

Conditions de formations de zones sèches dans un substrat capillaire pour le rafraîchissement adiabatique indirect.

Capillary substrate drying conditions study for indirect adiabatic cooling

Antonin DULAC¹, Florine GIRAUD^{1*}, David CLOET¹, Sabine ZINS¹, Arnaud DIDIER¹, Benoît STUTZ¹

¹Laboratoire Procédés Energies Bâtiment (LOCIE)
60 avenue du Lac Léman - 73370 Le Bourget-du-Lac
*(auteur correspondant : florine.giraud@univ-smb.fr)

Résumé - Les systèmes de rafraîchissement adiabatiques indirects pour l'habitat sont économes en énergie. Ils utilisent un substrat capillaire pour l'apport d'eau. Une étude paramétrique a été menée pour identifier les conditions provoquant leur assèchement. Pour cela, un banc expérimental a été développé, reproduisant un demi-canal humide. Les paramètres étudiés sont l'humidité relative, le débit d'air, la température d'entrée et la pression capillaire. Deux protocoles d'imbibition ont été mis en oeuvre pour étudier l'effet d'hystérésis sur le développement des zones d'assèchement.

Abstract - Indirect adiabatic cooling systems represent a highly energy-efficient solution for residential cooling. These systems rely on a capillary substrate for water distribution. This study presents a parametric investigation conducted on an experimental test bench designed to simulate a humid half-channel to identify dry-out conditions of the capillary substrate.

The research evaluates the impact of : inlet relative humidity, airflow rate, inlet temperature, and capillary pressure. Two experimental protocols were implemented to study the hysteresis effect on drying out zones development.

Nomenclature

H	distance du niveau du réservoir à la veine, m	<i>Symboles grecs</i>	
HR	humidité relative, %	ω	humidité spécifique, $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air}}$, sec
Q_v	débit volumique, L/min	ϵ	Efficacité de refroidissement
TC	température sous la plaque chauffante, K	η	Porosité
P	puissance de chauffe de la plaque, W	Δ	Incertitude absolue
T	température, K		
k	perméabilité, m^2	<i>Indices et exposants</i>	
e	épaisseur, m	<i>in</i>	entrée de la veine
r	rayon de pore, m	<i>out</i>	sortie de la veine
		<i>sat</i>	saturation
		<i>sec</i>	sec (sans apport d'eau)
		<i>subs</i>	substrat capillaire
		<i>eff</i>	effectif

1. Introduction

L'augmentation régulière des records de chaleur annuels, mensuels et absolus est visible à l'échelle mondiale comme le montre *Coumou et al.* [1]. La plus grande fréquence de ces records est aussi accompagnée d'une augmentation du nombre et de la durée des vagues de chaleur sur les dernières décennies comme présenté par *Ionita et al.* [2]. Dans ce contexte, le développement de systèmes de rafraîchissement est primordial pour des enjeux de santé des occupants et de confort. La principale technologie pour le rafraîchissement intérieur est la climatisation à cycle de compression mécanique de vapeur. Ainsi les climatiseurs représentent environ 10 % de la consommation en électricité mondiale pour 7 % des émissions de GES (fuites de fluide et production d'énergie) selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) [3]. De plus les climatiseurs à compression mécanique rejettent généralement de la chaleur dans le milieu ambiant ce qui a pour effet d'augmenter le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Les systèmes de rafraîchissement évaporatif sont présentés comme une alternative "low-tech" à la climatisation classique. Ils se séparent en 2 catégories : les systèmes directs et indirects. Dans les systèmes directs l'air extérieur est refroidi par évaporation directe d'eau augmentant l'humidité de l'air entrant. Dans les systèmes indirects, le cycle de Maisotsenko est utilisé et se présente sous diverses formes [4]. Ce cycle met en œuvre des échangeurs à plaques composés d'une alternance de canaux secs et humides et fonctionnant en mode contrecourant. Il est mis en œuvre pour rafraîchir les bâtiments lors des périodes de fortes chaleurs. De l'air chaud extérieur circule dans les canaux secs où il se refroidit au contact des parois froides. Une partie de l'air rafraîchi est injecté dans le bâtiment. Le complément est réinjecté dans les canaux humides adjacents. Il s'y réchauffe et s'humidifie au contact des substrats capillaires humides tapissant les parois avant d'être renvoyé vers l'extérieur. La chaleur prélevée lors de l'évaporation permet de refroidir les plaques séparant les canaux secs et humides, et donc l'air circulant dans les canaux secs et injecté dans les bâtiments sans l'humidifier.

Une des problématiques de ces systèmes est l'assèchement du substrat capillaire qui est notamment visible dans des climats secs. L'assèchement du substrat capillaire a été étudié par *Yang et al.* [5] (étude numérique validée par expérience à l'échelle d'un système indirect) et *Yang et al.* [6] (étude expérimentale du substrat pour système direct). *Chen et al.* [7] ont étudié l'imbibition de substrats verticaux mouillés par pulvérisation avec des buses en convection naturelle. Quelques recherches s'intéressent à l'impact du type de substrat sur les performances globales du système ou l'imbibition du substrat seul [8]. L'assèchement d'un substrat capillaire utilisant la capillarité pour s'imbiber en fonctionnement est peu étudié. La compréhension de l'assèchement de ce type de substrat permet d'envisager des solutions limitant ce type de comportement. Un montage expérimental permettant d'accéder à la variation de la température, de l'humidité relative de l'air en fonction des paramètres d'entrée de l'air (température, humidité relative, débit) du flux imposé et du protocole a été développé. En effet, les paramètres importants identifiés dans [9] sont : la configuration du système, la géométrie du canal, la température et l'humidité relative en entrée, le type de substrat utilisé. Une des spécificité de l'étude porte sur les faibles flux de chaleur en jeu (25W/m^2) et la sensibilité des mesures aux fuites.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description du banc expérimental

Le schéma de la Figure 1 décrit le montage du banc expérimental. Dans un premier temps de l'air sec (humidité relative d'environ 5%) venant du réseau d'air comprimé passe dans un

contrôleur de débit volumique *Aalborg* ($\frac{\Delta Q_v}{Q_v} = \pm 1,5 \%$ sur la pleine échelle). La plage de débit réglable est comprise entre 0 et 10 L/min. Dans un second temps l'air est introduit dans un bulleur plongé dans un bain thermostaté. L'air ressort quasiment saturé en vapeur d'eau du bulleur. Il est envoyé vers la veine d'essai simulant un demi-canal humide. L'humidité spécifique en sortie du bulleur peut être ajustée par le biais de la température de l'eau du bulleur.

La veine d'essai est équipée d'un divergent en entrée et d'un convergent en sortie pour répartir le flux d'air dans le demi-canal. Sur la Figure 1, la veine d'essai est représentée vue de dessus. Les 15 disques représentent les supports des capteurs d'humidités SHT. Les capteurs d'humidité indiquent l'humidité relative et la température de l'air. L'épaisseur du demi-canal est de 2 mm. Le demi-canal fait 30 cm de longueur pour 20 cm de large. Les capteurs d'humidités sont espacés de 6 cm selon la longueur et de 5 cm selon la largeur. Les capteurs d'humidité utilisés sont des SHT75 (*Sensirion* - $\Delta T = \pm 0,4^\circ C$ et $\frac{\Delta HR}{HR} = \pm 1,8\%$).

Une partie du substrat capillaire (papier non-tissé ayant les caractéristiques suivantes : $\eta_{subs} = 0,87$, $k = 1,62 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, $r_{eff} \approx 70 \text{ }\mu\text{m}$, $e_{subs} = 340 \text{ }\mu\text{m}$ et étant en partie collé sur la paroi inférieure du canal) trempe dans un réservoir extérieur contenant de l'eau distillée comme représenté sur les Figures 1 et 2. Le réservoir d'eau repose sur une balance qui mesure la masse d'eau absorbée par le papier. Le réservoir d'eau est positionné en dessous de la paroi de la veine à une distance notée H par la suite. L'eau doit alors monter dans le substrat capillaire dans un premier temps avant d'imbiber la partie collée en paroi. La partie du papier plongeant dans le réservoir est recouverte d'un film cellophane empêchant toute évaporation. Le réglage de la différence de hauteur entre le niveau d'eau du réservoir et le substrat capillaire dans la veine (H avec pour incertitude $\Delta H = 0,25 \text{ cm}$) permet de régler la résistance d'imbibition de l'eau. Une étanchéité à l'air est positionnée sur le côté latéral de la veine pour que l'alimentation en eau du substrat ne s'accompagne pas de fuites d'air parasites.

Le débit d'air en sortie de la veine est contrôlé par un débitmètre à diaphragme. Un ventilateur est positionné après le débitmètre. Sa puissance est réglée de sorte à équilibrer les débits d'air sec entre l'entrée et la sortie et limiter au maximum les débits de fuites entre la veine et l'extérieur.

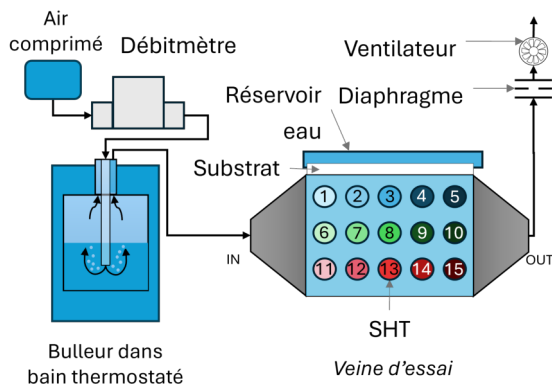


Figure 1 : Schéma du banc expérimental

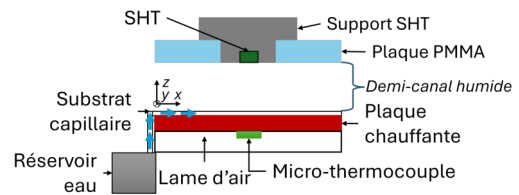


Figure 2 : Vue en coupe du demi-canal

La Figure 2 montre le positionnement d'un capteur d'humidité SHT en paroi. Le réservoir d'eau est positionné sur un côté de la veine et le substrat capillaire est plongé dedans. L'eau remonte la hauteur H selon z avant d'atteindre la partie horizontale de la veine. L'air circule selon la direction de y . Les SHT sont intégrés dans des supports plastiques emmanchés dans une plaque de PMMA transparente. La transparence de la paroi supérieure du demi canal permet de visualiser le front d'imbibition via une caméra placée au dessus de la veine d'essai. Les capteurs

d'humidité sont positionnés de sorte à être à fleur de la paroi supérieure.

Le substrat capillaire est collé sur une plaque chauffante PCB parcourue par un courant électrique dont l'intensité est ajusté pour imposer la densité de flux de chaleur désirée en paroi. Des micro-thermocouples type K ($\Delta T = \pm 0,2^\circ C$) placés en regard des capteurs d'humidité mesurent la température de la face inférieure de la plaque chauffante PCB. Ils permettent de compléter les mesures des températures des capteurs. Pour limiter au maximum les pertes thermiques, la plaque de PCB est déposée sur une partie de veine formant un cadre, le centre du cadre étant ajourée afin que la plaque PCB soit au maximum en contact d'une lame d'air. La veine d'air est placée dans une enceinte isolée dont la température interne est contrôlée.

2.2. Description des protocoles

Les paramètres suivants sont mesurés : humidité relative et température de l'air localement selon le maillage de 15 capteurs d'humidité SHT, humidité relative et température de l'air en entrée et en sortie de la veine via deux capteurs d'humidité SHT, températures sous la plaque chauffante PCB localement via les micro-thermocouples, masse d'eau dans le réservoir d'alimentation du substrat capillaire, images du substrat vue de haut via la caméra, températures intérieure et extérieure de l'enceinte isolée via 2 micro-thermocouples.

Deux protocoles sont employés pour les mesures. Le premier protocole appelé protocole *sec*, consiste à faire circuler l'air dans la veine en chauffant la paroi inférieure du canal. Une fois les températures et humidités relatives stabilisées en sortie, l'eau distillée est introduite dans le réservoir. L'eau remonte dans le substrat par capillarité et imbibe toute ou partie du substrat collé sur la paroi inférieure du canal.

Le deuxième protocole, appelé protocole *imbibé*, consiste à imbiber complètement le substrat capillaire collé en paroi sans circulation d'air ni chauffage. Dans un second temps l'air est introduit dans le demi-canal humide et le chauffage est mis en route simultanément. Dans les 2 cas, l'expérience se poursuit jusqu'à atteindre un état stationnaire dans lequel la variation des grandeurs mesurées n'est plus mesurable.

3. Résultats

Plusieurs campagnes expérimentales ont été menées en faisant varier : le protocole (sec, imbibé), l'humidité relative en entrée, la hauteur d'imbibition, le débit d'air sec en entrée.

3.1. Cas nominal

Afin d'établir un point de comparaison un cas nominal a été déterminé. Il correspond aux conditions standard de l'air rafraîchi issue du canal sec et pénétrant dans le canal humide : $Q_v = 10 \text{ L/min}$, $H = 5,5 \text{ cm}$, $HR_{in} = 70 \%$, $T_{in} = 21,5^\circ C$, $P_{chauffe} = 1 \text{ W}$, Protocole : Sec

La Figure 3 permet de voir l'évolution temporelle typique des températures mesurées en dessous de la plaque chauffante pour ce cas nominal. Les températures et couleurs correspondent aux capteurs SHT présentés sur la Figure 1. L'eau est introduite au temps $t_{0,eau} = 4240 \text{ s}$. La baisse de température pour des $t \geq t_{0,eau}$ témoigne de l'arrivée du front d'imbibition au niveau des thermocouples. Elle est décalée dans le temps entre chaque ligne de thermocouples ce qui montre la progression du front d'imbibition dont la pente s'atténue à mesure qu'il progresse.

L'arrivée du front d'imbibition est aussi visible sur les signaux renvoyés par les capteurs SHT Figure 4. Le capteur SHT11 ne détecte aucune augmentation d'humidité (HR environ constante

à 65 %). Cette mesure confirme la visualisation du substrat montrant une tache d'assèchement sur ce coin du canal sujet à une évaporation intense et un éloignement important du réservoir d'alimentation. Les SHT12 et 14 montrent des taux d'humidité faibles par rapport aux capteurs voisins (environ 75 % HR) bien que cette zone semble humide à la caméra.

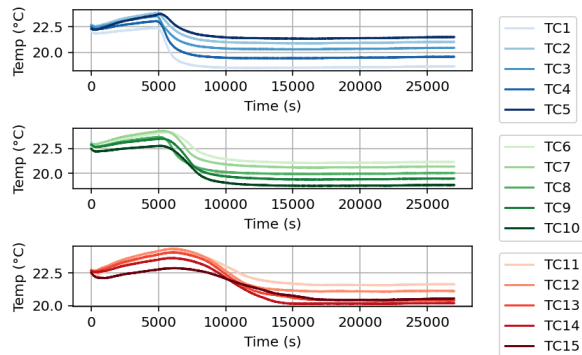


Figure 3 : Évolution temporelle des températures en dessous de la plaque pour le cas nominal $Q_v = 10$ L/min, $H = 5,5$ cm, $HR_{in} = 70$ %, $T_{in} = 21,5^\circ\text{C}$, $P_{chauffe} = 1$ W, Protocole : Sec

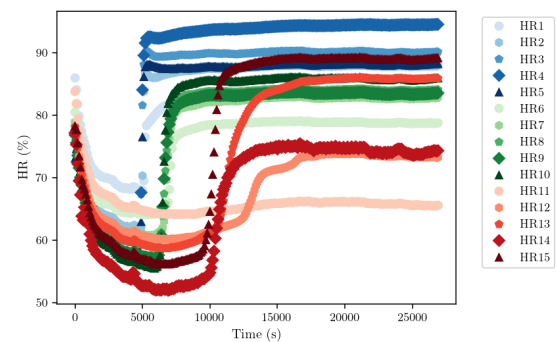


Figure 4 : Évolution temporelle des humidités relatives dans la veine pour le cas nominal $Q_v = 10$ L/min, $H = 5,5$ cm, $HR_{in} = 70$ %, $T_{in} = 21,5^\circ\text{C}$, $P_{chauffe} = 1$ W, Protocole : Sec

3.2. Influence du protocole et de l'humidité relative

Pour chaque protocole, on fait varier l'humidité relative entre 50 et 80 % similairement. L'ordre d'introduction de l'eau et de l'air dans la veine a été modifié comme détaillé plus tôt pour étudier l'hystérésis du système.

La Figure 5 montre que le protocole influe fortement sur la surface asséchée. Ce graphe suggère une hystérésis de l'imbibition ou une dynamique d'assèchement plus lente pour le protocole imbibé.

La Figure 6 montre comme attendu une augmentation de l'évaporation avec la diminution de l'humidité relative de l'air en entrée. L'effet de l'humidité de l'air sur le taux d'évaporation dépend du flux de chaleur imposé en paroi. Pour un flux de 1W, cet effet est moins marqué que celui induit par le chauffage. Les résultats obtenus pour les deux protocoles se recoupent sur leurs incertitudes de mesure ce qui ne permet pas de conclure de manière formelle quant à l'impact du protocole sur la variation d'humidité spécifique de l'air entre l'entrée et la sortie de la veine.

3.3. Influence de la hauteur d'imbibition

La résistance à l'alimentation en eau du substrat capillaire constitue un paramètre sensible du système. Elle est étudiée dans cette étude en faisant varier la différence de hauteur entre la paroi inférieure du canal et la surface libre du bac d'alimentation en eau. La résistance à l'alimentation sera exprimée par la suite en différence de hauteur d'eau (H). La Figure 7 présente la distribution d'humidité spécifique (en $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$) mesurée localement et à un temps t par les capteurs d'humidité. L'air entre dans la veine par la gauche et ressort humidifié par la droite. L'humidité spécifique de l'air injecté dans la veine est voisine de $0,009 \text{ kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$. L'écart-type sur les mesures à l'état stationnaire de l'ordre de $0,1 \text{ g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{as}}$. L'augmentation de la résistance d'imbibition a un impact sensible sur l'humidification de l'air dans le canal.

Une résistance à l'alimentation de 3,5 cm ne crée pas de zone asséchée observable via la

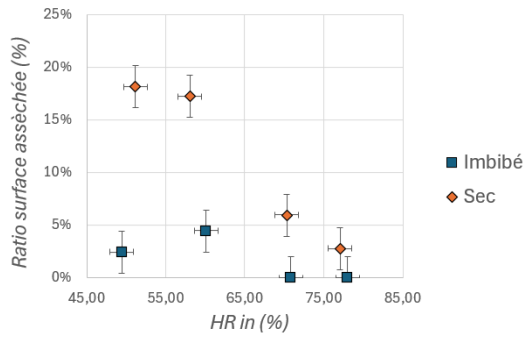


Figure 5 : Pourcentage de zone asséchée du substrat visible à la caméra ($Q_v = 10 \text{ L/min}$, $H = 5,5 \text{ cm}$, $T_{in} \approx 20^\circ\text{C}$, $P_{chauffe} = 1 \text{ W}$)

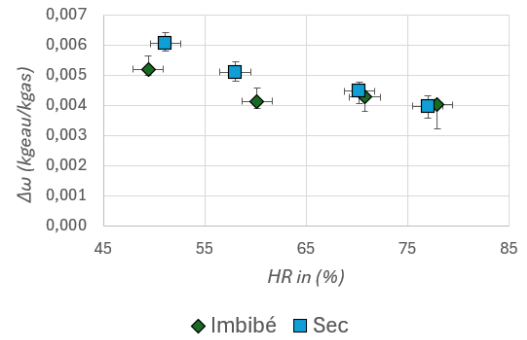


Figure 6 : Variation de l'humidité spécifique sortie entrée selon HR_{in} et selon le protocole utilisé ($Q_v = 10 \text{ L/min}$, $H = 5,5 \text{ cm}$, $T_{in} \approx 20^\circ\text{C}$, $P_{chauffe} = 1 \text{ W}$)

caméra pour les humidités relatives testées. L'observation des humidités spécifiques locales révèlent que la ligne centrale (6-10) est moins humide que la ligne basse (11-15) alors que l'alimentation en eau se fait en $y = 0$. Cette observation peut s'expliquer par une vitesse d'air plus importante au centre la veine. Le transfert convectif serait donc intensifié au centre de la veine ce qui impacterait la mesure de la température au niveau des capteurs SHT. L'humidité spécifique calculée à partir de l'humidité relative et de la température mesurées serait ainsi sous-estimée.

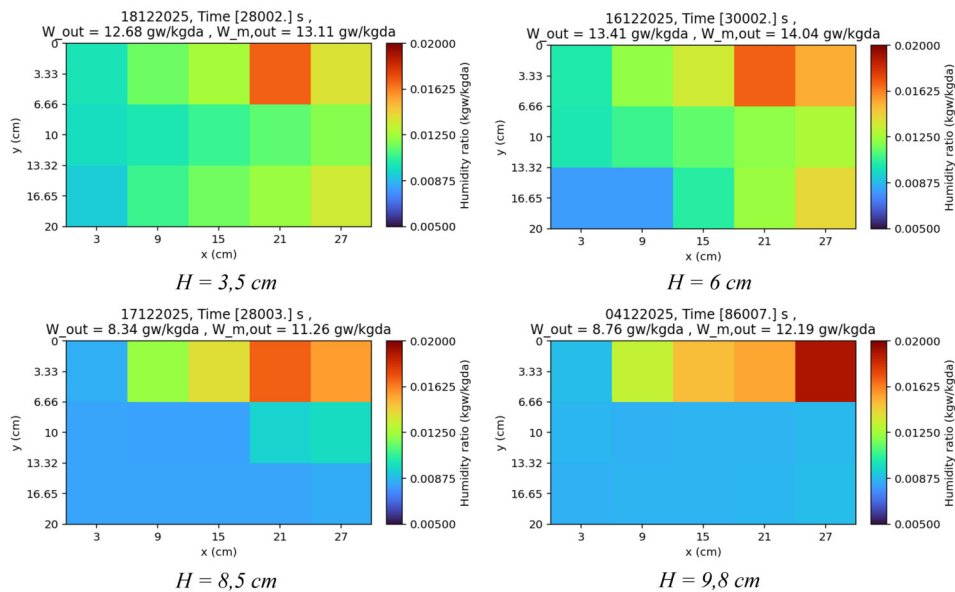


Figure 7 : Répartition locale de l'humidité spécifique en régime permanent selon la hauteur d'imbibition ($Q_v = 10 \text{ L/min}$, $T_{in} \approx 20^\circ\text{C}$, $HR_{in} \approx 60 \%$, $P_{chauffe} = 1 \text{ W}$, Protocole : Sec)

Une zone sèche se développe du côté de l'entrée de l'air ($x=0$) et opposée à l'alimentation en eau pour des résistances à l'alimentation supérieures à 3,5 cm. En effet, la résistance d'imbibition est la plus grande sur cette ligne de part la distance avec l'alimentation. L'augmentation de la

résistance à l'alimentation en eau entraîne l'accroissement de la zone d'assèchement à la fois dans la largeur mais aussi dans la longueur comme cela est visible sur la Figure 7. La forme de la tache d'assèchement est régie par l'alimentation en eau du papier et l'évaporation à sa surface.

3.4. Influence du débit volumique

La capacité du canal humide à refroidir l'air circulant dans le canal sec dépend sensiblement du débit d'air issu de ce dernier et réinjecté dans le canal humide. Pour les débits étudiés le régime d'écoulement de l'air dans le canal est laminaire. Ainsi les coefficients de transferts de chaleur et de masse varient peu. Les flux de chaleur et de masse vers le substrat capillaire sont toutefois impactés. L'augmentation du débit s'accompagne d'une diminution de la variation de température et d'humidité de l'air, d'un accroissement de l'écart à la saturation de l'air et donc d'une augmentation de l'évaporation comme les figures 8 et 9 le montre. L'humidité relative en sortie de veine diminue avec l'augmentation du débit.

L'efficacité de refroidissement est calculée via l'équation 1 (T_{out} : température mesurée en sortie de veine, $T_{out, sat}$: température que l'on aurait en sortie de veine pour un air saturé, $T_{out, sec}$: température que l'on aurait en sortie de veine si le substrat n'était pas alimenté en eau) et représentée sur la Figure 9. La chaleur fournie par la plaque pour élever la température de l'air de T_{in} à $T_{out, sat}$ est déterminée par un bilan enthalpique sur l'air dans le canal humide entre l'entrée et la sortie du canal. La Figure 9 permet de vérifier la diminution attendue de l'efficacité avec l'augmentation du débit venant en partie d'une humification de l'air moins importante.

Cette diminution est toutefois assez faible, l'efficacité de l'échangeur restant supérieure à 93 % pour les débits les plus élevés.

$$\epsilon = \frac{T_{out} - T_{out, sec}}{T_{out, sat} - T_{out, sec}} \quad (1)$$

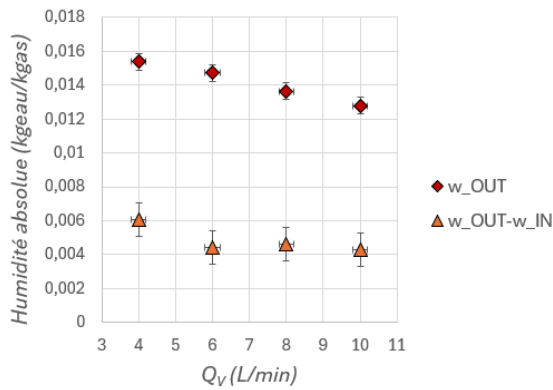


Figure 8 : Influence du débit d'air sec en entrée sur l'humidité spécifique en sortie de veine et la différence d'humidité spécifique entre la sortie et l'entrée ($T_{in} \approx 19^\circ\text{C}$, $H = 3,5 \text{ cm}$, $HR_{in} \approx 70 \%$, $P_{chauffe} = 1 \text{ W}$, Protocole : Sec)

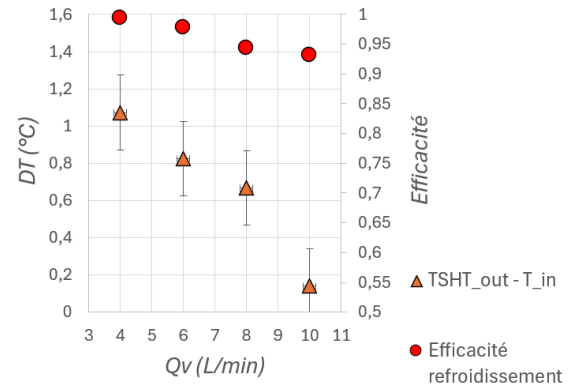


Figure 9 : Influence du débit d'air sec en entrée sur la différence de température sortie/entrée de la veine et le potentiel de refroidissement de l'air humide dans le canal ($T_{in} \approx 19^\circ\text{C}$, $H = 3,5 \text{ cm}$, $HR_{in} \approx 70 \%$, $P_{chauffe} = 1 \text{ W}$, Protocole : Sec)

4. Conclusion

Le rafraîchissement évaporatif est une alternative pertinente pour rafraîchir les habitations, dont une des limites est l'assèchement du substrat capillaire dans les canaux humides. Dans cette étude, une veine d'essai a été développée pour étudier le comportement du canal humide. L'étude paramétrique menée dans cet article a permis de mettre en lumière un effet d'hystérésis sur le développement des taches d'assèchement selon que le substrat capillaire est préalablement mouillé ou non avant de faire circuler de l'air et de chauffer la paroi. L'étude montre qu'il est préférable de démarrer par une imbibition sans circulation d'air pour la mise en route du système afin de limiter les problématiques d'assèchement. La résistance à l'alimentation en eau est un paramètre critique qui intervient dans la conception des systèmes. Il convient d'assurer à la fois une bonne étanchéité du système en évitant toute fuite d'air au niveau du système d'alimentation en eau, sans pénaliser cette alimentation par un serrage trop important. La diminution du débit d'air dans chaque canal est aussi une stratégie intéressante pour limiter l'assèchement du substrat en favorisant l'évaporation et les transferts thermiques mais impacte le débit d'évaporation et la puissance de rafraîchissement. Cependant, il convient de trouver un optimum de débit pour que le flux de chaleur et de masse soit aussi suffisamment important pour répondre aux besoins en rafraîchissement et en renouvellement d'air.

Références

- [1] Coumou, Dim, Alexander Robinson, et Stefan Rahmstorf. *Global Increase in Record-Breaking Monthly-Mean Temperatures*. Climatic Change 118, n°3 (2013) : 771-82.
- [2] Ionita, Monica, Diana E. Caldarescu, et Viorica Nagavciuc. *Compound Hot and Dry Events in Europe : Variability and Large-Scale Drivers*. Frontiers in Climate 3 (juin 2021) : 688991.
- [3] Agence Internationale de l'Energie (AIE), «The Future of Cooling : Opportunities for energy-efficient air conditioning,» International Energy Agency, Paris, France, 2018.
- [4] Mahmood, Muhammad H., Muhammad Sultan, Takahiko Miyazaki, Shigeru Koyama, et Valeriy S. Maisotsenko. « Overview of the Maisotsenko cycle – A way towards dew point evaporative cooling ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 66 (décembre 2016) : 537-55.
- [5] Yang, Mingchang, Hongting Ma, Shuo Ma, Aobing Nong, Yiming Zhang, et Yibai Ma. « Effect of surface wettability on air parameters and performance of indirect evaporative cooler in the presence of primary air condensation ». Journal of Building Engineering 45 (janvier 2022) : 103535.
- [6] Yang, Chuanjun, Weichao Yan, Yu Zhang, et al. « Study on the performance of heat and mass transfer of moisture-conducting fibers for evaporative cooling ». International Journal of Heat and Mass Transfer 231 (octobre 2024) : 125862.
- [7] Chen, Yi, Huaxia Yan, et Yunran Min. « Visualized study of wetting enhancement and thermal performance of fiber-coated indirect evaporative cooler ». Applied Thermal Engineering 221 (février 2023) : 119904.
- [8] Abada, D., C. Maalouf, O. Sotehi, et al. « Performance Evaluation of Fabrics for Evaporative Cooling Applications ». Energy and Buildings 266 (juillet 2022) : 112120.
- [9] Sajjad, Uzair, Naseem Abbas, Khalid Hamid, et al. « A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology ». International Communications in Heat and Mass Transfer 122 (mars 2021) : 105140.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Région Auvergne-Rhône-Alpes pour avoir financé ce projet dans le cadre du projet ESCAPADE (Pack Ambition recherche). Nous remercions également Caeli Energie pour leur expertise apportée sur la compréhension des phénomènes physiques.