



HAL
open science

Performances des systèmes adiabatiques directs pour des locaux industriels pour différentes localisations en climats futurs

Antoine Breteau, Patrick Salagnac, Jean-Marie Caous, Emmanuel Bozonnet

► To cite this version:

Antoine Breteau, Patrick Salagnac, Jean-Marie Caous, Emmanuel Bozonnet. Performances des systèmes adiabatiques directs pour des locaux industriels pour différentes localisations en climats futurs. IBPSA France, May 2024, Oléron (FR), France. hal-04580586

HAL Id: hal-04580586

<https://hal.science/hal-04580586v1>

Submitted on 20 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

Performances des systèmes adiabatiques directs pour des locaux industriels pour différentes localisations en climats futurs

Antoine Breteau*^{1,2}, Patrick Salagnac¹, Jean-Marie Caous², Emmanuel Bozonnet¹

¹ LaSIE (UMR CNRS 7356), La Rochelle Université, Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle, France

² BLUETEK, ZI Nord les Pins, 37230 Luynes, France

*antoine.breteau@univ-lr.fr

RESUME. Cet article propose une analyse des performances d'un système de rafraîchissement adiabatique direct intégré au sein d'un bâtiment industriel. Le système étudié est une solution qui utilise un matériau poreux humidifié pour abaisser la température de l'air sans nécessiter d'énergie externe. Dans cette étude, le système est évalué pour quatre zones climatiques à moyen terme (2040-2060), en utilisant des indicateurs de performance énergétique, de confort thermique et de consommation d'eau. Les résultats révèlent des différences significatives dans le fonctionnement et la performance du système selon les climats étudiés et selon les indicateurs observés.

MOTS-CLÉS : Rafraîchissement passif, rafraîchissement adiabatique, confort

ABSTRACT. This paper presents an analysis of the performance of a direct adiabatic cooling system integrated within an industrial building. The system is a solution that utilizes humidified porous material to lower the air temperature without requiring external energy. In this study, the system is evaluated for four medium-term climate zones (2040–2060), using indicators of energy performance, thermal comfort and water consumption. The results reveal significant differences in system operation and performance according to the climates studied and the indicators observed.

KEYWORDS : Passive cooling, adiabatic cooling, comfort

1. INTRODUCTION

Le changement climatique et les températures extrêmes qui en découlent constituent un défi crucial pour le monde. Le 6^{ème} rapport du GIEC indique que les émissions de GES dues aux activités humaines réchauffent le climat à un rythme élevé (IPCC 2022). Parmi ces activités, les secteurs du bâtiment et industriel représentent respectivement 6 % et 21 % des émissions de GES mondiales (IPCC 2014) notamment en raison de l'utilisation intensive de la climatisation. Cette dernière représente 12 % des émissions des gaz à effet de serre du secteur du bâtiment (PROMEE 2023) en raison de l'utilisation de fluides frigorigènes et de leur forte consommation d'énergie. Pour faire face à l'impact du réchauffement climatique et réduire l'utilisation des climatiseurs, des méthodes de rafraîchissement adiabatique passives se développent.

Le rafraîchissement adiabatique est une technique qui permet de rafraîchir l'intérieur des bâtiments en utilisant l'énergie de l'évaporation de l'eau produite par le passage d'un air sec et chaud au travers

d'un matériau poreux humide. Cette technique peut se décliner en trois familles distinctes : le rafraîchissement adiabatique direct, indirect et hybride.

Le rafraîchissement adiabatique direct permet de refroidir l'air extérieur directement à travers un matériau poreux humide pour ensuite être soufflé au sein d'un bâtiment. La transformation de l'air est isenthalpique (sans apport d'énergie externe sauf celle de la pompe et du ventilateur). Cette typologie de système est plus performante dans les climats chauds et secs (Chiesa et al. 2017). De nombreux articles montrent que les systèmes directs réduisent l'inconfort intérieur des bâtiments (Xuan et al. 2012; Breteau et al. 2022; 2023), mais conduisent à une augmentation de l'humidité intérieure (Pistochini et Modera 2011). En termes de performance énergétique, ces systèmes consomment beaucoup d'eau (Sahai 2012) et d'énergie (Kowalski et Kwiecień 2020) malgré le fait qu'ils consomment moins d'énergie qu'un système de climatisation classique (Ford et al. 1998; McKenzie et al. 2013).

Concernant les autres typologies de système, ils existent les systèmes de rafraîchissement adiabatique indirect qui permettent de rafraîchir l'intérieur des bâtiments sans augmenter l'humidité de l'air. L'air neuf échange ses calories avec l'air repris dans un échangeur sensible avant d'être soufflé dans le bâtiment (Xuan et al. 2012; Gómez, Rey-Martínez, et Tejero-González 2010). De plus, il est possible de combiner des systèmes directs et indirects pour répondre à différents besoins en fonction des conditions intérieures et extérieures et de la régulation du système (PROFEEL 2021).

L'objectif de cet article est d'étudier les performances d'un système de rafraîchissement adiabatique direct intégré à un bâtiment industriel pour différentes localisations en climat futur. Dans un premier temps, le cas d'étude (bâtiment) et le système sont décrits. Par la suite, le comportement du système sera étudié mettant en évidence les différentes phases de fonctionnement. Pour finir, les performances du système seront analysées par le biais de divers indicateurs de performance, de confort, mais aussi de résilience.

2. CAS D'ETUDE

2.1. BATIMENT

Le bâtiment étudié (Figure 1) est un bâtiment industriel de type « entrepôt », constitué d'une structure acier avec une surface au sol de $36 \times 36 \text{ m}^2$ et une hauteur de 8 m.

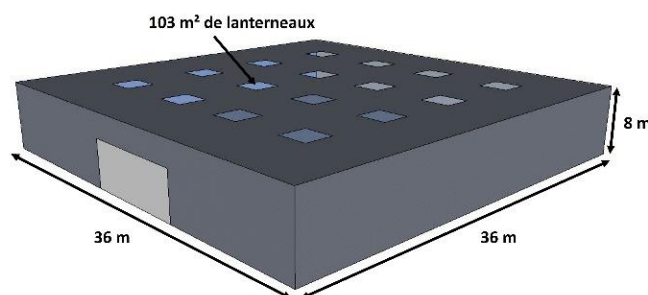


Figure 1 : Bâtiment étudié

Les murs verticaux et la toiture sont constitués de deux bardages en acier de 2 mm d'épaisseur recouvrant une couche de laine de roche de 5 cm d'épaisseur. Le sol est composé d'une dalle béton de 20 cm non isolée. Le bâtiment est équipé de 103 m^2 de lanternes répartis uniformément en toiture (8 % de la surface de toit). Le bâtiment stocke des marchandises (carton, métal et caisse-palette) sur des

étagères métalliques dont l’inertie est considérée comme une masse interne. La perméabilité à l’air du bâtiment est équivalente à $2,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (sous 4 Pa) en l’absence de ventilation. Un débit hygiénique de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{occ}^{-1}$ a été mis en place afin de respecter les normes de ventilation. Une densité d’occupation de $60 \text{ m}^2 \cdot \text{occ}^{-1}$ est considérée. La période d’occupation est de 7 h à 22 h tous les jours sauf le dimanche. Le bâtiment est ventilé et refroidi par un système de rafraîchissement adiabatique direct.

2.2. SYSTEME

Pour cette étude, un modèle numérique simplifié a été développé et intégré au logiciel de simulation thermique des bâtiments (TRNSYS©). Ce modèle s’appuie essentiellement sur l’efficacité de saturation ϵ_{wb} (1).

$$\epsilon = 100 \frac{T_{AE} - T_{AS}}{T_{AE} - T_{wb,AE}} \tag{1}$$

Avec T_{AE} , T_{AS} et $T_{wb,AE}$ respectivement la température de l’air extérieur, de l’air de soufflage et la température de bulbe humide de l’air extérieur.

Le système réduit la température de bulbe sec de l’air extérieur à sa température de l’air de bulbe humide par le biais de l’énergie d’évaporation de l’eau produite au passage de l’air à travers un matériau poreux.

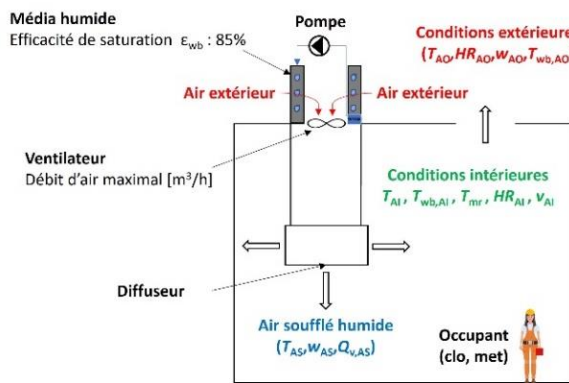


Figure 2 : Système intégré au bâtiment

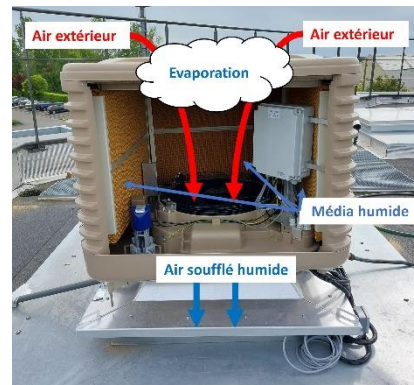


Figure 3 : Système adiabatique

Le système de rafraîchissement adiabatique direct étudié est mis en place sur la toiture du bâtiment (Figure 2). Il est composé d’une pompe à eau, d’un média poreux d’une efficacité de saturation de 85 % et d’un ventilateur avec un débit nominal de $12\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figure 3). Ce système fonctionne en mode free-cooling (ventilateur seul) ou en mode adiabatique (avec humidification), aussi bien en période d’occupation que d’inoccupation. Ces deux modes se différencient par des conditions de température intérieure et extérieure qui peuvent être modifiées selon le climat et la typologie du bâtiment (Tableau 1).

	Free-cooling		Adiabatique	
	Intérieur (T_{AI})	Extérieur (T_{AE})	Intérieur (T_{AI})	Intérieur (T_{AI})
Occupation	$> 22^\circ\text{C}$	$< T_{AI}$	$> 24^\circ\text{C}$	$> T_{wb,AE}$
Inoccupation	$> 19^\circ\text{C}$	$< T_{AI}$	$> 28^\circ\text{C}$	$> T_{wb,AE}$

Tableau 1 : Conditions de température extérieure et intérieure

La régulation du système fonctionne avec une bande proportionnelle de 2°C qui permet d’ajuster le débit d’air du ventilateur en fonction des conditions de température. Pour le mode free-cooling, la bande

proportionnelle s'applique entre la température intérieure (T_{AI}) et la consigne intérieure ainsi qu'avec la température extérieure (T_{AE}). Pour le mode adiabatique, la bande proportionnelle s'applique entre la température intérieure (T_{AI}) et la température de consigne intérieure, ainsi qu'avec la température de bulbe humide extérieure ($T_{wb,AE}$).

Le dimensionnement du système a été fait en fonction du climat étudié, mais aussi des caractéristiques du bâtiment (volume, enveloppe, apports...). Le bâtiment étudié a un volume de 10 368 m³ et peu d'apports internes (machines, éclairage, occupants et bureautique). Le débit d'air de soufflage du ventilateur a été défini sur la base des valeurs intérieures SET^* obtenues à partir du débit de soufflage en régime permanent. La valeur des 2/3 de cette courbe a été choisie pour définir le débit de soufflage maximal (Tableau 2).

Localisations	Carpentras	Paris	Singapour	AbuDhabi
Débit de soufflage maximal [m ³ /h]	22 000 (2,1 vol/h)	22 000 (2,1 vol/h)	23 000 (2,2 vol/h)	22 000 (2,1 vol/h)

Tableau 2 : Débit de soufflage maximal pour chaque localisation

Le choix des localisations a été fait pour des climats modérés et extrêmes : **Carpentras** (climat méditerranéen chaud et humide), **Paris** (climat continental mixte humide), **AbuDhabi** (climat extrêmement chaud et sec) et **Singapour** (climat extrêmement chaud et humide). Dans ce papier, les fichiers météo produits par l'annexe 80 (Attia et al. 2022) ont été utilisés. Les simulations ont été faites avec une période météorologique caniculaire à moyen terme (2040-2060), pour le scénario d'émissions défavorables.

2.3. INDICATEURS

Dans cet article, différents indicateurs de confort, de performance et de résilience ont été étudiés. Pour évaluer le confort thermohydrique intérieur, les indicateurs T_{op} et SET^* ont été choisis.

La SET^* (Standard Effective Temperature) est une température opérative d'un environnement de référence qui provoquerait les mêmes réponses physiologiques que l'environnement réel. La SET^* est défini comme l'équivalent de la température sèche d'un environnement isotherme à 50 % d'humidité relative où les occupants auraient des vêtements standardisés pour l'activité considérée, qui auraient la même contrainte thermique (température de peau) et la même contrainte thermorégulatrice (humidité de la peau) que dans un environnement de référence (Gagge, Fobelets, et Berglund 1986).

L'inconfort thermo(hydrique) intérieur a été évalué par le nombre de degrés-heures au-dessus de la température limite ($T_{i,lim}$). Les valeurs de $T_{i,lim}$ pour T_{op} et SET^* ont été déterminées par une méthode d'équivalence utilisant l'indicateur PMV (Zare et al. 2018). Nous avons choisi un indicateur PMV égal à 0 (sensation thermique neutre) et les paramètres suivants : $v_{AI} = 0,2$ m/s ; métabolisme 1,4 met ; vêtiture 0,5 clo. Selon le diagramme psychométrique de confort (ASHRAE 2013), une température opérative T_{op} de 26°C a une équivalence en SET^* de 28°C.

L'étude de la résilience du système a été faite au travers de l'indicateur α qui permet d'évaluer la résistance d'un bâtiment au changement climatique et le risque de surchauffe associé (2). C'est la pente de régression entre IOD et AWD (Hamdy et al. 2017). IOD est la surchauffe intérieure du bâtiment par

rapport à une température limite ($T_{lim} = 26^{\circ}\text{C}$) et AWD définie la surchauffe extérieure par rapport à une température de base extérieure ($T_b = 26^{\circ}\text{C}$).

$$\alpha = \frac{IOD}{AWD} \quad (2)$$

Si $\alpha < 1$ alors le bâtiment est capable d'éliminer la contrainte thermique externe à long terme et si $\alpha > 1$ alors le bâtiment est incapable d'éliminer la contrainte thermique externe à long terme.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. FONCTIONNEMENT

La Figure 4 montre le temps de fonctionnement et la consommation des ventilateurs pour le mode free-cooling (vert) et adiabatique (violet).

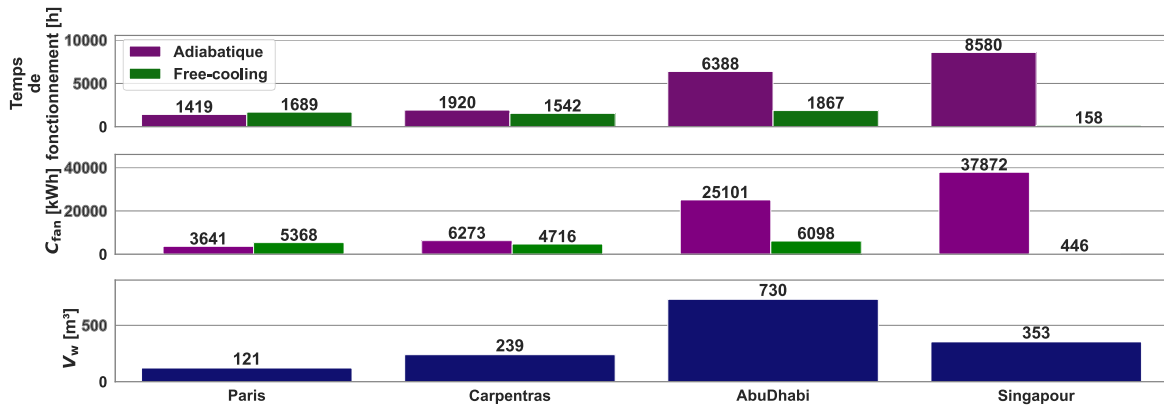


Figure 4 : Temps de fonctionnement et consommation de ventilateur des deux modes (FC et AD)

Le mode adiabatique est le plus fréquemment utilisé, sauf pour le climat de Paris où les conditions extérieures favorisent le fonctionnement du free-cooling. Pour le climat d'AbuDhabi, le mode adiabatique est utilisé trois fois plus souvent (6 388 heures) que le mode free-cooling (1 867 heures), comme en témoigne la consommation annuelle des ventilateurs. Ce phénomène est dû au climat sec à Abu Dhabi. Pour Carpentras, l'échelle de consommation est bien plus réduite : le ventilateur ne consomme que 6 273 kWh en mode adiabatique, soit 1,3 fois plus qu'en free-cooling (4 716 kWh). Les résultats de consommation sont moins importants que pour Abu Dhabi, car le climat de Carpentras est similaire à celui d'AbuDhabi, mais beaucoup moins extrême en température et humidité. Pour le climat de Singapour, plus humide et plus chaud, le mode adiabatique est presque toujours utilisé (98 % du temps de fonctionnement du système) avec une consommation annuelle de 37 872 kWh, contre 446 kWh pour le mode free-cooling.

L'aspect important de ces systèmes est la consommation d'eau. Celle-ci est corrélée au temps passé en mode adiabatique sous tous les climats. On constate que dans les climats arides, le système consomme beaucoup d'eau (730 m³) pour Abu Dhabi, le phénomène d'évaporation de l'eau à travers le média est important. A l'inverse, dans les climats humides (Singapour) la consommation est assez faible (353 m³) par rapport au temps d'utilisation de l'adiabatique. On remarque également que la consommation d'eau du système pour le climat de Carpentras (239 m³) est peu différente à celle de Singapour alors que les conditions climatiques sont plus extrêmes. L'humidité de l'air extérieur réduit l'énergie d'évaporation de l'eau.

3.2. CONFORT

La Figure 5 montre les résultats obtenus de la surchauffe intérieure du bâtiment en termes de SET^* et T_{op} .

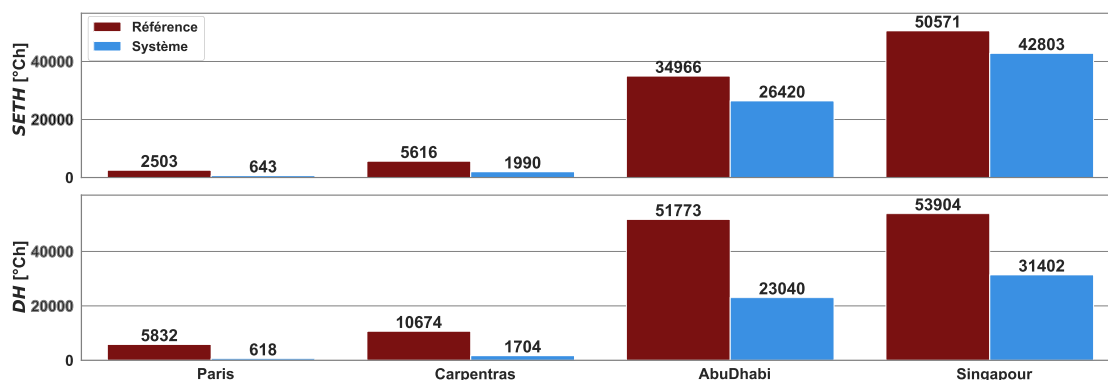


Figure 5 : DH et SETH pour différents climats

Ce graphique montre une tendance similaire pour chaque climat entre les indicateurs DH et $SETH$. Paris est la ville avec le niveau d'inconfort le plus faible, tandis que Singapour est la ville avec le niveau d'inconfort le plus élevé. On observe que la sévérité de l'inconfort est plus importante dans les climats extrêmes (Abu Dhabi et Singapour) par rapport au climat français. On remarque également que l'impact du système sur cet inconfort varie selon les climats. En termes de sévérité DH , le système réduit l'inconfort de 90 % à Paris et de 84 % à Carpentras. Il existe également une différence entre la sévérité en termes de DH et $SETH$; en général, la sévérité est la plus élevée en prenant en compte T_{op} (DH), principalement en raison de la prise en compte de l'humidité relative intérieure dans le calcul du SET^* . Il en résulte une réduction moins significative de l'inconfort par le système lorsque la sévérité est calculée à l'aide du SET^* . En prenant comme exemple la ville de Singapour, la réduction de l'inconfort est de 15 % avec le $SETH$, contre 42 % avec le DH . En termes de sévérité avec le $SETH$, le système permet de réduire la surchauffe au maximum de 74 % à Paris et 65 % à Carpentras.

3.3. PERFORMANCES ET RESILIENCE

Les indicateurs de performance utilisés ($\Delta SETH/V_w$) et ($\Delta SETH/C_{fan}$) sont définis comme la réduction de la surchauffe intérieure ($\Delta SETH$) par rapport à la consommation d'eau (V_w) et par rapport à la consommation énergétique du ventilateur (C_{fan}). Le Tableau 3 montre les résultats des simulations réalisées avec le système en fonctionnement.

	Carpentras	Paris	Abu Dhabi	Singapour
DH [°Ch]	1704	618	23040	31402
$SETH$ [°Ch]	1990	643	26420	42803
$SET^*_{daily\max}$ [°C]	32,2	31,1	41,7	38,2
$\frac{\Delta SETH}{C_{fan}}$ [°Ch/kWh]	0,31	0,19	0,27	0,20
$\frac{\Delta SETH}{V_w}$ [°Ch/L]	15,13	15,31	11,69	21,98
α [-]	0,16	0,17	0,55	1,24

Tableau 3 : Performances du système pour les différents climats

On remarque que les différences entre les conditions extérieures des climats français (Carpentras et Paris), équatorial (Singapour) et subtropical (AbuDhabi) impactent les performances du système et l'inconfort intérieur du bâtiment. Par exemple, le nombre de degrés-heures DH est 14 fois plus élevé entre le climat de Carpentras et celui d'AbuDhabi. La tendance est comparable en ce qui concerne la surchauffe mesurée en SET^* , mais nous observons que celle-ci est plus marquée par rapport aux DH . Cette disparité est particulièrement prononcée dans le climat de Singapour, avec une différence de 36 % entre les DH et $SETH$. La moyenne journalière maximale en occupation ($SET^*_{daily\max}$) est la plus élevée à AbuDhabi (41,7°C). De plus, on note que le gain en $SETH$ par volume d'eau évaporée est le plus important pour le climat de Singapour avec 21,98°C/L, soit 88 % de plus qu'AbuDhabi et 45 % de plus que Carpentras. Cela montre que dans un climat humide, le système réduit davantage l'inconfort intérieur en consommant le moins d'eau possible. En regardant le gain en degrés-heures par rapport à la consommation des ventilateurs, le climat de Carpentras (0,31°C/kWh) est plus adapté avant celui d'AbuDhabi (0,27°C/kWh). Pour les climats arides, le système contribue à réduire l'inconfort intérieur avec une consommation d'énergie minimale du ventilateur. Pour finir, nous remarquons que pour seul le climat de Singapour, le système n'arrive pas à éliminer la contrainte thermique externe ($\alpha > 1$).

4. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer les performances et la résilience d'un système de rafraîchissement adiabatique direct intégré à un bâtiment industriel pour différents climats. Les premiers résultats montrent que le système fonctionne le plus souvent en mode adiabatique pour les climats aux conditions extrêmes. A contrario, pour le climat continental, le mode free-cooling est le plus utilisé. De plus, pour une même utilisation du mode adiabatique, le système consomme moins d'eau dans les climats humides. La réduction de la surchauffe intérieure ($SETH$ et DH) est la plus importante dans les climats méditerranéens et continentaux. Cependant, le climat de Singapour est le plus adapté en ce qui concerne la réduction de la surchauffe intérieure par rapport au volume d'eau évaporé. Pour ces climats humides, une énergie d'évaporation de l'eau importante n'est pas nécessaire pour réduire l'inconfort. De plus, lorsqu'on rapporte la réduction de l'inconfort à la consommation énergétique de ventilateur, le système est le plus performant pour les climats arides. Pour finir, le système ne permet pas d'éliminer la contrainte thermique externe pour le climat de Singapour. Pour conclure, sur le moyen terme, le système se révèle plus performant dans les climats continentaux et méditerranéens lors de périodes de chaleur intense. De plus, le système est résilient pour tous les climats sauf celui de Singapour.

5. BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE. 2013. « ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 ».
- Attia, Shady, Peter Holzer, Shabnam Homaei, Ongun Berk Kazanci, Chen Zhang, et Per Heiselberg. 2022. « Resilient Cooling in Buildings – A Review of Definitions and Evaluation Methodologies ». *CLIMA 2022 Conference*, mai. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.195>.
- Breteau, Antoine, Patrick Salagnac, Emmanuel Bozonnet, Mathieu Carage, et Jean-Marie Caous. 2022. « Evaluation des performances énergétiques d'un système de rafraîchissement adiabatique intégré au sein d'un bâtiment industriel ». In *Colloque International Franco-Québécois en Energie Ville et Transition face aux défis climatiques et énergétiques*, 164-69. Ville et Transition face aux défis climatiques et énergétiques. Paris, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03718248>.

- Breteau, Antoine, Patrick Salagnac, Emmanuel Bozonnet, Mathieu Carage, et Jean-Marie Caous. 2023. « Comparaison d'indicateurs dans l'analyse du confort intérieur d'un bâtiment industriel équipé d'un système de rafraîchissement adiabatique direct ». In *31ème Congrès Français de la Société Française de Thermique "Thermique et Agroressources"*, 127. Reims, France: Société Française de Thermique. <https://doi.org/10.25855/SFT2023-127>.
- Chiesa, Giacomo, Nora Huberman, David Pearlmutter, et Mario Grosso. 2017. « Summer Discomfort Reduction by Direct Evaporative Cooling in Southern Mediterranean Areas ». *Energy Procedia*, 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, Italy, 111 (mars): 588-98. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.221>.
- Ford, Brian, Nimish Patel, Parul Zaveri, et Mark Hewitt. 1998. « Cooling without Air Conditioning: The Torrent Research Centre, Ahmedabad, India ». *Renewable Energy*, Renewable Energy Efficiency, Policy and the Environment, 15 (1): 177-82. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00150-5).
- Gagge, A., A. Fobelets, et L. Berglund. 1986. « A standard predictive index of human response to the thermal environment ». *Ashrae Transactions* 92 (1): 709-31.
- Gómez, Eloy, F. Javier Rey-Martínez, et Ana Tejero-González. 2010. « The phenomenon of evaporative cooling from a humid surface as an alternative method for air-conditioning ». *International Journal of Energy and Environment* 1 (janvier).
- Hamdy, Mohamed, Salvatore Carlucci, Pieter-Jan Hoes, et Jan L. M. Hensen. 2017. « The Impact of Climate Change on the Overheating Risk in Dwellings—A Dutch Case Study ». *Building and Environment* 122 (septembre): 307-23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>.
- IPCC. 2022. « AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change — IPCC ». 2022. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>.
- IPCC, 2014. 2014. « AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change — IPCC ». 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- Kowalski, Piotr, et Dariusz Kwiecień. 2020. « Evaluation of Simple Evaporative Cooling Systems in an Industrial Building in Poland ». *Journal of Building Engineering* 32 (novembre). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101555>.
- Mckenzie, Erica, Theresa Pistoichini, Frank Loge, et Mark Modera. 2013. « An investigation of coupling evaporative cooling and decentralized graywater treatment in the residential sector ». *Building and Environment* 68 (octobre): 215-24. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.007>.
- Pistoichini, Theresa, et Mark Modera. 2011. « Water-use efficiency for alternative cooling technologies in arid climates ». *Lancet* 43 (février): 631-38. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.004>.
- PROFEEL. 2021. « Les solutions de rafraîchissement adiabatique dans les bâtiments tertiaires en rénovation ». *Profeel* (blog). 2021. <https://programmeprofeel.fr/ressources/guide-les-solutions-de-rafraichissement-adiabatique-dans-les-batiments-tertiaires-en-renovation/>.
- PROMEE. 2023. « La climatisation représente 5% des émissions de CO2 du bâtiment ». Promee. 2023. <http://promee.fr/actualites/conseils/la-climatisation-represente-5-des-emissions-de-co2-du-batiment>.
- Sahai, Rashmi. 2012. « Addressing Water Consumption of Evaporative Coolers with Greywater », juillet. <https://escholarship.org/uc/item/6gz5q7mx>.
- Xuan, Y. M., F. Xiao, X. F. Niu, X. Huang, et S. W. Wang. 2012. « Research and Application of Evaporative Cooling in China: A Review (I) – Research ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (5): 3535-46. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.052>.
- Zare, Sajad, Naser Hasheminejad, Hossein Elahi Shirvan, Rasoul Hemmatjo, Keyvan Sarebanzadeh, et Saeid Ahmadi. 2018. « Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with Selected Thermal Indices/Environmental Parameters during 12 Months of the Year ». *Weather and Climate Extremes* 19 (mars): 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.01.004>.