insatisfaits, soulignant une expérience thermique mitigée dans les espaces d'enseignement durant ce mois. Cette proportion modérée reflète une insatisfaction prononcée mais pas unanime.

La catégorie « neutre » regroupe 25 % des réponses, témoignant qu'une part non négligeable des apprenants ne perçoit pas le confort thermique de façon tranchée, ce qui peut s'expliquer par des différences individuelles ou des variations locales de température dans les salles.

Enfin, seulement 20 % des occupants estiment qu'aucun changement n'est nécessaire, renforçant l'idée que la majorité ressent un besoin d'amélioration du confort thermique.

Cette figure 7 met donc en évidence un important inconfort thermique en mars, période où la chaleur excessive semble nuire à l'acceptabilité des conditions environnementales. Ces résultats suggèrent la nécessité d'interventions ciblées pour améliorer la ventilation, la climatisation ou d'autres stratégies de régulation thermique afin d'optimiser le bien-être et la concentration des étudiants pendant cette saison critique.

**Figure 7 : Acceptabilité thermique pour le mois de juin**




*Source : Résultats travaux de terrain, janvier 2024*

L'examen de cette figure 7 indique que le mois de juin présente des conditions plus favorables en termes de confort thermique par rapport à mars. En effet, 85 % des occupants jugent l'environnement thermique « acceptable », ce qui dépasse largement le seuil de 80 % d'acceptabilité habituellement requis pour qualifier un environnement thermique comme confortable. Ce taux élevé indique que la majorité des apprenants perçoivent les conditions climatiques comme convenables pendant ce mois.

Cependant, la somme des votes « +1,0,-1 » atteint 75 %, ce qui témoigne d'une légère insatisfaction malgré un environnement globalement jugé acceptable. Une proportion importante d'occupants (75 %) a attribué des notes positives ou négatives, suggérant que bien que l'environnement soit perçu comme acceptable, certains ajustements peuvent être

nécessaires pour améliorer encore le confort thermique, notamment en ce qui concerne l'humidité ou la ventilation.

La catégorie « neutre » représente 40 % des réponses, ce qui suggère que près de la moitié des occupants ont jugé les conditions thermiques comme moyennes, ni confortables ni inconfortables. Ce chiffre, bien que plus élevé que celui de mars, montre qu'il existe encore des individus qui ne ressentent pas de manière positive ou négative le confort thermique des espaces.

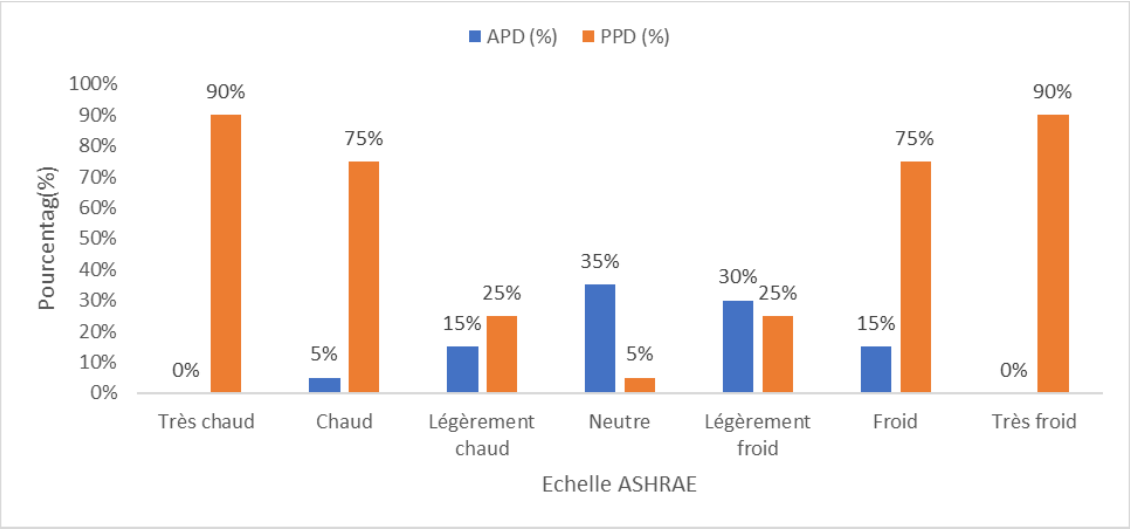
Enfin, 50 % des répondants ont indiqué qu'aucun changement n'était nécessaire. Ce chiffre indique que, bien qu'il y ait un certain nombre de suggestions ou de préoccupations concernant les conditions thermiques, une majorité perçoit les ajustements comme non essentiels pour maintenir une ambiance acceptable.

Le mois de juin, bien qu'encore marqué par une certaine hétérogénéité dans les perceptions de confort thermique, bénéficie d'une meilleure acceptabilité globale que le mois de mars. Toutefois, des améliorations peuvent encore être envisagées pour réduire le nombre de personnes ressentant un inconfort léger et renforcer l'homogénéité des conditions thermiques.

### *3.4. Comparaison entre le Pourcentage Actuel d'Insatisfaits (APD) et le PPD*

Cette section propose une comparaison entre le Pourcentage Actuel d'Insatisfaits (APD), estimé à partir des votes subjectifs des occupants selon l'échelle de sensation thermique ASHRAE à 7 points, et le Pourcentage Prévu d'Insatisfaits (PPD) calculé par le modèle de Fanger (norme ISO 7730) à partir des valeurs de PMV mesurées dans les salles de cours.

**Figure 8 : Comparaison ADP et PPD en fonction de la sensation thermique pendant la Saison des pluies**




*Source : Résultats travaux de terrain, janvier 2024*

La figure 8 illustre la comparaison entre le pourcentage d'insatisfaction réelle (APD) rapportée par les occupants et le pourcentage d'insatisfaction théorique (PPD) estimé par le modèle de Fanger, selon les différentes sensations thermiques durant la saison des pluies.

On observe d'abord une forte divergence pour les extrêmes thermiques. Pour les sensations « Très chaud » et « Très froid », le PPD est maximal (90 %), ce qui correspond à une forte insatisfaction théorique, alors que l'APD observé est nul. Cela peut s'expliquer par l'absence de ressentis extrêmes de chaleur ou de froid dans cette saison, ou par une tolérance plus élevée des occupants à ces conditions.

Dans les catégories « Chaud » et « Froid », le PPD reste élevé (75 %), tandis que l'APD est nettement plus faible (5 % et 15 % respectivement), indiquant une moindre insatisfaction réelle que celle anticipée par le modèle. Ce décalage peut suggérer que les occupants s'adaptent mieux à ces conditions, ou que le modèle surestime l'inconfort dans ces plages.

Pour les sensations « Légèrement chaud » et « Légèrement froid », les valeurs de PPD et APD sont plus proches : environ 25 % de PPD et respectivement 15 % et 30 % d'APD. Cela montre une concordance raisonnable entre insatisfaction perçue et prédite dans ces plages modérées d'inconfort thermique.

La catégorie « Neutre » présente la plus faible insatisfaction selon le modèle (5 %), ce qui correspond bien à la plus forte proportion d'occupants se déclarant neutres (35 %). Cela valide la pertinence du modèle pour prédire le confort dans cette zone thermique idéale.

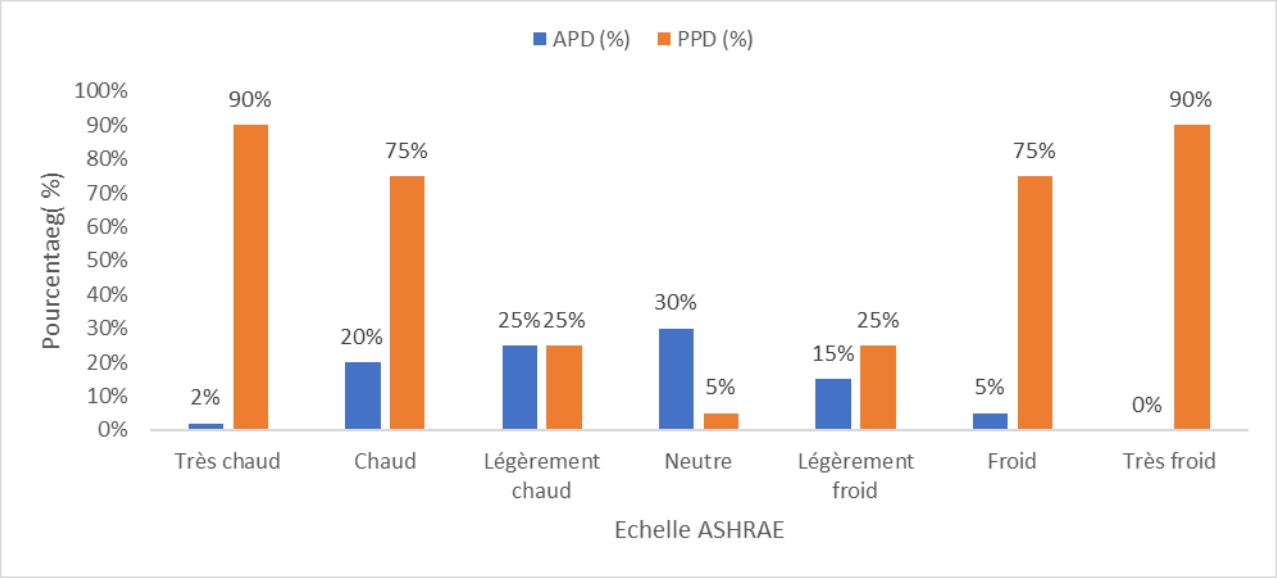
La figure 8 révèle donc que le modèle de Fanger prédit un taux élevé d'insatisfaction aux extrêmes thermiques, alors que les occupants semblent moins sensibles à ces extrêmes durant la saison des pluies. En revanche, dans les zones modérées (légèrement chaud/froid), la prédiction et la réalité sont mieux alignées. Ces écarts peuvent refléter des adaptations culturelles, des comportements locaux, ou des limites du modèle pour certaines conditions tropicales humides.

Cette analyse souligne l'importance de combiner mesures objectives (PPD) et évaluations subjectives (APD) pour une compréhension complète du confort thermique dans les environnements universitaires en climat tropical humide.

La figure 9 compare le Pourcentage Actuel d'Insatisfaits (APD) observé et le Pourcentage Prévu d'Insatisfaits (PPD) simulé par le modèle de Fanger en fonction des différentes sensations thermiques pendant la saison sèche. Sur la figure 9, on note une forte divergence aux extrêmes thermiques : pour la sensation « Très chaud », le PPD est très élevé (90 %), alors que seulement 2 % des occupants ont exprimé une insatisfaction réelle (APD). Cela indique que bien que le modèle prévoie un inconfort important en cas de fortes chaleurs, les occupants semblent

relativement moins sensibles à ces conditions, probablement en raison d'une certaine adaptation ou d'une tolérance locale.

**Figure 9 : Comparaison APD et PPD en fonction de la sensation thermique pendant la saison sèche**




*Source : Résultats travaux de terrain, janvier 2024*

De même, pour la sensation « Très froid », le PPD est aussi maximal (90 %), alors qu'aucun occupant n'a signalé ce ressenti (0 % APD), confirmant une absence d'inconfort thermique extrême lié au froid durant la saison sèche.

Dans les sensations « Chaud » et « Froid », on observe un écart notable : le PPD reste élevé (75 %), tandis que l'APD est modérée (20 % pour « Chaud » et seulement 5 % pour « Froid »). Ces écarts suggèrent que le modèle surestime l'insatisfaction liée à ces sensations ou que les occupants ont une meilleure tolérance aux températures chaudes et fraîches modérées.

Pour les sensations intermédiaires, la concordance est meilleure. En effet, la catégorie « Légèrement chaud » affiche un APD de 25 % et un PPD identique à 25 %, indiquant une bonne correspondance entre insatisfaction réelle et prévue. De même, la catégorie « Légèrement froid » montre un APD de 15 % face à un PPD de 25 %, ce qui reste proche et reflète une acceptabilité variable dans cette plage thermique.

La catégorie « Neutre » montre la plus faible insatisfaction attendue (5 % PPD), ce qui correspond bien à une proportion élevée d'occupants se déclarant confortables (30 % APD), validant le modèle pour cette zone de confort thermique.

Enfin, cette analyse montre que, durant la saison sèche, le modèle de Fanger prédit généralement plus d'insatisfaction contrairement à la perception des réelle les occupants,

surtout aux extrêmes thermiques. Cela reflète une certaine capacité d'adaptation locale ou des facteurs contextuels non pris en compte par le modèle. La bonne correspondance dans les zones intermédiaires indique que le modèle reste pertinent pour évaluer le confort thermique dans cette plage.

**4. Discussion**

Les résultats obtenus dans cette étude mettent en lumière l'importance d'évaluer le confort thermique dans les espaces universitaires tropicaux, un sujet qui reste peu exploré en Afrique subsaharienne (O. OGBONNA *et al.*, 2008, p. 5). L'observation d'un décalage entre le Pourcentage Actuel d'Insatisfaits (APD) et le Pourcentage Prévu d'Insatisfaits (PPD) corrobore la critique classique du modèle de Fanger (P.O. FANGER, 1970, p. 125), qui tend à surestimer l'inconfort thermique dans les environnements naturellement ventilés ou climats chauds et humides. Cette tendance a également été relevée dans d'autres études en milieux universitaires, où les occupants manifestent une adaptation comportementale et physiologique aux conditions locales, ce qui n'est pas toujours capté par les indices PMV/PPD (C. BURATTI et P. RICCIARDI, 2009, p. 680).

L'analyse saisonnière confirme que pendant la saison sèche, la perception d'inconfort thermique s'accroît avec une proportion notable d'occupants ressentant une chaleur « modérée » à « élevée », ce qui rejoint les constats de S. BENHARKAT et D. ROUAG-SAFFIDINE (2015, p. 24) dans des contextes similaires. Le mois de mars illustre cette situation critique où le confort thermique est perçu comme faible, suggérant une nécessité urgente d'intervention sur les infrastructures et les stratégies d'adaptation thermique. À l'inverse, la saison des pluies se caractérise par une meilleure acceptabilité thermique, bien que des inconforts liés à l'humidité et au refroidissement restent présents, soulignant la complexité des ambiances thermiques en climat tropical (S.P. CORGNATI *et al.*, 2009, p. 789).

Par ailleurs, la variation diurne du PMV et PPD, avec des pics d'inconfort observés aux heures les plus chaudes, s'aligne avec les recommandations de la norme ASHRAE 55 (2004, p. 18) qui insiste sur l'importance de la gestion thermique dans les bâtiments à usage éducatif. Des études similaires en Asie et en Europe ont démontré que l'amélioration du confort thermique passe par une gestion combinée de la ventilation naturelle, des protections solaires, et d'une adaptation vestimentaire appropriée (R.L. HWANG *et al.*, 2006, p. 60 ; M.A. NICO *et al.*, 2015, p. 115).

Enfin, cette étude renforce l'idée que le confort thermique en milieu tropical universitaire ne peut être évalué uniquement par des indices standardisés mais nécessite une approche hybride

croisant mesures objectives et retours subjectifs des utilisateurs (J. VAN HOOF, 2008, p. 185). La prise en compte des facteurs culturels, comportementaux et environnementaux propres au contexte béninois est essentielle pour formuler des recommandations pertinentes et efficaces en matière d'aménagement thermique.

**Remerciements**

Nous tenons à remercier vivement l'ensemble des enseignants et des étudiants, tout cycle confondu, qui ont accepté de participer à cette enquête et sans lesquels ce travail de recherche n'aurait pas pu aboutir.

**Conclusion**

Cette étude a permis de mieux comprendre la perception du confort thermique dans les espaces d'enseignement de l'Université d'Abomey-Calavi en climat tropical, en confrontant les données subjectives des usagers avec les indices objectifs PMV et PPD du modèle de Fanger. Les résultats montrent une diversité des ressentis thermiques selon les saisons, avec une insatisfaction marquée durant la saison sèche, notamment en mars, où seulement 10 % des occupants jugent les conditions acceptables. En revanche, la saison des pluies, particulièrement en juin, est perçue comme plus confortable, avec un taux d'acceptabilité atteignant 85 %. La comparaison entre le Pourcentage Actuel d'Insatisfaits (APD) et le Pourcentage Prévu d'Insatisfaits (PPD) révèle que le modèle de Fanger tend à surestimer l'inconfort aux extrêmes thermiques, tandis qu'une bonne concordance est observée dans les zones modérées de sensation thermique.

Au vu des résultats, pour améliorer le confort thermique dans les espaces d'enseignement universitaires il faudrait d'adapter les horaires de cours pour éviter les heures les plus chaudes, notamment entre midi et 15 heures, afin d'optimiser la concentration et le bien-être des étudiants.

Pour approfondir ces résultats, il serait pertinent d'étendre l'étude à d'autres universités de la région, afin de vérifier la généralisation des adaptations thermiques locales observées. L'intégration d'autres paramètres, tels que la qualité de l'air intérieur, le niveau de bruit, et la luminosité, pourrait aussi enrichir la compréhension globale du confort d'apprentissage. Une analyse longitudinale prenant en compte plusieurs années permettrait d'évaluer l'impact du changement climatique sur le confort thermique universitaire à moyen et long terme. «  »

**Références bibliographiques**

ASHRAE Standard 55, 2004, *Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating*, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 34 p.

BURATTI Cinzia, RICCIARDI Paola, 2009, « Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: correlation between experimental data and mathematical models », in *Building and Environment* 2009; 44, pp. 674-87.

BENHARKAT Sarah, ROUAG-SAFFIDINE Djamila, 2015, « Approche adaptative du confort thermique dans les espaces d'enseignement universitaire à Constantine (Algérie) », in *Nature & Technology,* pp.19-28.

CELIS-MERCIER Sitvestre, POTVIN André, DEMERS Claude, 2008, « The 'Pleasant' Temperature: Window Manipulation and Dynamics of Thermal Comfort in a Naturally Conditioned Space », in *Proceeding PLEA 2008 –25th Conference on Passive and Low Energy* Architecture, Dublin, 22-24 October 2008. Consulté le 04 août 2025, http://web5.arch.cuhk.edu.hk/server1/staff1/edward/www/plea2018/plea/2008/content/papers/poster/PLEA_FinalPaper_ref_687.pdf

CORGNATI Stefano Paolo, ANSALDI Roberta, FILIPPI Marco 2009, « Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid-seasons: assessment through objective and subjective approaches », in *Building and Environment* 2009, 44:785-792.

CORGNATI Stefano Paolo, FILIPPI Marco, VIAZZO Sara 2007, « Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort », in *Building and Environment;* 42: 951-959

DAVIES Morris Grenfell 2004, *Building Heat Transfer*, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-84731-2, 500 p.

DE GIULI Valerie., ZECCHIN Roberto, CORAIN Livio, SALMASO Luigi 2014, « Measurements of indoor environmental conditions in Italian classrooms and their impact on children's comfort », in *Indoor and Built Environment 24(5),* DOI:10.1177/1420326X14530586

EN ISO 7726, 1998, *Ergonomics of the Thermal Environment e Instruments for Measuring Physical Quantities.* International Standar, disation Organisation, Geneva, 51 p.

EN ISO 9920, 2007, *Ergonomics of the Thermal Environment e Estimation of Thermal Insulation and Water Vapour Resistance of a Clothing Ensemble.* International Standardisation Organisation, Geneva, 105 p.

FANGER Povl Olé 1970, *Thermal comfort-analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen (McGraw-Hill): Danish Technical Press 244 p.

HWANG Ruey-Lung, LIN Tzu Pin et KUO Nai-Jung 2006, « Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan », in *Energy and Buildings*, 38: 53-62. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.05.001

ISO7730 1994, *Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. Geneva: International Standards Organization; 26 p.

KNUDSEN Henrik & FANGER Povl Olé 1990, «The Impact of Temperature Step-Changes on Thermal Comfort », in *Proceedings of lNDOOR AIR 1990*, Toronto, Canada, (1):757-761.

NICO Maria Anna, LIUZZI Stefania, STEFANIZZI Pietro, 2015, « Evaluation of thermal comfort in university classrooms through objective approach and subjective preference analysis », in *Applied Ergonomics*; 48: 111-120

OGBONNA Chibueze, HARRIS Doug, 2008, « Thermal comfort in sub-Saharan Africa: field study report in Jos-Nigeria », in *Appl Energy*; 85(1):1–11.

VAN HOOF Joost 2008, « Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? », in *Indoor Air*; 18:182-201.

VON GRABE Jörn, WINTER Stefan, 2008, « The correlation between PMV and dissatisfaction on the basis of the ASHRAE and the McIntyre scale towards an improved concept of dissatisfaction, in *Indoor Built Environ*; 17 (2), 103-121.

WONG Nyuk Hien et KHOO Shan Shan, 2003, « Thermal comfort in classrooms in the tropics », in *Energy and Buildings 2003*, 35: 337-351. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00109-3

YE Guodong, YANG Changzhi, CHEN Youming, LI Yuguo 2003, « A new approach for measuring predicted mean vote (PMV) and standard effective temperature (SET∗)» in *Building and Environment* 38(1):33-44. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00027-6.

## Auteurs

[1]Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eaux, Écosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC)- Bénin, patrice.boko7@gmail.com

[2]Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eaux, Écosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC)- Bénin, fidelemedeou@gmail.com

[3]Ecole d'Agrobusiness et de Politiques Agricoles (EAPA), Université Nationale d'Agriculture (UNA), philippe_chabi@yahoo.fr

[4]Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eaux, Écosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC)- Bénin, cyr_gervais_etene@hotmail.com

[5]Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eaux, Écosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC)- Bénin, yafid2@yahoo.fr

[6]Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eaux, Écosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC)- Bénin, ogkelson@yahoo.fr

[7]Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eaux, Écosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC)- Bénin, exlaure@gmail.com

[8]Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eaux, Écosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (UAC)- Bénin, christpasse@yahoo.fr

[9]Faculty of Geography and Regional Studies, University of Warsaw, Warszawa, Pologne, kblazejczyk@uw.edu.pl