



**HAL**  
open science

# Projet TROPIC pour l'étude du rafraîchissement passif des écoles polynésiennes dans un contexte de changement climatique: confort thermique, qualité de l'air, santé cognitive et réduction des consommations électriques

Franck Lucas, Emmanuel Bozonnet, Mikael Boulic, Virgile Lodzinski

## ► To cite this version:

Franck Lucas, Emmanuel Bozonnet, Mikael Boulic, Virgile Lodzinski. Projet TROPIC pour l'étude du rafraîchissement passif des écoles polynésiennes dans un contexte de changement climatique: confort thermique, qualité de l'air, santé cognitive et réduction des consommations électriques. IBPSA France, May 2024, Oléron (FR), France. pp.413-420. hal-04587632

**HAL Id: hal-04587632**

**<https://hal.science/hal-04587632>**

Submitted on 24 May 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

# **Projet TROPIC pour l'étude du rafraîchissement passif des écoles polynésiennes dans un contexte de changement climatique : confort thermique, qualité de l'air, santé cognitive et réduction des consommations électriques**

**Franck Lucas<sup>1</sup>, Emmanuel Bozonnet<sup>2</sup>, Mikael Boulic<sup>3</sup>, Virgile Lodzinski<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup> Université de la Polynésie française**

**Laboratoire GEPASUD**

B.P. 6570 - 98702 Faa'a - Tahiti - Polynésie française

[Franck.lucas@upf.pf](mailto:Franck.lucas@upf.pf)

**<sup>2</sup> La Rochelle Université, LaSIE umr CNRS 7356, av. Michel Crépeau, 17042 la Rochelle**

**<sup>3</sup> Massey University, Auckland Campus. School of Built Environment. Albany 0632. New Zealand**

---

*RESUME. Localisés en zones tropicales humides, les établissements scolaires polynésiens sont exposés à des sollicitations climatiques extérieures fortes marquées par des températures, des humidités relatives et des rayonnements solaires élevés. Les élèves sont dans ce cas très souvent en situations de stress thermique qui peuvent affecter leur santé cognitive et leurs capacités d'apprentissage. La qualité de l'air dans les bâtiments peut avoir un impact sur les capacités cognitives qui pour l'instant reste mal connu pour les climats tropicaux. Le projet TROPIC a pour objectif d'évaluer les conditions intérieures dans les établissements scolaires en Polynésie et de définir si celles-ci sont compatibles avec les objectifs d'apprentissage attendus dans ce type de bâtiments. Il comportera des campagnes expérimentales des conditions de confort et de qualité de l'air intérieur combinées avec des tests de performance cognitive en ligne standardisés. Une approche numérique définira les prescriptions constructives pour le climat actuel en Polynésie mais aussi dans le contexte du changement climatique pour des conditions futures à l'horizon 30 ans avec la possibilité de fortes vagues de chaleur.*

*MOTS-CLÉS : Confort thermique, santé cognitive, changement climatique*

---

## **1. INTRODUCTION**

Les conditions de confort dans les locaux d'enseignement situés en climat chaud ont été analysées depuis de nombreuses années (Humphreys 1977, Wong 2003, Kruger 2004) mais ont été aussi le sujet de recherche plus récentes (Talukdar 2020, Guevara 2021, Aparicio-Ruiz 2021). Les études analysant la qualité de l'air dans les locaux d'enseignement ont particulièrement augmenté ces dernières années mais elles concernent principalement les climats tempérés ou froids comme le précise Sadrizadeh (2022). Cette revue d'articles met en évidence le lien, avéré, entre la performance cognitive et le confort ainsi que le lien entre la performance cognitive et la qualité de l'air. La qualité environnementale intérieure (QEI) des bâtiments incluant la perception du confort thermique et de la qualité de l'air par les occupants est donc un sujet de recherche important qui concerne l'ensemble des bâtiments mais aussi plus spécifiquement les locaux d'enseignement. En effet, il a été établi que les élèves ont une perception de la QEI bien différente de celle des adultes et que cela affecte leurs capacités cognitives (Lee 2000, Wargocki 2019, Wargocki 2020).

La prise en compte de la consommation énergétique des écoles et le lien avec la QEI est aussi un élément important à considérer car on pourrait imaginer que l'amélioration de la qualité des ambiances peut entraîner une surconsommation énergétique. Des études alertent sur cette éventualité et préconisent des stratégies de ventilation adaptées (Becker 2007). Mais dans certaines écoles, il faut noter qu'il n'a

pas été démontré de corrélation positive entre la consommation énergétique des bâtiments et la qualité des environnements intérieurs du fait de l'intervention des occupants sur les équipements électriques (Zhang 2021).

La problématique de la QEI des salles de classe en climat tropical est abordée dans certaines études (Lee 2000, Wong 2003, Talukdar 2020). Dans ce cas, les conditions d'expérimentation sont différentes, puisque la plupart du temps la ventilation est assurée par les ouvrants du bâtiment, le taux de renouvellement d'air n'est pas réellement contrôlé et donc pas mesuré.

Le projet TROPIC a pour objectif d'évaluer les conditions intérieures dans les écoles de Polynésie française et de vérifier si celles-ci sont compatibles avec les objectifs d'apprentissage des élèves. Ainsi, le projet analysera les conditions de confort et la qualité de l'air dans les écoles et établira le lien avec la santé cognitive des élèves. Ces problématiques seront abordées pour les conditions climatiques actuelles mais la perspective d'un changement climatique entraînant une aggravation du stress thermique sera aussi envisagée. Cet article présente le projet TROPIC avec le contexte thermique connu des écoles en Polynésie française ainsi que les méthodologies pour caractériser le stress thermique et la santé cognitive dans un contexte de changement climatique.

## 2. ANALYSE DES CONDITIONS INTERIEURES DANS LES SALLES DE CLASSE EN POLYNESIE

Les conditions de confort thermique dans les salles de classes en Polynésie ont été étudiées dans un précédent projet (Projet COBIOPOL) pour des locaux de conception ancienne (Figure 1) et récente (Figure 2). La différence de conception porte principalement sur les matériaux utilisés. Les écoles de conception ancienne sont des structures légères alors que les écoles de conception récente sont des structures lourdes en béton.



*Figure 1 : Ecole de conception ancienne (Papetoai)*



*Figure 2 : Ecole de conception récente (Teavaro)*

Les mesures réalisées dans ces deux cas, ont mis en évidence des situations d'inconfort thermique notable. Sur l'ensemble des salles de classe, les niveaux de températures sont assez élevés avec pour certaines salles des valeurs atteignant régulièrement 34°C (Figure 3).

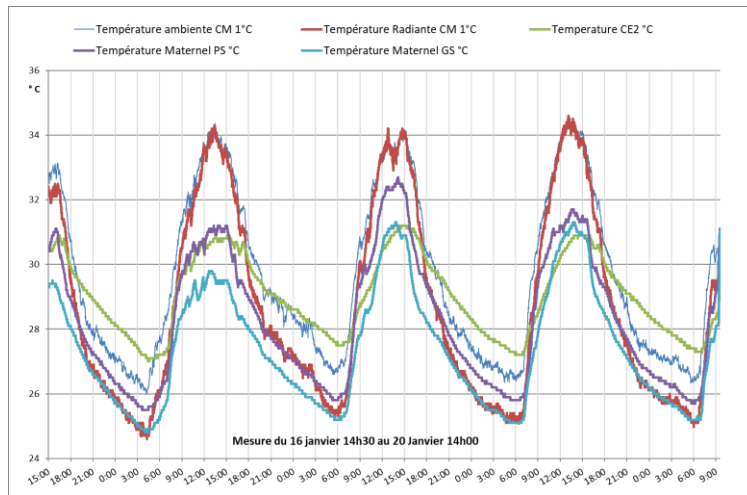


Figure 3: Évolution des températures dans différentes salles de classe du 16 au 20 janvier.

La conception et l’exploitation des locaux apparaît défailante car même si les locaux anciens et récents adoptent les principes de la ventilation naturelle, les températures intérieures sont très souvent bien supérieures aux températures extérieures. La température de globe noir est proche voire inférieure à la température sèche d’air, laissant imaginer que l’isolation des parois est plutôt bonne mais que l’évacuation des charges internes n’est pas assurée.

Ces conditions intérieures s’expliquent donc en partie par une ventilation traversante qui ne s’opère pas correctement la journée et la nuit. Une mauvaise gestion des ouvrants par les usagers qui ferment les jalousies la nuit et occultent les ouvertures par des rideaux le jour, conduit à vitesse d’air faible dans les pièces empêchant l’évacuation des charges internes (Figure 4). Que se soit dans les écoles récentes ou anciennes, les conditions intérieures sont la plupart du temps en dehors des zones de confort du diagramme de Givoni (Figure 5).

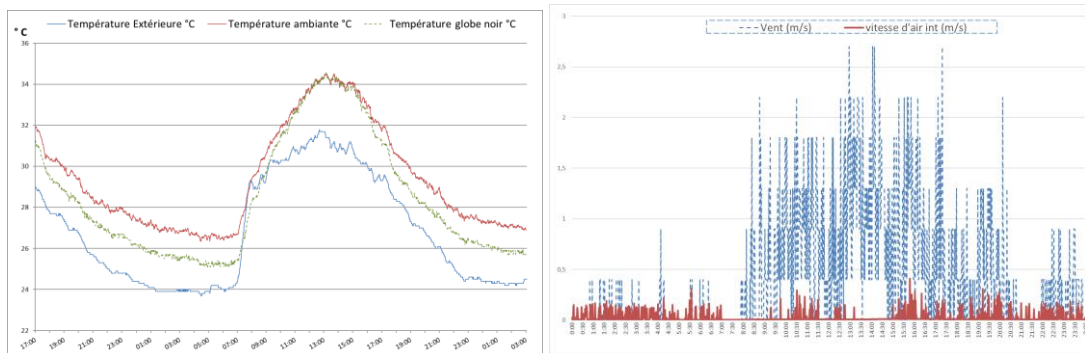


Figure 4 : Evolution des températures ambiante et de globe noir intérieures et de la température extérieure (gauche) et comparaison de la vitesses d’air intérieur et du vent (droite)

Sur la base des conditions climatiques actuelles, les conditions de confort dans les salles de classe en Polynésie ne sont donc généralement pas acceptables. L’analyse de la qualité de l’air intérieur n’a pas encore été réalisée mais elle devrait confirmer le manque de renouvellement d’air observé sur les mesures thermiques. On peut donc s’interroger sur les capacités d’apprentissage des élèves dans de telle situation et les impacts sur la santé cognitive. Une dégradation potentielle de ces conditions dans un contexte de changement climatique peut apparaître préoccupante. Les analyses proposées par le projet TROPIC sur ces problématiques sont proposées ci-après.

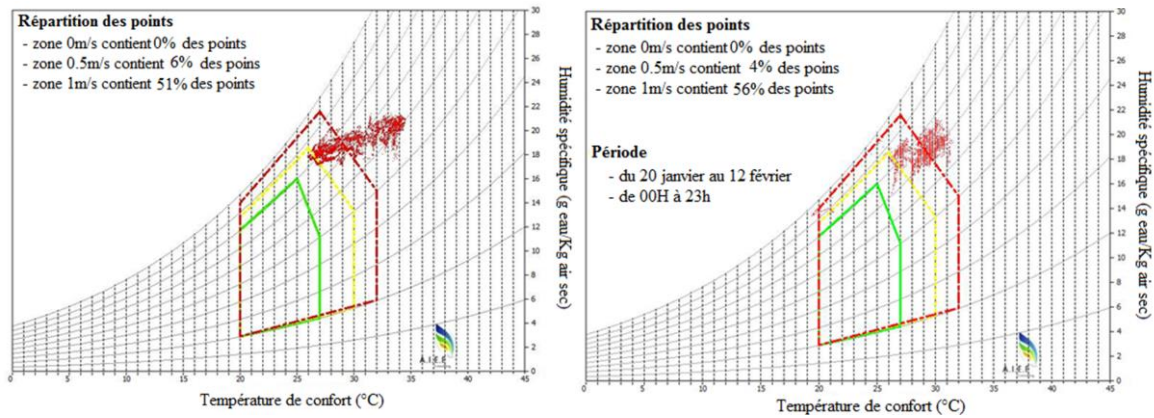


Figure 5 : Diagramme de Givoni pour les conditions intérieures mesurées dans une salle de classe ancienne (gauche) et récente (droite).

### 3. EVALUATION DE LA SANTE COGNITIVE

La littérature montre certaines associations entre des niveaux modérés de stress thermique et le CO<sub>2</sub> dans les salles de classe et les performances cognitives des enfants. En effet, des recherches conduites par Satish (2012) et Bakó-Biró (2012) ont révélé l'importance de l'environnement physique de la classe sur le développement cognitif des étudiants. Un manque de renouvellement de l'air (donc une faible ventilation et un taux élevé de CO<sub>2</sub>) impacterait négativement sur la santé cognitive des étudiants (15% de perte cognitive quand le taux de CO<sub>2</sub> passe de 550 ppm à 945 ppm, et 50% de perte cognitive quand le taux de CO<sub>2</sub> passe de 550 ppm à 1400 ppm). De même, une augmentation de 4% de la santé cognitive a été observée quand la température de la classe a diminué de 25°C à 22°C (étude réalisée en climat tempéré). L'impact de la concentration en CO<sub>2</sub> sur le ressenti des occupants n'a pas été abordé dans le projet COBIOPOL. Le projet TROPIC considère le stress thermique, le manque de ventilation et lie ces deux aspects à la santé cognitive des étudiants Polynésiens.

Des tests de performance cognitive en ligne standardisés, développés par Cambridge Cognition pour les écoles primaires, évalueront la concentration, le raisonnement et la mémoire à court terme des enfants. Ces tests cognitifs, d'une durée de 10 minutes, seront effectués à différents moments de la journée pour capturer l'accumulation naturelle du niveau de CO<sub>2</sub> (fermeture des fenêtres et portes) ou sous une ventilation naturelle (portes et fenêtres ouvertes). Une plateforme de mesure de l'environnement intérieur (température, humidité relative et taux de CO<sub>2</sub> - proxy pour ventilation) sera déployée (comme présenté dans la Section 2). Les étudiants se verront attribuer un identifiant, lors de leur inscription sur la plateforme de test cognitif, cela pour garantir l'anonymat dans l'analyse des données. Nous expliquerons ce qu'implique l'étude aux enfants des classes sélectionnées et à leurs familles. Nous demanderons aux parents/tuteurs des enfants inscrits dans les classes primaires sélectionnées leur autorisation pour que leurs enfants participent à cette étude. Ce protocole a été examiné et approuvé par le comité d'éthique humaine de l'Université de Massey en Nouvelle Zélande.



Figure 6: Étudiants néo-zélandais effectuant des tests cognitifs

D'autres paramètres comme l'acoustique et le visuel (éblouissement et niveau d'éclairage) seront aussi abordés. L'ouverture/fermeture des portes/fenêtres sera également surveillée par des capteurs

magnétiques. Cette expérience cognitive a été menée en écoles primaires néo-zélandaises comme le montre la Figure 6.

De plus, les étudiants adultes (BTS de lycée et étudiants de l'Université de la Polynésie française) seront invités à participer à une expérience utilisant un équipement portable d'électroencéphalographie (EEG). L'EEG (Figure 7) est une technique d'imagerie médicale non invasive pour mesurer l'activité électrique du cerveau.



Figure 7 : Un EEG avec 12 électrodes (à gauche) et une installation d'un EEG sur la tête d'un technicien à l'Université de Massey, Nouvelle Zélande (à droite).

L'un des points forts de l'EEG est de surveiller avec précision les activités neuronales et les modèles d'ondes cérébrales en capturant directement la réponse du système nerveux central aux changements de l'environnement intérieur (confort thermique et ventilation). Une augmentation de la pression artérielle, du rythme cardiaque ou du rythme respiratoire liés à un changement de l'environnement de la salle de classe pourront être capturés par l'EEG. Comme pour les tests cognitifs avec les élèves des écoles primaires, les EEGs (expérience avec les élèves adultes seulement) seront effectués à différents moments de la journée pour capturer l'accumulation naturelle du niveau de CO<sub>2</sub> (fermeture des fenêtres et portes) ou sous une ventilation naturelle (portes et fenêtres ouvertes).

Le protocole EEG a aussi été examiné et approuvé par le comité d'éthique humaine de l'Université de Massey en Nouvelle Zélande. Les EEG ont été testés à l'Université de Massey en Nouvelle Zélande avec des étudiants de licence en science du bâtiment. La figure 8 montre clairement une augmentation du stress et une perte de cognition quand le niveau de CO<sub>2</sub> augmente de 1000 ppm (parties par million) à 1500 ppm.

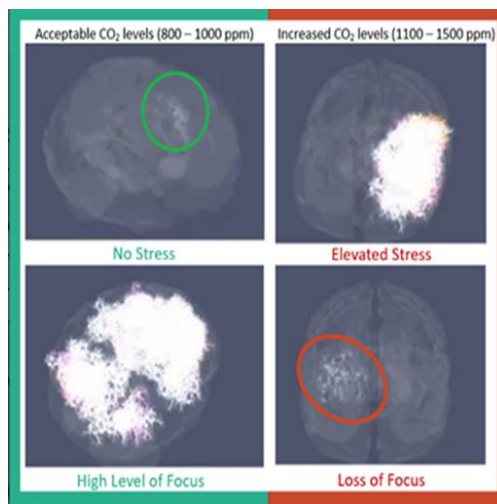


Figure 8 : Augmentation du stress et une perte de cognition, relevés par le EEG, lors d'une augmentation du niveau de CO<sub>2</sub> de (800 ppm - 1000 ppm) à (1100 ppm - 1500 ppm).

L'utilisation d'un EEG fournit une étude objective, en complément du questionnaire sur les perceptions des participants et des tests cognitifs qui seront effectués sous les mêmes conditions d'environnement interne. Ces expériences cognitives développées en contexte néo-zélandais vont être

adaptées au contexte polynésien et constituent un magnifique exemple de transfert de compétences entre les deux régions du pacifique.

#### 4. CONFORT ET QUALITE DE L'AIR EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La problématique de l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des canicules avec le changement climatique est une donnée essentielle pour la conception des bâtiments en climat chaud. La définition des différentes typologies d'années caniculaires types, donc à risque, a été établie dans le cadre des travaux de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE annexe 80, Machard et al. 2022). Ce type d'approche, peu ou pas utilisé dans la conception actuelle, nécessite également d'avoir à disposition des fichiers météorologiques qui intègrent ce risque caniculaire, ce que ne permet pas l'utilisation standard des fichiers TMY (Typical Meteorological Year). Dans le cadre de ce projet, nous abordons donc plus précisément les événements climatiques extrêmes, avec par exemple l'année 2016 identifiée ici (Figure 9 à gauche) d'après les données historiques de 2000 à 2020. On constate en particulier une faible dispersion sur l'année des températures, mais un très fort taux d'humidité. Nous avons ainsi traité les données historiques pour identifier les canicules du climat actuel avec son évolution entre 2000 et 2020 (sources [meteo.data.gouv.fr](https://meteo.data.gouv.fr)), pour Papeete, selon la méthodologie retenue par l'annexe 80 (Machard et al. 2022, Ouzeau et al. 2016), voir Figure 9 à droite.

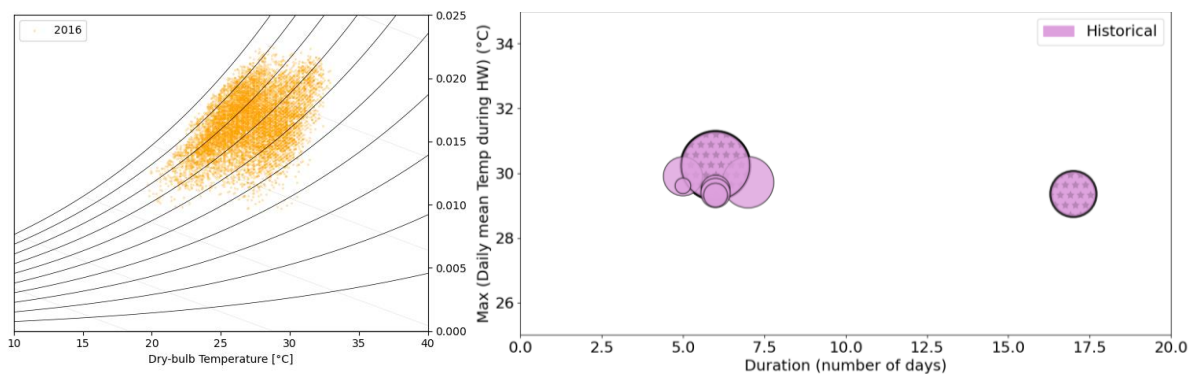


Figure 9 : (à gauche) Ensemble des points de l'année de l'année 2016, au pas de temps horaire, pour Papeete (source des données <https://meteo.data.gouv.fr>), (à droite) Vagues de chaleurs historiques à Papeete en durée, intensité et sévérité entre 2000 et 2020, la plus longue étant celle de 2016.

Il est à noter qu'ici on a préalablement recalculé les seuils de canicules adaptés au climat historique de Papeete, qui ne sont donc pas les mêmes que ceux de la France métropolitaine. Ces seuils de températures sont définis de façon à déterminer des canicules statistiquement sur les seules données météorologiques (Machard et al. 2022), mais équivalents à des risques sanitaires liés à l'adaptation des populations locales et aux risques associés aux dépassements prolongés des températures normales du site étudié. On observe ici que l'année 2016 est particulièrement remarquable avec 17 jours de canicule, alors que pour les autres années les canicules ne durent que de 5 à 7 jours. La définition des canicules étant liée à un dépassement au-delà des températures normales, cette tendance pourrait s'accélérer avec le changement climatique, d'autant plus que les températures actuelles sont très peu variables (Figure 9) avec donc des risques de dépassement de seuils accrus. La difficulté et l'enjeu sera aussi ici d'estimer les enjeux du changement climatique, alors que les données des modèles de climat actuels tels que CORDEX ne couvrent pas la zone de la Polynésie. Une solution à l'étude serait de faire l'analogie avec d'autres îles de la région Pacifique couvertes et à la même latitude, telle que la Polynésie. Du point de vue des occupants des bâtiments non climatisés, tels que pour les écoles étudiées dans ce projet TROPIC, nous devons tenir compte des paramètres de confort (habillement, activités, etc.) et un indice de confort couramment utilisé et présenté ici est la température équivalente PET (Figure 11).

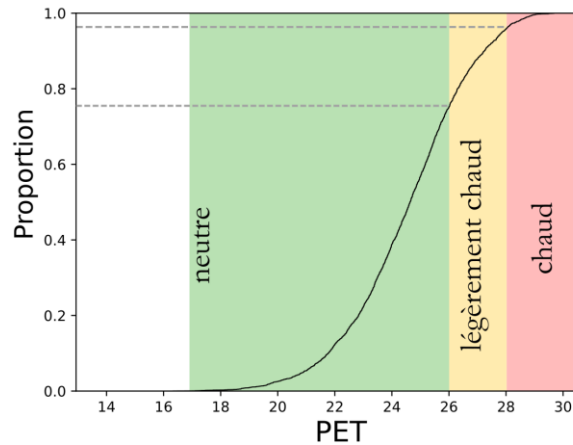


Figure 11 : Distribution des valeurs de PET à Papeete sur l'année 2016 pour les périodes d'occupation de 8h à 17h, et pour un taux de vêture de 0,5 clo, une activité de 1 met, et une vitesse d'air de 0,1 m/s.

On a ici en toute première approche considéré une ambiance très bien ventilée, donc à la température extérieure, en équilibre thermique avec les parois à la même température, et sans apport solaire direct sur l'occupant. On constate donc que pour un bâtiment type scolaire bien ventilé, les périodes de surchauffe au-delà 28°C en PET sont assez rares, sur la période d'occupation, et que la bonne conception et utilisation du bâtiment, même pour une année caniculaire, devrait permettre d'obtenir des conditions satisfaisantes de confort.

Il s'agira donc dans le projet de mener des études de confort thermique en identifiant l'impact de la construction sur les périodes de surchauffe et les possibilités de combinaison de solutions passives de rafraîchissement. La tendance actuelle au développement de la climatisation pourrait se renforcer également, et l'impact du changement climatique et l'augmentation des dépassements de seuils d'inconfort devront être considérés, sachant que les effets caniculaires sont aussi liés à des dépassements de seuils nocturnes non identifiés ici si on se limite simplement aux horaires d'occupation (tel que sur la figure 11). En effet, il est important de considérer l'effet de la surchauffe sur la durée avec les éventuels effets cumulatifs liés au manque de repos nocturne.

## 5. CONCLUSION

Le projet TROPIC a pour objectif d'analyser la qualité environnementale intérieure des écoles en Polynésie française et de faire le lien avec les capacités d'apprentissage des enfants. Ce projet fait suite à une étude précédente (Projet COBIPOL) mettant en évidence des conditions de confort dégradées dans les écoles, mais n'étudiant pas l'impact sur la santé cognitive des élèves. Le projet TROPIC va proposer une évaluation plus précise du stress thermique, ceci d'abord sur la base des données météorologiques actuelles afin de caractériser l'apparition de période caniculaire. Ces périodes sont actuellement en nombre et en durée limitée mais la perspective de changement climatique pourrait amener une très forte aggravation de ces phénomènes. TROPIC va donc, en complément, étudier l'évolution du stress thermique dans les locaux d'enseignement et pour le climat de la Polynésie. Les données de mesures et les prévisions seront confrontés aux résultats de tests cognitifs réalisés sur les élèves suivant un protocole validé par l'Université de Massey (Nouvelle Zélande) afin de définir si les conditions d'apprentissage sont assurées dans les salles de classe de Polynésie française.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Aparicio-Ruiz, Pablo, Elena Barbadilla-Martín, José Guadix, Jesús Muñuzuri. 2021. « A field study on adaptive thermal comfort in Spanish primary classrooms during summer season ». *Building and Environment* 203: 108089.
- Bakó-Biró, Zs., D.J. Clements-Croome, N. Kochhar, H.B. Awbi, M.J. Williams. 2012. « Ventilation rates in schools and pupils' performance ». *Building and Environment* 48: 215–223.



- Becker, Rachel, Itamar Goldberger, Monica Paciuk. 2007. « Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation », *Building and Environment* 42: 3261–3276.
- Guevara, Gabriel, Guillermo Soriano, Isabel Mino-Rodriguez. 2021. « Thermal comfort in university classrooms: An experimental study in the tropics ». *Building and Environment* 187: 107430
- Humphreys, M.A. 1977. « A study of the thermal comfort of primary school children in summer ». *Building and Environment* 12 (4): 231-239.
- Kruger, Eduardo L., Paulo H.T Zannin. 2004. « Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms ». *Building and Environment*. 39: 1055–1063.
- Lee, S.C., M. Chang. 2000. « Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong ». *Chemosphere* 41: 109 - 113.
- Machard, Anaïs, Emmanuel Bozonnet, Agnese Salvati, Mamak Pourabdollahtootkaboni, et Abhishek Gaur. « Fichiers météorologiques de vagues de chaleur futures pour évaluer la résilience thermique des bâtiments au changement climatique ». In AIC. Toulouse (France), 2022.
- Ouzeaux, Gaele, Jean Michel Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, et S. Planton. 2016. « Heat Waves Analysis over France in Present and Future Climate: Application of a New Method on the EURO-CORDEX Ensemble ». *Climate Services* 4: 1-12.
- Sadrizadeh, Sasan, Runming Yao, Feng Yuan, Hazim Awbi, William Bahnfleth, Yang Bi, Guangyu Cao, Cristiana Croitoru, Richard de Dear, Fariborz Haghighat, Prashant Kumar, Mojtaba Malayeri, Fuzhan Nasiri, Mathilde Ruud, Parastoo Sadeghian, Pawel Wargocki, Jing Xiong, Wei Yu, Baizhan Li. 2022. « Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment ». *Journal of Building Engineering* 57: 104908.
- Satish, Usha, Mark J. Mendell, Krishnamurthy Shekhar, Toshifumi Hotchi, Douglas Sullivan, Siegfried Streufert, William J. Fisk. 2012. « Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance ». *Environmental Health Perspectives* 120(12): 1671–1677.
- Talukdar, Md. Sarwar Jahan, Tahmid Hassan Talukdar, Manoj Kumar Singh, Md. Abdul Baten, Md. Shahadat Hossen. 2020. « Status of thermal comfort in naturally ventilated university classrooms of Bangladesh in hot and humid summer season ». *Journal of Building Engineering* 32: 101700.
- Wargocki, Pawel, Jose Ali Porras-Salazara, Sergio Contreras-Espinoza. 2019. « The relationship between classroom temperature and children's performance in school ». *Building and Environment* 157: 197–204.
- Wargocki, Pawel, Jose Ali Porras-Salazar, Sergio Contreras-Espinoza, William Bahnfleth. 2020. « The relationships between classroom air quality and children's performance in school ». *Building and Environment* 173: 106749
- Wong, Nyuk Hien, Shan Shan Khoo. 2003. « Thermal comfort in classrooms in the tropics ». *Energy and Buildings* 35: 337–351.
- Zhang, Dadi, Philomena M. Bluysen. 2021. « Energy consumption, self-reported teachers' actions and children's perceived indoor environmental quality of nine primary school buildings in the Netherlands », *Energy and Buildings* 235: 110735.