



HAL
open science

Cartographie des modèles de confort : application aux bâtiments en rafraîchissement mixte en climat tropical

Maxime Boulinguez, Aurélie Fouquier, Olivier Marc, Jean Castaing-Lasvignottes

► To cite this version:

Maxime Boulinguez, Aurélie Fouquier, Olivier Marc, Jean Castaing-Lasvignottes. Cartographie des modèles de confort : application aux bâtiments en rafraîchissement mixte en climat tropical. IBPSA France 2022, IBPSA, May 2022, Chalons-en-Champagne, France. pp.1-8. cea-03988262

HAL Id: cea-03988262

<https://cea.hal.science/cea-03988262>

Submitted on 14 Feb 2023

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.

Cartographie des modèles de confort : application aux bâtiments en rafraîchissement mixte en climat tropical

Maxime Boulinguez^{*1,3}, Aurélie Fouquier², Olivier Marc¹, Jean Castaing-Lasvignottes¹

¹ *Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT) Université de la Réunion, Sainte-Clotilde 97715, La Réunion.*

² *Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac, France*

³ *Laboratoire d'Ecologie Urbaine Réunion 137 rue Isautier, 97410 Saint Pierre, La Réunion*

*maxime.boulinguez@univ-reunion.fr

RESUME. Les prospectives ADEME 2050 pour la climatisation font état d'un besoin à réduire la demande en rafraîchissement en privilégiant les solutions passives et en développant de nouveaux usages de la climatisation. Le rafraîchissement mixte est une solution alternative pour atteindre le confort d'été en climat tropical. Cet article fait un état des outils du confort à disposition de la recherche et des concepteurs pour le dimensionnement et le pilotage de ces nouveaux modes de rafraîchissement en cascade. Un cas d'étude illustre l'applicabilité des standards actuels au contexte climatique tropical, identifie certaines limites et ouvre des perspectives d'investigation des récentes recherches sur le sujet des modèles et indices de confort dans le bâtiment.

MOTS-CLÉS : Confort thermique, Rafraîchissement mixte, Climat tropical

ABSTRACT. The ADEME French Energy Agency 2050 foresights for air conditioning (AC) practices in buildings show an increased necessity to reduce the cooling demand by both passive solutions and new usages of AC systems. Mixed-mode cooling is an alternative solution for achieving summer comfort in a tropical climate. This article reviews the comfort tools available to researchers and designers for sizing and controlling these new cascade cooling systems. A case study illustrates the applicability of current standards to the tropical climate context. It points some limits and opens up for future investigation, focussing on recent research on the subject of comfort models and indices in buildings.

KEYWORDS : Thermal comfort, Mixed-mode cooling, Tropical Climate

1. INTRODUCTION

La demande énergétique liée au rafraîchissement devient un enjeu majeur en zone tropicale qui comprendra plus de 50% de la population mondiale en 2050 (Rodriguez et D'Alessandro 2019). La France compte, parmi ses territoires ultramarins, plusieurs cas de climat tropical gouvernés par une saison humide en été austral (Type Aw et As selon Köppen). Les villes de Saint-Pierre à La Réunion et de Pamandzi à Mayotte sont situées dans l'océan indien de part et d'autre de Madagascar. Les températures moyennes diurnes annuelles sur la plage [7h :18h] ne descendent pas en dessous de 23°C pour Saint-Pierre et 26°C pour Pamandzi. Elles présentent, respectivement sur leur période chaude une amplitude journalière de température de 24 à 34 degrés avec une hygrométrie supérieure à 75%. La conception des bâtiments prend alors une orientation principale de lutte contre l'inconfort d'été liée à la surchauffe des espaces.

Plusieurs modes de rafraîchissement des bâtiments sont décrits dans les standards internationaux (Carlucci et al. 2018) :

(1) Les principes architecturaux vernaculaires de ventilation traversante via de larges ouvertures permettent un rafraîchissement passif. Dans les standards internationaux, ce type de fonctionnement en *ventilation naturelle (NV : Naturally ventilated building)* fait appel au modèle empirique de confort adaptatif (*AM : adaptive model*). Celui-ci est dépendant linéairement de la température extérieure. Il

part du principe que l'utilisateur bénéficie d'une capacité d'adaptation physiologique et comportementale à des fins de rétablissement de sa situation de confort. Le rafraîchissement par ventilation naturelle est, par nature, très peu énergivore malgré l'utilisation ponctuelle de brasseurs d'air. Il reste cependant des périodes de l'année, souvent courtes, ou quelques situations ponctuelles où cette solution passive trouve ses limites (milieu urbain dense à faible potentiel de ventilation, contraintes acoustiques limitant l'usage des ouvertures dédiées à la ventilation).

(2) Une réponse aux périodes de chaleur plus intense est le traitement par rafraîchissement mécanique, reconnu dans les standards internationaux comme le mode *climatisé* (AC : *Air Conditioned building*). Celui-ci fait appel au modèle de confort phénoménologique basé sur les équations de bilan thermique, décliné dans l'indice PMV/PPD de Fanger (Predicted Mean Vote / Predicted Percentage Dissatisfied). Ce mode de rafraîchissement est très énergivore d'autant qu'en présence de climatisation des dérives peuvent s'observer : (a) les usagers tendent à être plus exigeants (température de confort plus basse, allongement de la période de climatisation pouvant tendre à l'année complète), (b) les concepteurs peuvent être plus laxistes sur la performance de l'enveloppe en absence de réglementation, partant du principe que la climatisation solutionne à elle seule le problème du confort. Ces dérives impactent à la fois le dimensionnement des systèmes et leur consommation.

(3) Il existe une solution intermédiaire, définie comme le *rafraîchissement mixte* (MM : *mixed mode cooling*) au sens de (Brager 2006). Cette solution, nommée *change over* est définie comme un rafraîchissement par climatisation et par ventilation naturelle opérant de manière différenciée sur une échelle de temps saisonnière ou journalière. En outre, l'usage d'un brasseur d'air (0.5-2.0 m/s) permet d'abaisser la température ressentie et par voie de conséquence de soit retarder l'allumage des climatiseurs soit de rehausser les températures de consignes de ces derniers. Il est alors envisageable de disposer d'un enchaînement en cascades (Figure 1) de différentes solutions et leur utilisation simultanée. Contrairement aux bâtiments en ventilation naturelle et climatisés, le bâtiment mixte ne dispose pas de son propre modèle de confort. Les standards les plus courants, l'ASHRAE Standard 55 (USA), l'ISO 7730-2009 et l'EN 16798 (Europe, ex EN 15251) ne proposent pas en effet de réel guide pour l'évaluation du confort pour ce type de rafraîchissement (J. Kim et al. 2019; Carlucci et al. 2018). C'est d'autant plus vrai en climat chaud et humide qui manque de recherches dans le domaine comme le mentionne Rodriguez et D'Alessandro (2019). L'EN 16798 ou l'IMAC (norme indienne) proposent bien une ouverture vers l'utilisation du modèle adaptatif pour les bâtiments mixtes mais précise qu'il n'est valable que si aucun système de climatisation n'est en fonctionnement ce qui écarte le couplage Brasseur d'air – Climatisation. Enfin, peu de recherches s'attachent à confronter et représenter les domaines de confort des différents indices entre-deux à l'instar des études de Attia et Carlucci (2015) qui proposent une comparaison de la demande en froid selon les modèles utilisés.

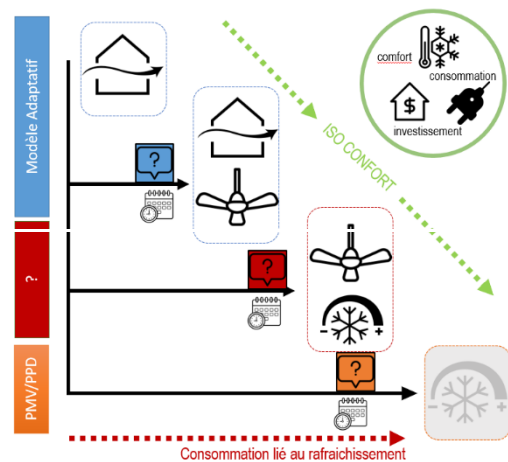


Figure 1 - Principe d'enchaînement en cascade en rafraîchissement mixte

Le cas du rafraîchissement mixte pose la question de comment allier le meilleur des deux mondes des bâtiments climatisés et ventilés naturellement. Le choix du modèle de confort, ou d'une combinaison de modèles devient la question prioritaire pour appréhender les transitions entre les modes de rafraîchissement. Aussi, avant de s'attacher à la recherche ou la mise en place de nouveaux outils, il apparaît intéressant de cartographier les liens existants entre les différents modèles de confort pour l'intérieur des bâtiments dans la continuité des travaux proposés par (Walther 2018b; 2018a) pour le confort des espaces semi-ouverts. A titre d'illustration, sur un cas d'étude de bureau dans deux climats tropicaux différents, nous proposons une représentation graphique mettant en avant le couple température-hygrométrie et la superposition des zones de confort pour une sélection de modèles de confort traditionnels.

2. EVOLUTION DES MODELES DE CONFORT ET PERSPECTIVES D'APPLICATION AUX BATIMENTS MIXTES

Deux grandes familles de modèles de confort pour le bâtiment sont aujourd'hui les plus représentées dans les standards et la littérature (Figure 2) :

La première contient les modèles issus des équations de bilan en régime permanent reposant sur des modèles de régulation thermique à un noeud (Fanger) ou à deux nœuds (Gagge). Ils permettent de calculer respectivement les indices du PMV (Predicted Mean Vote) ou de la SET (Standard Effective Température) et donnent une prédiction du confort ressenti par l'utilisateur après réaction physiologique provoquée par un stress thermique. Pour cela, ils demandent une multitude de paramètres d'entrée (température radiante et d'air, vitesse d'air, humidité relative, vêtue, métabolisme...).

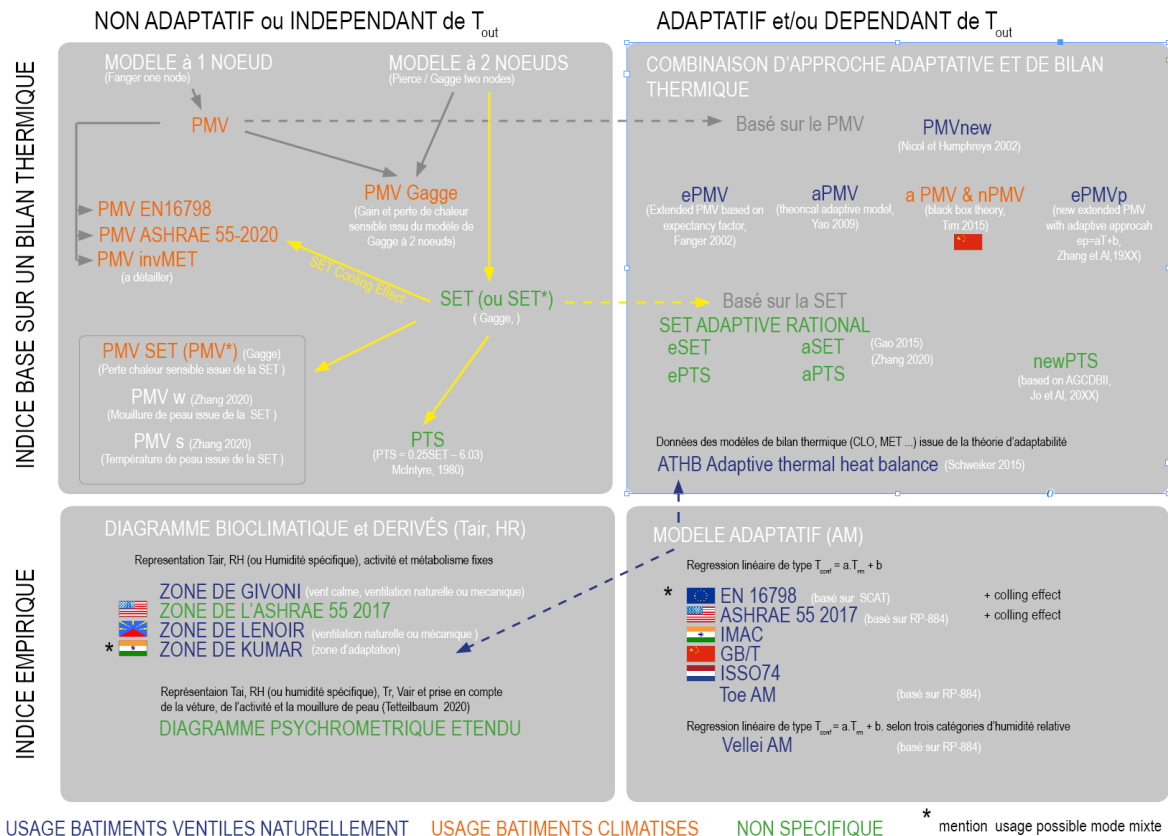


Figure 2 - Cartographie des modèles et indices de confort et récentes évolutions

La deuxième contient les modèles issus d'enquêtes de satisfactions dans une sélection plus ou moins variée en termes de bâtiment et de localisation. On y trouve des modèles aussi variés que ceux représentés sur le diagramme psychométrique, initiés par Givoni (1992) que le modèle adaptatif américain et son équivalent européen (basés respectivement sur les enquêtes confort RP-884 et SCAT) qui mettent en relation linéaire les conditions climatiques intérieures de confort avec les conditions climatiques extérieures. On retrouve également les variantes locales dans les normes Chinoise (GB/T 2000), Néerlandaise (ISSO74) ou Indienne (IMAC). Ces modèles adaptatifs émergent du constat que les sensations thermiques issues du PMV, initialement validées en conditions de laboratoire, n'étaient pas représentatives des votes réels dans les bâtiments ventilés naturellement ou les occupants bénéficient d'une grande capacité d'adaptation pour rétablir leur confort. S'instaure alors une dichotomie entre les modèles et les modes de fonctionnement du rafraîchissement dans les normes régissant le confort dans le bâtiment. L'on retiendra que dans les standards, comme dans la littérature, les recommandations vont dans le sens de l'utilisation du PMV dans les bâtiments climatisés et du modèle adaptatif dans les bâtiments ventilés naturellement.

Ainsi, les modèles dits traditionnels que sont ceux de Fanger (PMV-PPD), de Gagge (Température Standard Effective SET) ou de De Dear, Nicol (Modèles Adaptatifs) ont fait l'objet de nombreuses études de fiabilité. Par exemple, dans le prolongement des travaux de Humphreys et Fergus Nicol (2002), Cheung et al. (2019) ont montré une précision de la prédiction du PMV original (ISO7730) de 34% seulement, tout mode de rafraîchissement confondu, en utilisant la base de données de confort de l'ASHRAE (Global Comfort Data Base II). Ils font le lien avec la première tentative de Ole Fanger et Toftum (2002) d'apporter une réponse à la fiabilité du PMV en climat tropical pour les bâtiments passifs (ePMV, e : *expectancy factor*), mais généraliseraient *l'expectancy factor* à l'ensemble des climats.

Ces quinze dernières années, la recherche s'est axée sur des tentatives de combinaison et/ou d'adaptation mettant en avant un potentiel d'amélioration pour une meilleure prise en compte des trois facteurs d'adaptation physiologique, psychologique et comportementale. Récemment, Vellei et al. (2017) mettent en avant l'influence de l'humidité sur le confort proposant un nouveau modèle adaptatif. Kumar et al. (2016) apportent une révision des zones de confort sur le diagramme bioclimatique pour les climats indiens, à l'instar de Lenoir (2015) pour le climat réunionnais. Également, les modèles basés sur les équations de bilan font l'objet de combinaisons intéressantes afin d'améliorer le caractère adaptatif des indices de confort pour une meilleure prédiction. Gao, Wang, et Wargocki (2015) proposent aussi des coefficients correctifs adaptatifs pour le PMV et la SET basés sur des enquêtes de satisfaction en Chine, tout comme J. T. Kim et al. (2015) issus des précédents travaux de PMV New de Humphreys et Fergus Nicol (2002) mais en intégrant à la fois les notions de théorie de boîte noire et de confort adaptatif. Ils montrent de bons résultats sur la prédiction par rapport au PMV original. Schweiker et Wagner (2015) proposent quant à eux d'intégrer la notion d'adaptation dans les paramètres d'entrée nécessaires au calcul du modèle (CLO, MET) avec le model ATHB faisant cependant l'impasse sur la notion d'expectative des usagers. Enfin, des tentatives d'amélioration plus en profondeur s'attachent à modifier les équations même des modèles ou indices calculés, principalement se concentrant sur le modèle à deux nœuds de Gagge. Ce dernier apparaissant comme le plus fiable pour la zone de neutralité thermique, et, convenable pour les zones d'inconfort chaud (Vellei et Dréau 2020). Les équations de températures et de mouillure de peau sont utilisées dans un nouveau PMV dans les études de Zhang et Lin (2020a; 2020b). Vellei et Dréau (2020) mettent à jour et couplent le modèle dynamique de Fiala (DTS) avec le modèle en régime permanent de Gagge two-nodes. Ceci afin de calculer un nouvel indice PPD dynamique pouvant mieux rendre compte des rapides hausses et baisses de température de peau, comme cela peut être le cas du régime transitoire des conditions de vents (ventilation naturelle et brassage d'air) dans les bâtiments mixtes.

Ce travail de cartographie met en avant la diversité des modèles et indices pour l'évaluation du confort au sein des bâtiments, leurs interactions et les efforts d'amélioration de ces deux dernières décennies pour tendre vers le plus de justesse dans l'évaluation. L'application de ces indices au rafraîchissement mixte en climat tropical reste cependant peu investiguée.

3. CAS D'ETUDE

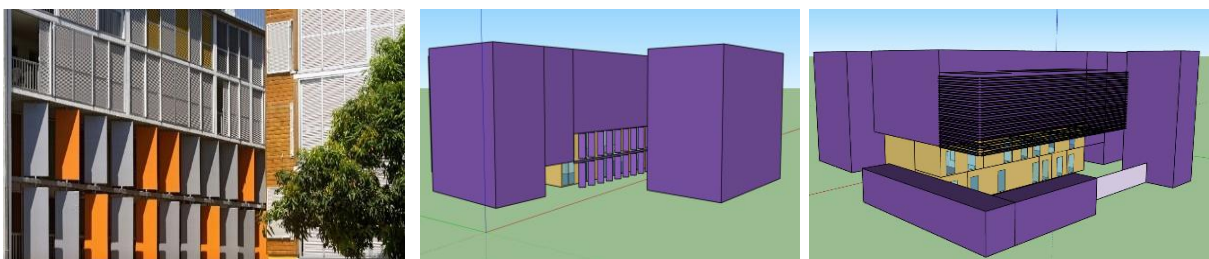


Figure 3 – Photographie et axonométries du bâtiment Ilet du Centre

Pour illustrer en partie les propos qui précèdent, un cas d'étude a été investigué dans deux climats tropicaux. Il s'agit de la zone openspace de l'opération Ilet du centre, projet mixte de logements et de bureaux situé au centre-ville de Saint-Pierre de La Réunion livré en 2008 (Figure 3). Le projet a fait l'objet d'une approche bioclimatique définie par les dispositifs techniques de contrôle solaire, de

ventilation traversante des locaux, de transparence aéraulique. Il est une référence à La Réunion afin d'atteindre le confort d'été. Le concept architectural pourrait être transposé sur d'autres territoires de la zone tropicale, selon les conditions climatiques et contraintes locales. Le cas d'étude a été modélisé sous Energy+. Les plannings d'occupations, d'utilisation des équipements électriques, d'éclairage, sont issus d'une compilation de campagne de relevés sur site sur la période 2020-2021 (Payet et al. 2022). Le planning d'utilisation des menuiseries de type jalousie a volontairement été fixé à 100% d'ouverture toute l'année afin d'établir un état de référence. Deux simulations sans climatisation pour un climat de La Réunion et un de Mayotte ont été réalisées. Une sélection d'indice de confort pour un niveau métabolique et d'isolation par la vêtue fixé ($MET = 1.1$, $CLO = 0.5$) est effectuée, en partie via la librairie *pythermalcomfort*, puis représentée sur le diagramme de l'air humide. En surimposition des zones de confort de Givoni et Lenoir, sont tracées des ellipses correspondant aux intervalles de confiance des couples confortables (température d'air sec (T_a), humidité relative (H_r)) pour un écart maximal à la moyenne de $\pm 2\sigma$ (σ : écart type), soit 95% des points. Les couples confortables (T_a , H_r) sont définis comme suit :

- PMV et ses variantes : points confortables compris dans l'intervalle $[-0.5 : 0.5]$;
- Température SET : points confortables compris dans l'intervalle $[22.2 : 25.6]$;
- Modèles adaptatifs : points compris dans les intervalles d'acceptabilité proposés par les normes.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Le bâtiment en rafraîchissement mixte, allie le meilleur des deux mondes des bâtiments climatisés et ventilés naturellement avec pour but de garantir le confort toute l'année en réduisant les consommations énergétiques liées au rafraîchissement. Il ne dispose cependant pas de son propre outil d'évaluation du confort. Au sens de la norme européenne EN16798, il est recommandé d'utiliser le modèle adaptatif pour la période ventilée naturellement et le PMV-PPD pour la période climatisée dans le cas d'un bâtiment en rafraîchissement mixte. La figure 4 montre pour notre cas d'étude à La Réunion, que la frontière entre la zone de confort (points oranges) et la zone d'inconfort chaud (points rouges) du PMV n'est pas franche. De plus, le modèle adaptatif appliqué aux conditions climatiques extérieures de La Réunion montre une inclusion de la zone de confort du PMV dans la zone des points confortables du modèle adaptatif EN 16798 – Cat II (Figure 4) Il apparaît impossible de déterminer une frontière permettant de passer de l'un à l'autre à des fins de détermination des deux périodes climatisées et ventilées naturellement. Le constat est similaire pour un climat de Mayotte.

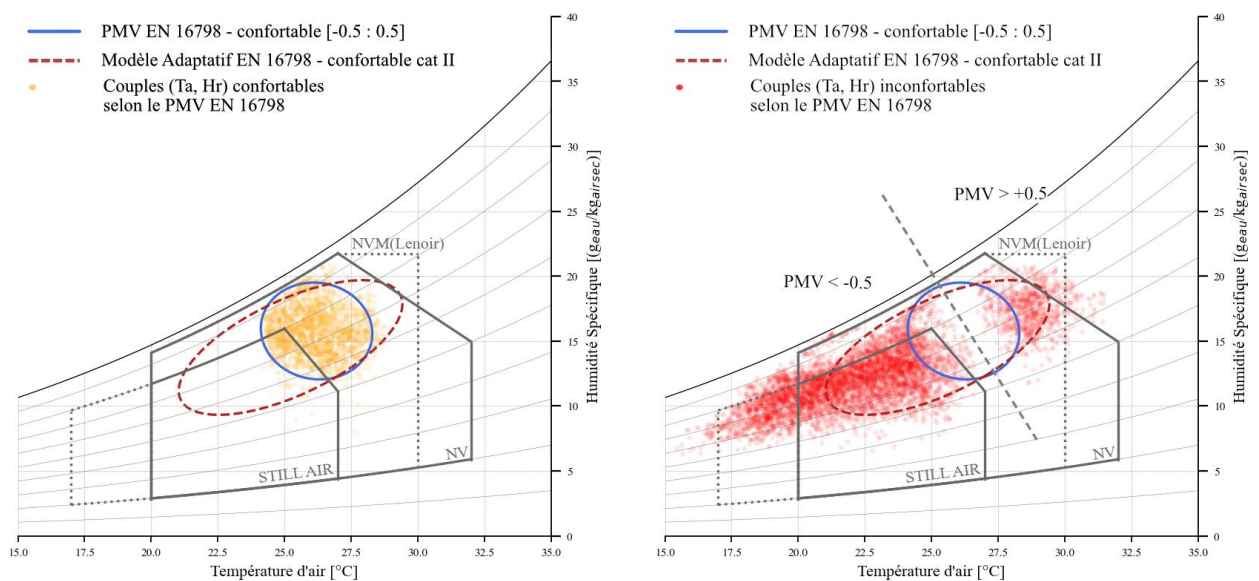


Figure 4 - Représentation sur diagramme psychrométrique (T_a , H_r) du PMV et de l'intervalle de confiance 95% (Bleu) selon l'EN16798 (gauche : couples confortables, droite : couples inconfortables), zone de Givoni et Lenoir en sous-imposition, modèle adaptatif EN16798 cat II en surimposition (Rouge). Cas de La Réunion – Saint Pierre.

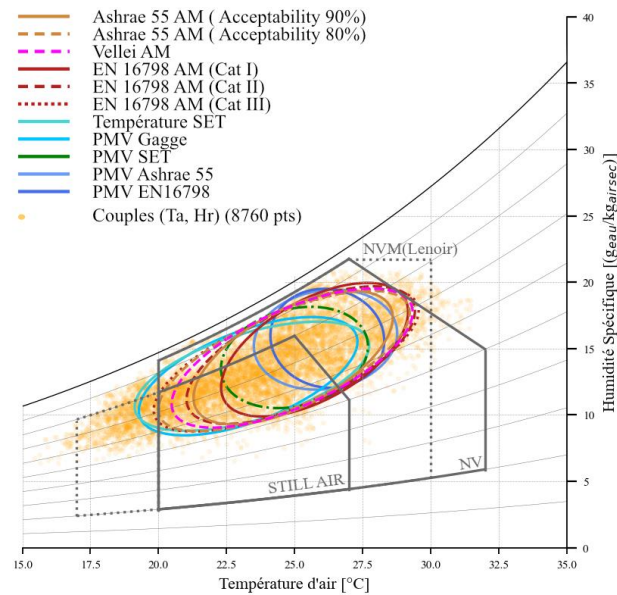


Figure 5 - superposition des ellipses de confiance des points confortables pour une sélection de modèles, 8760 couples (Ta, Hr) de l'année de simulation pour La Réunion.

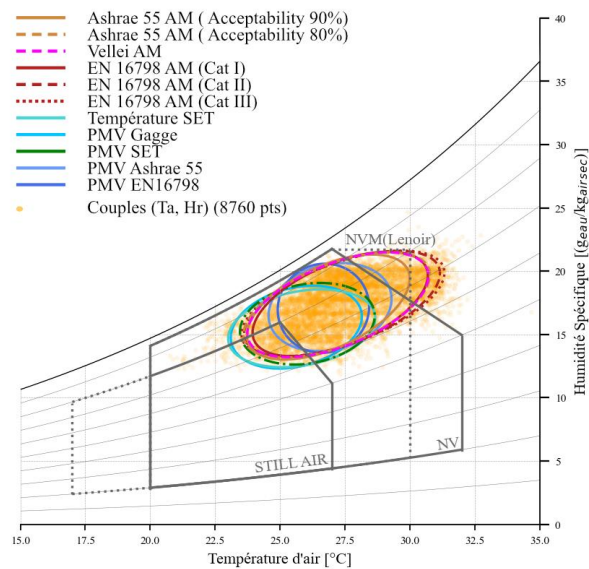


Figure 6 - superposition des ellipses de confiance des points confortables pour une sélection de modèles, 8760 couples (Ta, Hr) de l'année de simulation pour Mayotte.

En outre, en superposant d'autres modèles (Figure 5 pour le cas Réunionnais et Figure 6 pour le cas Mahorais), on observe un manque d'homogénéité quant à leur sensibilité au confort. Naturellement, les modèles adaptatifs sont très flexibles (ellipses rouges et orange), visant même pour les catégories peu contraignantes (ASHRAE 80% d'acceptabilité ou EN16798 Cat III) à englober tous les points, même au-delà 30°C. Il se pose la question de la borne haute d'application en termes de température moyenne glissante extérieure fixée dans les normes à 30°C (EN 16798) ou 33.5°C (ASHRAE 55). Les indices PMV basés sur les équations de Gagge (PMV SET et PMV Gagge) sont plus tolérants sur les couples de point tempérés [19°C ; 27°C] que les PMV issus équations de Fanger restreints sur une plage [23°C ; 28°C]. Enfin la représentation de la température SET reposant également sur les équations de Gagge n'apporte pas d'observation différenciante. Contre intuitivement pour ce cas en contexte tropical, le modèle adaptatif de Vellei récemment développé, dépendant de la température extérieure et de l'humidité relative intérieure, se confond avec le modèle adaptatif de l'EN 16798 Cat II, la prise en

compte de l'effet de vent dans les modèles adaptatifs traditionnels (*ce* : cooling effect) semble prévaloir sur notre cas d'étude. Enfin, les zones de Givoni et de Lenoir, indépendantes du climat extérieur voient également leurs limites comparées aux modèles adaptatifs pour les températures supérieures à 27°C comme l'illustre la nette différence entre les cas Réunionnais et Mahorais.

5. CONCLUSION

En l'état actuel et en dehors de toute validation par enquête de satisfaction, l'application directe des standards les plus courants ne semble pas pertinente pour notre cas d'étude en climat tropical humide. Les travaux récents sur la combinaison des modèles d'équation de bilan et de notion d'adaptabilité représentent une perspective pour l'application des bâtiments en rafraîchissement mixte. Un seul et unique indice pourrait alors être évalué sur une année complète afin de gérer l'intermittence des modes de rafraîchissements passif, mixte/couplé, actifs. Ce type de bâtiments bénéficie d'un système de climatisation tout en laissant simultanément à l'usager une maîtrise de son confort par d'autres moyens (brasseur d'air, protection solaire mobile), son fonctionnement pourrait donc être assimilé à un bâtiment climatisé dans les lesquels les utilisateurs auraient une grande capacité d'adaptation, et par voie de conséquence moins d'exigences en termes de consigne de température de confort ou de limite de confort. Ces modèles devront faire l'objet de validation sur des cas réels du rafraîchissement mixte en climat tropical, peu représentés dans la littérature. Partant du principe que la dichotomie PMV – Modèle adaptatif n'est pas aussi franche dans la littérature que dans la norme comme l'ont rapidement mis en avant Humphreys et Nicol en 2002 (Humphreys et Fergus Nicol 2002), l'utilisation d'un unique indice d'évaluation semble une piste à investiguer pour le cas du rafraîchissement mixte. Très dépendants des jeux de données à partir desquels ils ont été construits, les modèles adaptatifs nécessiteraient d'être géographiquement ou climatiquement repensés à l'instar de l'IMAC pour les différents climats tropicaux. Fiables dans la zone de neutralité thermique, les récentes évolutions des indices basés sur les modèles issus d'équations de bilan (notamment celle de Gagge) sont à investiguer dans le cas d'un climat chaud, humide, avec convection forcée. Ce dernier apparaît comme le plus représentatif tout en disposant d'une complexité en adéquation avec les simulations thermiques dynamiques utilisées pour la conception des bâtiments. Enfin, une représentation graphique multidimensionnelle des conditions de confort au sein des espaces, basée sur les conditions climatiques les plus influentes en climat tropical, reste à imaginer pour la conception, à l'image des travaux de Teitelbaum et Meggers (2017).

6. REFERENCES

- Attia, Shady, et Salvatore Carlucci. 2015. « Impact of Different Thermal Comfort Models on Zero Energy Residential Buildings in Hot Climate ». *Energy and Buildings* 102 (septembre): 117-28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.017>.
- Brager, Gail. 2006. « Mixed-Mode Cooling. » <https://escholarship.org/uc/item/3bb8x7b8>.
- Carlucci, S., L. Bai, R. de Dear, et L. Yang. 2018. « Review of Adaptive Thermal Comfort Models in Built Environmental Regulatory Documents ». *Building and Environment* 137 (juin): 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.
- Cheung, Toby, Stefano Schiavon, Thomas Parkinson, Peixian Li, et Gail Brager. 2019. « Analysis of the Accuracy on PMV – PPD Model Using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II ». *Building and Environment* 153 (avril): 205-17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>.
- Gao, Jie, Yi Wang, et Pawel Wargocki. 2015. « Comparative Analysis of Modified PMV Models and SET Models to Predict Human Thermal Sensation in Naturally Ventilated Buildings ». *Building and Environment* 92 (octobre): 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.030>.
- Givoni, Baruch. 1992. « Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines ». *Energy and Buildings* 18 (1): 11-23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K).

- Humphreys, Michael A, et J Fergus Nicol. 2002. « The Validity of ISO-PMV for Predicting Comfort Votes in Every-Day Thermal Environments ». *Energy and Buildings* 34 (6): 667-84. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X).
- Kim, Jeong Tai, Ji Hyun Lim, Sun Ho Cho, et Geun Young Yun. 2015. « Development of the Adaptive PMV Model for Improving Prediction Performances ». *Energy and Buildings* 98 (juillet): 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.051>.
- Kim, Jungsoo, Federico Tartarini, Thomas Parkinson, Paul Cooper, et Richard de Dear. 2019. « Thermal Comfort in a Mixed-Mode Building: Are Occupants More Adaptive? » *Energy and Buildings* 203 (novembre): 109436. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109436>.
- Kumar, Sanjay, Jyotirmay Mathur, Sanjay Mathur, Manoj Kumar Singh, et Vivian Loftness. 2016. « An Adaptive Approach to Define Thermal Comfort Zones on Psychrometric Chart for Naturally Ventilated Buildings in Composite Climate of India ». *Building and Environment* 109 (novembre): 135-53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.023>.
- Lenoir, Aurélie. 2015. « On Comfort in Tropical Climates. The Design and Operation of Net Zero Energy Buildings. », 236.
- Ole Fanger, P., et Jørn Toftum. 2002. « Extension of the PMV Model to Non-Air-Conditioned Buildings in Warm Climates ». *Energy and Buildings* 34 (6): 533-36. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8).
- Payet, Maareva, Mathieu David, Philippe Lauret, Manar Amayri, Stéphane Ploix, et François Garde. 2022. « Modelling of Occupant Behaviour in Non-Residential Mixed-Mode Buildings: The Distinctive Features of Tropical Climates ». *Energy and Buildings* 259 (mars): 111895. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111895>.
- Rodriguez, Carolina M., et Marta D'Alessandro. 2019. « Indoor Thermal Comfort Review: The Tropics as the next Frontier ». *Urban Climate* 29 (septembre): 100488. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100488>.
- Schweiker, Marcel, et Andreas Wagner. 2015. « A Framework for an Adaptive Thermal Heat Balance Model (ATHB) ». *Building and Environment* 94 (décembre): 252-62. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.018>.
- Teitelbaum, Eric, et Forrest Meggers. 2017. « Expanded Psychrometric Landscapes for Radiant Cooling and Natural Ventilation System Design and Optimization ». *Energy Procedia* 122 (septembre): 1129-34. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.436>.
- Vellei, Marika, et Jérôme Le Dréau. 2020. « On the Prediction of Dynamic Thermal Comfort under Uniform Environments », 17.
- Vellei, Marika, Manuel Herrera, Daniel Fosas, et Sukumar Natarajan. 2017. « The Influence of Relative Humidity on Adaptive Thermal Comfort ». *Building and Environment* 124 (novembre): 171-85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.005>.
- Walther, Edouard. 2018a. « Indicateurs de confort ». *AREP L'Hypercube - Blog* (blog). 2018. <https://lhypercube.arep.fr/confort/indicateurs-de-confort/>.
- . 2018b. « Modélisation du confort dans les espaces ouverts et semi-ouverts ». *La construction responsable*, juillet. <https://doi.org/10.51257/a-v1-c8120>.
- Zhang, Sheng, et Zhang Lin. 2020a. « Standard Effective Temperature Based Adaptive-Rational Thermal Comfort Model ». *Applied Energy* 264 (avril): 114723. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114723>.
- . 2020b. « Predicted Mean Vote with Skin Temperature from Standard Effective Temperature Model ». *Building and Environment* 183 (octobre): 107133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107133>.