



HAL
open science

Pilotage des systèmes en rafraîchissement mixte centré sur le confort: une étude de sensibilité du modèle de Gagge pour une application en climat tropical.

Maxime Boulinguez, Jean Castaing-Lasvignottes, Aurélie Fouquier

► To cite this version:

Maxime Boulinguez, Jean Castaing-Lasvignottes, Aurélie Fouquier. Pilotage des systèmes en rafraîchissement mixte centré sur le confort: une étude de sensibilité du modèle de Gagge pour une application en climat tropical.. IBPSA Conference France 2024 (International Building Performance Simulation Association), IBPSA, May 2024, La Rochelle - Ile d'Oléron, France. hal-04669415

HAL Id: hal-04669415

<https://hal.univ-reunion.fr/hal-04669415v1>

Submitted on 8 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pilotage des systèmes en rafraîchissement mixte centré sur le confort: une étude de sensibilité du modèle de Gagge pour une application en climat tropical.

Maxime Boulinguez*^{1,2}, Jean Castaing-Lasvignottes¹, Aurélie Fouquier³

¹ *Laboratoire PIMENT Université de La Réunion, Sainte-Clotilde 97715, La Réunion, France*

*maxime.boulinguez@univ-reunion.fr

² *Laboratoire d'Ecologie Urbaine Réunion 137 rue Isautier, 97410 Saint Pierre, La Réunion, France*

³ *Université Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac, France*

RESUME. Les bâtiments en rafraîchissement mixte (MM : Mixed-mode) offrent la flexibilité nécessaire pour assurer à la fois, le confort et la réduction de la consommation d'énergie dans les climats tropicaux, en combinant simultanément plusieurs dispositifs de refroidissement tels que la climatisation et les ventilateurs de plafond. Pour les concepteurs, il est nécessaire de contrôler simultanément ces derniers pour évaluer performance énergétique et de confort dans la simulation énergétique du bâtiment (BEM : Building Energy Model), et ainsi, dimensionner les systèmes couplés en conséquence. Non seulement la température doit être contrôlée, mais la vitesse et la vêtue s'ajoutent désormais à la liste. Après une revue des modèles de confort les plus courants, des techniques d'analyse de sensibilité sont utilisées pour évaluer l'avantage du contrôle des paramètres environnementaux sur la variabilité de sortie du modèle de confort du bilan thermique, en particulier la SET (Standard Effective Temperature) du modèle de Gagge. Cela donne un premier aperçu des stratégies de contrôle des systèmes pour atteindre le confort dans différentes conditions intérieures chaudes d'été tropical.

MOTS-CLÉS : Confort thermique, sensibilité de modèles, stratégies de pilotage

ABSTRACT Mixed-mode (MM) buildings offer the flexibility to target both comfort and lower energy use in tropical climates by simultaneously combining several cooling devices, such as air conditioning and ceiling fans. For designers, a need arises to control simultaneously AC and fans to assess energy use, comfort performance in building energy models (BEM) and size coupled systems in accordance. Not only are temperature and relative humidity to be controlled but airspeed and clothing are now added to the list. Further a review of the common thermal comfort model, sensitivity analysis techniques are used to evaluate the benefit of controlling environment parameters on Thermal Heat Balance comfort model output variability, particularly Gagge's Standard Effective Temperature. This gives first insights into controlling systems strategies to target comfort in different tropical summer indoor conditions.

KEYWORDS : Thermal Comfort, Sensitivity of models, Control strategies

1. INTRODUCTION

Le climat tropical est caractérisé par des températures moyennes mensuelles du mois le plus froid supérieures à 18°C, et, en saison chaude, l'humidité relative est continuellement au-dessus de la fourchette optimale de 50%-60% (Belda et al. 2014). La moitié de la population mondiale sera amenée à vivre dans ce type de climat en 2050. L'augmentation conjoncturelle des revenus de ces populations s'accompagne naturellement d'un « droit au froid » (Rodriguez and D'Alessandro 2019). Il en résulte une augmentation de la demande en énergie liée au rafraîchissement des bâtiments. L'adoption de la climatisation comme unique moyen du maintien des conditions de confort en est la principale cause (Jim and Priyadarshi R Shukla 2022). Faire appel à la conception bioclimatique passive, basée sur la ventilation naturelle traversante est une alternative viable aux systèmes à compression mécanique mais atteint ses limites en conditions plus extrêmes. Qu'ils s'agissent de bâtiments neufs ou réhabilités, il

existe une solution intermédiaire consistant à utiliser simultanément brasseurs d'air et climatiseurs afin de réduire la consommation d'électricité notamment par la remontée de la consigne de température. En effet, cette dernière est rendue possible par le fait qu'une vitesse d'air accrue sur l'utilisateur conduit à une situation de confort même à température et/ou humidité élevée. Ce scénario est alors qualifié de *couplé* ou de *rafraîchissement mixte* (MM : Mixed Mode, Buildings or Cooling).

Pour les concepteurs, dans un cas de scénario couplé, il devient donc nécessaire, à minima, de contrôler simultanément, dans les simulations énergétiques des bâtiments (STD : Simulation Thermique Dynamique), le thermostat des climatiseurs et une grande plage de vitesse d'air sur les usagers. Ceci permet d'évaluer la consommation d'énergie, les performances de confort et de dimensionner les systèmes couplés en conséquence. Au-delà de la simulation des systèmes, intégrer la flexibilité vestimentaire dans le pilotage apparaît alors comme un autre levier d'amélioration simultanée du confort et des consommations. Réduire de 0.1 clo la vêtue équivaut à diminuer de 0.6°C la température opérative (Schiavon and Lee 2013). Cependant, cette ambition interroge la capacité des modèles à la prendre en compte.

Se pose alors la question de la capacité des modèles de confort usuels à répondre à ce besoin de pilotage en température, vitesse d'air et vêtue. Pour atteindre cet objectif, cet article s'attache à (1) identifier les limites et potentiels d'utilisation des modèles de confort les plus utilisés pour le cas du rafraîchissement mixte, et, (2) à réaliser une étude de sensibilité d'un modèle de confort pour évaluer la contribution des paramètres de pilotage du rafraîchissement couplé.

2. MODELISATION DU CONFORT

Normes et littérature opposent la modélisation du confort dans les bâtiments ventilés naturellement (approche empirique, AM : Adaptive Model) à celles des bâtiments climatisés (approche analytique dite de bilan thermique, THM : Thermal Heat-balance Model). Leur sélection, dans le cas du rafraîchissement mixte n'est pas triviale (Boulinguez et al. 2022). On se pose dans un fonctionnement où la climatisation est disponible, mais l'occupant est actif de son propre confort pour en réduire l'usage, de par notamment la manipulation des protections solaires, des ouvrants de ventilation et ventilateurs ou encore d'un code vestimentaire modulable. Dans un objectif de pilotage des systèmes couplés de rafraîchissement dans ces conditions, il est nécessaire de pouvoir agir à la fois sur la vêtue, la vitesse d'air (ventilateurs de plafond, ouverture des menuiseries) et la température de consigne des climatiseurs, ceci afin d'évaluer la réponse du modèle de prédiction du confort en conséquence.

Le modèle adaptatif, spécifique aux bâtiments ventilés naturellement (NV : Naturally Ventilated building) retranscrit le concept d'adaptabilité (physiologique, psychologique et comportementale) dans un modèle linéaire qui prend la forme $T_{confort} = a \cdot T_{rm} + b$, où T_{rm} est la température extérieure moyenne glissante des jours précédents. Sa simplicité permet son implémentation rapide dans un outil de STD pour le pilotage de la consigne de climatisation (Sánchez-García et al. 2023). Des travaux ont permis de mettre en évidence les fortes similitudes entre bâtiments ventilés naturellement et bâtiments en rafraîchissement mixte pour ce qui concerne l'adaptation des usagers et donc l'utilisation de ce modèle (Parkinson, de Dear, and Brager 2020). Par ailleurs, de nouvelles versions intégrant des paramètres environnementaux complémentaires pour la prise en compte de l'humidité relative (Vellei et al. 2017) sont développées. Malheureusement, aucun de ces modèles ne permet de considérer la vitesse d'air ou

la vêtture comme un paramètre pilotable à l'instar de la température de consigne, ce qui les exclue de notre étude.

L'approche adaptative des équations du bilan thermique tente de rationaliser le concept d'adaptabilité par des équations de la physique en la combinant à une réponse physiologique incarnée par les modèles analytiques THM. Ils sont composés d'une part analytique et d'une part adaptative. Il existe trois types d'adaptation de ces modèles combinés. La première consiste à corriger les résultats des modèles THM au travers de l'ajout d'un coefficient multiplicateur. Il peut être constant dans le cas du ePMV de Fanger et Toftum ou calculé à partir d'une base de données d'enquêtes de confort, comme c'est le cas du modèle de Gao *et al.* (Yao *et al.* 2022). La seconde, nommée ATHM (Adaptative Thermal Heat Balance Model), initiée par Schweiker *et al.*, consiste à modifier les paramètres individuels (met, clo) en entrée des modèles THM. Enfin, Parkinson *et al.* proposent un nouveau modèle adaptatif cette fois-ci basé sur la SET de type $SET_{confort} = a \cdot Trm + b$, issu du THM à deux nœuds de Gagge (Parkinson, de Dear, and Brager 2020).

Aucun de ces modèles combinés ne fait consensus. Pour notre objectif de pilotage couplé de systèmes de rafraîchissement, il est crucial de se poser la question de la sensibilité aux paramètres de pilotage du mode mixte (température, vitesse, vêtture) de leur part analytique, à savoir leur modèle THM (Fanger ou Gagge)

Les modèles THM effectuent le bilan thermique de l'occupant en établissant la différence entre la production de chaleur interne et les échanges par conduction, convection, rayonnement et respiration, avec l'ambiance afin d'évaluer l'écart à la neutralité thermique. Les principales différences entre les deux modèles THM précédemment cités se situent dans le fait que le modèle de Gagge prend à la fois en compte le stockage interne de chaleur et dispose d'un système de thermorégulation en régime transitoire. Le corps humain est représenté par un segment cylindrique dans lequel les échanges prennent place entre l'ambiance et deux nœuds représentant la peau et le corps. A l'inverse, le modèle de Fanger plus simplifié ne considère les échanges entre le corps et l'ambiance qu'en régime permanent dans un unique segment et nœud.

En climat tropical, les conditions d'ambiance intérieures qui atteignent régulièrement $T > 30^{\circ}\text{C}$, $HR > 60\%$, $0.5 \text{ ms}^{-1} < V < 2.5 \text{ ms}^{-1}$ vont au-delà du domaine de validité du PMV ISO7730 de Fanger (max 30°C , 1.0 ms^{-1}). Ce domaine est étendu ($0.1 \text{ ms}^{-1} < V < 2 \text{ ms}^{-1}$) par l'ASHRAE 55:2017 avec l'introduction du *cooling effect* déterminé à partir de la SET du modèle à deux nœuds de Gagge. L'autre aspect qui interroge sur la pertinence du PMV dans ces conditions est la prise en compte sommaire du phénomène d'évapotranspiration. Le modèle n'intègre ce dernier que par l'activité métabolique. Ainsi, à métabolisme fixé, l'évapotranspiration est constante quelles que soient les conditions d'ambiance. Dans des conditions chaudes et humides, cette hypothèse apparaît comme contre intuitive, l'influence des pertes de chaleur par évapotranspiration dépend fortement de la température et de l'humidité relative. Avec le modèle de Fanger, dans un cas d'activité de bureau de type dactylographie, relativement constante autour de 1.1 MET, les conditions d'ambiances, même extrêmes, n'auront aucune influence sur l'évapotranspiration pourtant motrice de la régulation du corps humain en condition chaudes.

Le modèle de Gagge intègre ce phénomène de manière plus complète. Il dépend à la fois de la mouillure de peau et de la différence de pression partielle de vapeur entre la peau et l'ambiance. Il démontre de

plus que la mouillure de peau, définie comme le rapport de l'évaporation à la surface sur la capacité maximale d'évaporation dans l'ambiance est un bon indicateur d'inconfort et de stress thermique, bien au-delà du taux de transpiration proposé par Fanger (Parsons 2020). De nombreux travaux mentionnent de plus la bonne performance du modèle, sur les conditions neutres ainsi que chaudes ou très chaudes avec un métabolisme faible (< 2 MET) (Vellei and Dréau 2020). Dans le cadre du pilotage couplé (température, vitesse d'air, vêtue) d'un bâtiment de bureaux en conditions chaudes, nous privilégierons donc l'étude de sensibilité du modèle à deux nœuds de Gagge. L'indice SET, apparaissant dans un premier temps comme l'indice de confort le plus opportun pour cette étude.

3. METHODOLOGIE

L'objectif est d'identifier les paramètres d'entrée du modèle Gagge qui produisent un impact significatif sur l'indice de confort SET. Pour cela, nous réalisons une analyse de sensibilité (AS) qui a pour objectif d'étudier la contribution relative de la variabilité des entrées sur la sortie d'un modèle. De nombreuses méthodes d'AS sont disponibles en fonction des objectifs fixés et des contraintes liées aux modèles (Iooss and Lemaître 2014). Les plus rapides à mettre en œuvre et peu coûteuses en temps de calcul sont celles dites de criblage, basées sur des plans OAT (One-at-A-Time) qui apportent une réponse qualitative. On citera la méthode de Morris pour la plus connue. Généralement plus coûteuses en temps de calcul mais apportant une information quantitative et d'une grande richesse, les méthodes globales GSA (Global Sensitivity Analysis) basées sur la décomposition de la variance sont les plus populaires. On pourra citer les indices de Sobol de premier ordre S_i qui donnent la variabilité de la sortie d'une fonction $Y = f(X_i)$ sachant la variabilité sur les entrées X_i divisée par la variabilité totale de Y , selon l'équation (1).

$$S_i = \frac{\text{Var}[\mathbf{E}[Y | X_i]]}{\text{Var}[Y]} \quad (1)$$

L'AS est utilisée dans le domaine du bâtiment depuis plusieurs décennies (Machard et al. 2020). Néanmoins, peu d'études se sont attachées à étudier la sensibilité des modèles THM, encore moins en conditions chaudes et humides et avec pour objectif le pilotage de systèmes de rafraîchissement. Moutela *et al.* montrent, avec une approche simplifiée de type OAT sur l'ensemble du domaine de validité du PMV, que le métabolisme et la température radiante sont les plus influents et que l'humidité relative et la vitesse d'air ne jouent qu'un rôle secondaire dans la déviation du PMV (Moutela, Carrilho, and Silva 2015). D'autres recherches se concentrent sur la sensibilité du PMV à la variation du métabolisme uniquement, sur un domaine identique à Moutela *et al.* (Hasan, Alsaleem, and Rafaie 2016). Enfin, Ji *et al.* étudient le modèle de Gagge et sa sensibilité à divers modèles de thermorégulation pour les comparer à la donnée mesurée afin de proposer une mise à jour du modèle à deux nœuds. En revanche, ils ne s'intéressent pas à la sensibilité aux entrées du modèle (Ji et al. 2021).

Afin de déterminer les indices de Sobol du premier ordre, nous utilisons la méthode GSA RBD-FAST (Random Balance Design Fourier Amplitude Sensitivity Test (Tarantola, Gatelli, and Mara 2006)) associée à la méthode de génération des tirages par permutation LHS (Latin Hypercube Sampling) qui est aussi économe en temps de calcul qu'une OAT et directement disponible dans la librairie python *SALib*. (Herman and Usher 2017)

4. CAS D'ETUDE

Le domaine d'étude est contextualisé grâce aux mesures environnementales sur un bâtiment MM démonstrateur en climat tropical pour la période du 12/2/2023 au 31/03/2023. Les extremums sont déterminés à partir des données moyennées sur 5 minutes avec une confiance de 6 écart-types (99.7% des points de mesures). La campagne de mesure, réalisée dans un bâtiment démonstrateur MM à Saint-Pierre de La Réunion, est décrite par (Haese et al. 2023). Dans ce dernier, il est difficile d'agir de manière indépendante sur l'humidité relative sans déshumidifier, il est cependant aisé et peu coûteux de la mesurer. Les plages de variation des paramètres d'entrée sont mentionnées dans le *tableau 1*, selon une distribution uniforme. Cinq séries de tirages ⁽¹⁾ sont réalisées pour des plages de 10% HR pour balayer un domaine de 45% à 95%.

	Humidité relative (rh) ⁽¹⁾	Température d'air (tdb)	Température radiante moyenne (tr)	Vitesse d'air (v)	Métabolisme (met)	Vêtûre (clo)
min	49 %	25.4°C	23.1°C	0.01 ms ⁻¹	Fixé à 1.1	0.29 CLO
max	88 %	32.1°C	31.2°C	2.2 ms ⁻¹	MET ⁽²⁾	0.79 CLO

⁽¹⁾ Mesures insitu ayant permis de déterminer les plages d'humidité relative pour les cinq séries de tirages [45 % : 55 %], [55 % : 65 %], [65 % : 75 %], [75 % : 85 %], [85 % : 95 %]

⁽²⁾ Valeur normative d'une activité dactylographique de bureau selon l'ISO7730

Tableau 1 : Domaine de variation des paramètres environnementaux et individuels pour l'étude de sensibilité.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Plusieurs analyses de sensibilité sont réalisées sur l'ensemble du domaine de variation avec un nombre de tirages variant de 50 à 20000. Cela nous permet de déterminer que 10000 tirages sont suffisants à la convergence des indices de Sobol. La méthode LHS, recommandée pour RBD-FAST est utilisée pour réaliser les 10000 tirages par plages de HR. Le modèle à deux nœuds est exécuté pour calculer la SET via la librairie *Pythermalcomfort v2.7* (Tartarini and Schiavon 2020) pour chaque tirage des cinq plages d'HR. Le temps d'exécution est de l'ordre de la minute sur un ordinateur de bureau.

Pour chaque série, l'étendue verticale d'un diagramme en violon (*figure 1*) permet d'apprécier la dispersion de la sortie Y (indice SET), l'étendue horizontale sa densité de probabilité. Les plages de confort et d'acceptabilité de la SET sont représentées en aplat de couleurs. Les extrémums, la valeur médiane de la série (tiré blanc) sont également représentés. La barre noire correspond à l'écart interquartile représentant 50% des données, centré sur la médiane. La *figure 1a* correspond à notre cas d'étude. On observe sans surprise que la probabilité d'inconfort augmente avec l'humidité relative. La dispersion de la SET augmente de 5°SET de la série [45 % : 55 %] à la série [85 % : 95 %]. En dessous de [65 % : 75 %] HR, il est possible d'avoir au moins 50% de la sortie dans la catégorie *confortable et acceptable* (vert) à *fraiche* (bleu). Les 50% restant sont majoritairement en zone *légèrement chaud* (jaune). Ce n'est qu'à partir de la plage [65 % : 75 %] HR que plus de 25 % des points sont en situation inacceptable (dégradé orange). Cette situation est exacerbée lorsque l'on supprime l'apport bénéfique de la vitesse d'air sur le confort ($v < 0.15\text{m/s}$) comme le montre la *figure 1b*. La médiane augmente alors de 3 à 7 °SET pour chaque série. Les maximums restent identiques mais les points minimums sont relevés de 5°SET, ce qui réduit la dispersion d'autant et place plus de 75 % des points dans les zones chaudes.

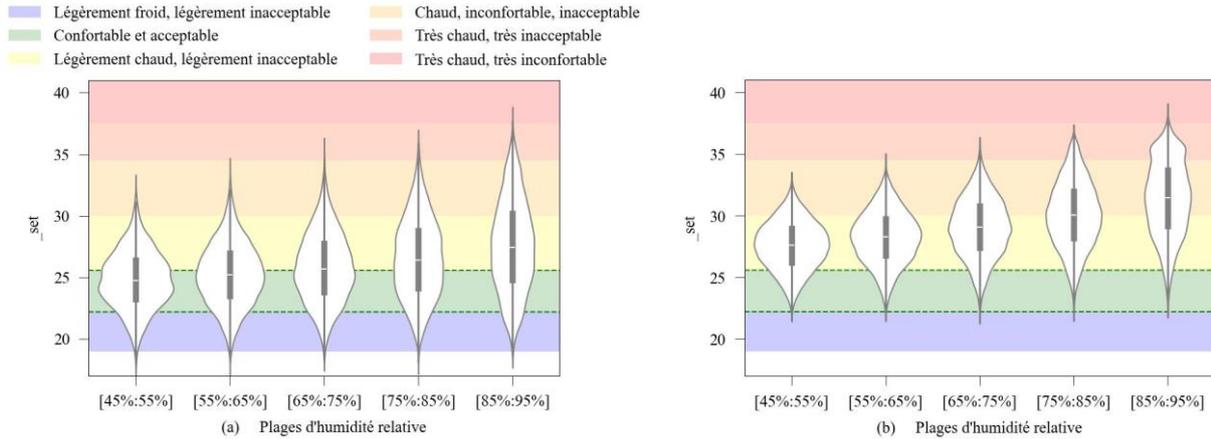


Figure 1 Domaine de variabilité de l'indice SET (Standard Effective Temperature) en fonction des plages d'humidité relative avec vitesses d'air représentatives du cas d'étude de 0.01 à 2.2 ms⁻¹ à gauche (a) et vitesses d'air hypothétiques faibles 0.01 à 0.15 ms⁻¹ (b)

Les variances partielles (figure 2a) représentent la contribution absolue des paramètres X_i sur la sortie Y . Elles sont exprimées en carré de Y , soit SET^2 . La figure 2b présente les indices de sensibilité S_i de premier ordre pour chaque paramètre d'entrée de chaque série. L'indice de Sobol est la variance partielle de Y sachant X_i , normalisée par la variance totale de Y (eq.1). Ces indices de Sobol représentent la contribution relative d'un paramètre sur la variabilité de la sortie. Au sein de chaque série, nous nous assurons que la somme des indices de Sobol est proche de 1 et que les barres d'erreur sont inférieures à 5% (figure 2b). Un paramètre dont l'indice est inférieur à 0.1 peut être considéré comme ayant une influence négligeable sur la sortie.

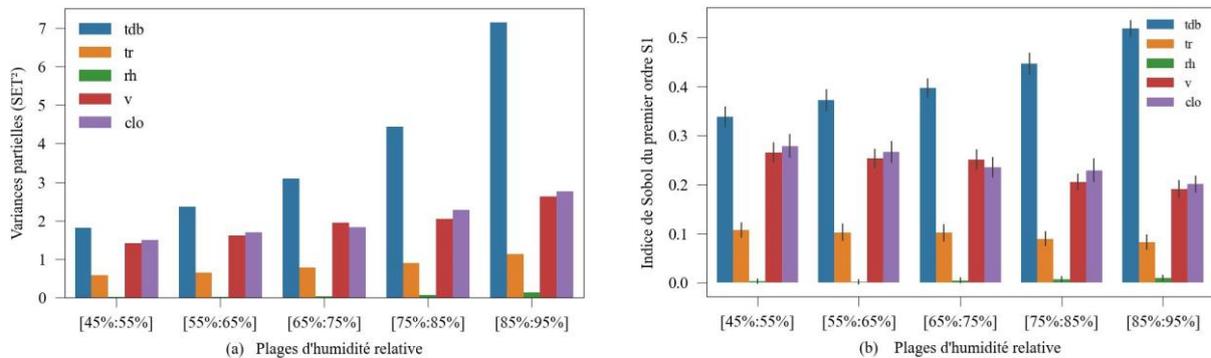


Figure 2 Influence des paramètres de pilotage sur la SET (Modèle à deux nœuds de Gagge). Représentation des indices de sensibilité de Sobol du premier ordre (a) et des variances partielles (b) en fonction de différentes plages d'humidité relative pour le cas d'étude en climat tropical

On constate sur la figure 2b, que les contributions relatives de la vitesse d'air (v) et de la vêtture (clo) sont du même ordre de grandeur quelles que soient les plages d'humidité relative. Elles sont relativement constantes à 0.25 de 45 % à 75 % d'HR et décroissent légèrement à partir de 75 % d'HR. Leur contribution réelle (figure 2a) augmente avec l'humidité relative pour approximativement doubler de la plage [45 % : 55%] HR à la plage [85 % : 95 %] HR. En d'autres termes, l'effet d'une action utilisateur sur un de ces deux paramètres aura deux fois plus d'impact sur la SET en conditions de forte humidité relative qu'en condition sèche. A faible humidité relative, la contribution relative (figure 2a) des deux paramètres (v) et (clo) est légèrement en dessous (0.25) de la contribution de la température (tdb) (0.35). Plus l'humidité relative augmente, plus l'écart se creuse. On passe de 0.1 point d'écart à [45 % : 55 %] à 0.15 point d'écart à [65 % : 75 %] pour atteindre finalement 0.35 points d'écart pour la série [85 % :

95 %]. Ainsi, une action utilisateur sur la vêtture et la vitesse d'air aura donc le même impact que sur la température à faible humidité relative. Cependant, l'impact sera au moins deux fois plus faible à partir de 75% d'humidité relative. Cela s'explique par le fait que plus l'humidité relative est importante dans l'ambiance, plus les échanges évaporatifs se font difficilement pour rétablir la température corporelle. A ce stade, il devient nécessaire d'agir sur la température de consigne (*tdb*) d'un climatiseur pour compléter les effets de (*v*) et (*clo*). Enfin, la contribution de la température rayonnante moyenne des parois reste marginale dans notre cas d'étude pour lequel le bâtiment est bien protégé des sollicitations solaires, tout comme une faible variation (10% max) d'humidité relative.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis dans un premier temps de poser la question de la pertinence des outils du confort à destination du pilotage des systèmes de rafraîchissement mixte en conditions tropicales. Pour ce climat, le modèle de Gagge présente un avantage par rapport à celui de Fanger, notamment de par une meilleure prise en compte du phénomène d'évapotranspiration, et, de par son caractère dynamique. Une analyse de sensibilité contextualisée à un cas d'étude en usage dans des conditions tropicales est proposée. Elle met en évidence les contributions relatives et réelles d'une action sur un paramètre d'entrée sur la SET issue du modèle à deux nœuds de Gagge. Elle a pour objectif de valider que la température n'est pas l'unique action pour rétablir une situation de confort, et apporte des éléments quantitatifs pour l'indice SET. Bien que l'action sur la température ait un impact toujours plus important que les autres paramètres, agir sur la vitesse d'air et la vêtture dans ces conditions tropicales est une solution alternative viable pour avoir un impact significatif sur la SET. En effet, jusqu'à environ 80% d'HR, une action combinée (*clo+v*) aura à minima le même impact que la seule action sur la température de consigne de climatisation. Au-delà, les transferts évaporatifs se trouvent limités.

L'étude présentée dans cet article est une première étape dans la sélection d'un modèle de confort pour un objectif de pilotage. Il reste que définir les conditions qui permettent de passer d'un mode de rafraîchissement à un autre, comme le mentionnent Parkinson *et al.* (Parkinson, de Dear, and Brager 2020) est un domaine de recherche fertile et dépendra de nombreux facteurs contextuels pour chaque bâtiment. La confrontation modèle – données mesurées s'annonce comme une deuxième étape incontournable pour le choix du modèle combiné basé sur un socle analytique comme le modèle de Gagge. Gardons à l'esprit que la modulation de vêtture et l'usage des ouvrants se font à coûts énergétiques nuls, l'usage de ventilateurs de plafonds à très faible consommation énergétique alors que la modulation de la climatisation génère une demande en électricité conséquente. Cette approche énergétique reste à intégrer dans la notion de pilotage. Enfin, ce type d'étude pourrait être un outil supplémentaire pour comparer différents indices de confort entre eux avant une implantation dans un algorithme de pilotage.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Belda, M, E Holtanová, T Halenka, and J Kalvová. 2014. 'Climate Classification Revisited: From Köppen to Trewartha'. *Climate Research* 59 (1): 1–13. <https://doi.org/10.3354/cr01204>.
- Boulinguez, Maxime, Aurélie Fouquier, Olivier Marc, and Castaing-Lasvignottes. 2022. 'Cartographie Des Modèles de Confort : Application Aux Bâtiments En Rafraîchissement Mixte En Climat Tropical'. In , 8. Châlons-en-champagne.
- Haese, Gwénaëlle, Maxime Boulinguez, Pierre Bernaud, and Anthony Couzinet. 2023. 'An Innovative Approach to Better Understand Hot Discomfort, Based on the Measurement of Global Human

- Responses, Including Physiological and Sensory Indicators - Application to End Users of Mixed Mode Cooled Buildings under Tropical Climate Conditions'. In *Ventilation, IEQ and Health in Sustainable Buildings*. Aalborg University, Copenhagen, Denmark.
- Hasan, Mohammad H., Fadi Alsaleem, and Mostafa Rafaie. 2016. 'Sensitivity Study for the PMV Thermal Comfort Model and the Use of Wearable Devices Biometric Data for Metabolic Rate Estimation'. *Building and Environment* 110 (December): 173–83. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.007>.
- Herman, Jon, and Will Usher. 2017. 'SALib: An Open-Source Python Library for Sensitivity Analysis'. *Journal of Open Source Software* 2 (9): 97. <https://doi.org/10.21105/joss.00097>.
- Iooss, Bertrand, and Paul Lemaître. 2014. 'A Review on Global Sensitivity Analysis Methods'. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.2405>.
- Ji, Lili, Abdelaziz Laouadi, Chang Shu, Liangzhu Wang, and Michael A. Lacasse. 2021. 'Evaluation and Improvement of the Thermoregulatory System for the Two-Node Bioheat Model'. *Energy and Buildings* 249 (October): 111235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111235>.
- Jim, Skea, and Priyadarshi R Shukla. 2022. 'IPCC AR6 WGIII FullReport - Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change'. 2022. https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf.
- Machard, Anaïs, Christian Inard, Jean-Marie Alessandrini, Charles Pelé, and Jacques Ribéron. 2020. 'Sensitivity Analysis of the Input Parameters Impacting Summer Thermal Discomfort in Buildings under Future Climate in Paris'. In . <https://cstb.hal.science/hal-04067828>.
- Moutela, Rui, João Dias Carrilho, and Manuel Gameiro Da Silva. 2015. 'Sensitivity of the pmv index to the thermal comfort parameters'. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3936.1447>.
- Parkinson, Thomas, Richard de Dear, and Gail Brager. 2020. 'Nudging the Adaptive Thermal Comfort Model'. *Energy and Buildings* 206 (January): 109559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109559>.
- Parsons, K. C. 2020. *Human Thermal Comfort*. CRC Focus. Boca Raton London New York: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Rodriguez, Carolina M., and Marta D'Alessandro. 2019. 'Indoor Thermal Comfort Review: The Tropics as the next Frontier'. *Urban Climate* 29 (September): 100488. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100488>.
- Sánchez-García, Daniel, Jorge Martínez-Crespo, Ulpiano Ruiz-Rivas Hernando, and Carmen Alonso. 2023. 'A Detailed View of the Adaptive-Comfort-Control-Implementation Script (ACCIS): The Capabilities of the Automation System for Adaptive Setpoint Temperatures in Building Energy Models'. *Energy and Buildings* 288 (June): 113019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113019>.
- Schiavon, Stefano, and Kwang Ho Lee. 2013. 'Dynamic Predictive Clothing Insulation Models Based on Outdoor Air and Indoor Operative Temperatures'. *Building and Environment* 59 (January): 250–60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.024>.
- Tarantola, S., D. Gatelli, and T. A. Mara. 2006. 'Random Balance Designs for the Estimation of First Order Global Sensitivity Indices'. *Reliability Engineering & System Safety* 91 (6): 717–27. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.06.003>.
- Tartarini, Federico, and Stefano Schiavon. 2020. 'Pythermalcomfort: A Python Package for Thermal Comfort Research'. *SoftwareX* 12 (July): 100578. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100578>.
- Vellei, Marika, and Jérôme Le Dréau. 2020. 'On the Prediction of Dynamic Thermal Comfort under Uniform Environments', 17.
- Vellei, Marika, Manuel Herrera, Daniel Fosas, and Sukumar Natarajan. 2017. 'The Influence of Relative Humidity on Adaptive Thermal Comfort'. *Building and Environment* 124 (November): 171–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.005>.
- Yao, Runming, Shaoxing Zhang, Chenqiu Du, Marcel Schweiker, Simon Hodder, Bjarne W. Olesen, Jørn Toftum, et al. 2022. 'Evolution and Performance Analysis of Adaptive Thermal Comfort Models – A Comprehensive Literature Review'. *Building and Environment* 217 (June): 109020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109020>.