

La température du point de rosée T_r dépend uniquement de la température T_{amb} de l'air ambiant et de son humidité relative (HR) [3], [4] selon l'équation (1).

$$T_r = \frac{c \left[\ln \left(\frac{HR}{100} \right) + \frac{bT_{amb}}{c + T_{amb}} \right]}{b - \ln \left(\frac{HR}{100} \right) + \frac{bT_{amb}}{c + T_{amb}}} \quad (1)$$

Avec b et c deux constantes respectivement égales à $b = 17.625 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et $c = 243.04 \text{ } ^\circ\text{C}$.

La différence de température entre l'air ambiant et la surface de condensation entraîne un gradient de pression partielle en vapeur d'eau et donc une diffusion de la vapeur d'eau vers la surface froide. Si l'on considère que toute la vapeur d'eau qui diffuse vers la surface froide subit une transformation de l'état de vapeur vers l'état liquide, le taux de condensation n'est alors limité que par la diffusion des molécules à travers une couche limite de concentration. Ceci s'exprime par l'équation 2 [1]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{\gamma L_v} [P_v(T_{amb}) - P_v(T_s)] \quad (2)$$

Où h est le volume d'eau condensé par unité de surface. k est le coefficient de convection thermique, γ est la constante psychrométrique qui relie les pressions de vapeur et de saturation aux températures sèches et humides, L_v est la chaleur latente de vaporisation. P_v est la pression de vapeur correspondant à la température ambiante T_{amb} et à la température de la surface T_s . L'équation (2) utilise le fait que les couches limites de diffusion des molécules et de la chaleur sont égales par suite de l'égalité inhabituelle du coefficient de diffusion massique avec la diffusivité thermique ($24 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

La collecte d'eau de rosée représente un enjeu important dans des zones arides où les populations ont un accès difficile à l'eau. Il est possible de récupérer plus d'eau de rosée que d'eau de pluie dans certaines régions et à certaines périodes de l'année [5]. Les rendements maximaux des dispositifs existants sont aux alentours de $0.4\text{-}0.5 \text{ L/m}^2/\text{ nuit}$ de rosée alors que le rendement théorique maximal est d'environ $1 \text{ L/m}^2/\text{ nuit}$ de rosée [1].

L'objectif de cette étude est de développer un dispositif expérimental permettant de reproduire en laboratoire la formation de la rosée par un échange radiatif entre une surface et une source froide. Par rapport au prototype proposé en [6], plusieurs améliorations sont implémentées. Tout d'abord, les dimensions du dispositif ont été augmentées significativement d'un facteur 5 à 10. De plus, l'utilisation de l'enceinte climatique permet un contrôle des paramètres T_{amb} et RH plus précis. Cet article présente une caractérisation de la variation de l'intensité du refroidissement radiatif en fonction de l'aire de la surface rayonnante de la source froide et de l'émissivité des substrats.

2. Dispositif expérimental et matériaux

Le dispositif expérimental permettant le refroidissement d'un échantillon par échange radiatif avec de la glace carbonique est décrit par la figure 1. Le dispositif est installé dans une chambre climatique Memmert HPP 750 eco (A) qui permet de réguler l'air intérieur en température ($5\text{-}70 \text{ } ^\circ\text{C}$) et en humidité relative (RH, $10\text{-}90\%$). Les conditions expérimentales étudiées sont $T_{enceinte} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $RH = 85\%$. La chambre radiative (F) et le compartiment à glace carbonique (L) sont séparés par un double vitrage en polypropylène (J) dont la fonction est d'empêcher les échanges thermiques par déplacement de matière tout en assurant une très

bonne transmission du rayonnement infrarouge (IR). La température de sublimation de la glace carbonique est de 195 K et son émissivité est $\epsilon_{carboglance} = 0.95$. D'après la loi de Stefan-Boltzmann, la glace carbonique rayonne une quantité d'énergie moins importante qu'une surface de même émissivité à température ambiante. En revanche sa forte émissivité permet l'absorption du rayonnement provenant de l'échantillon d'après la loi du rayonnement de Kirchhoff.

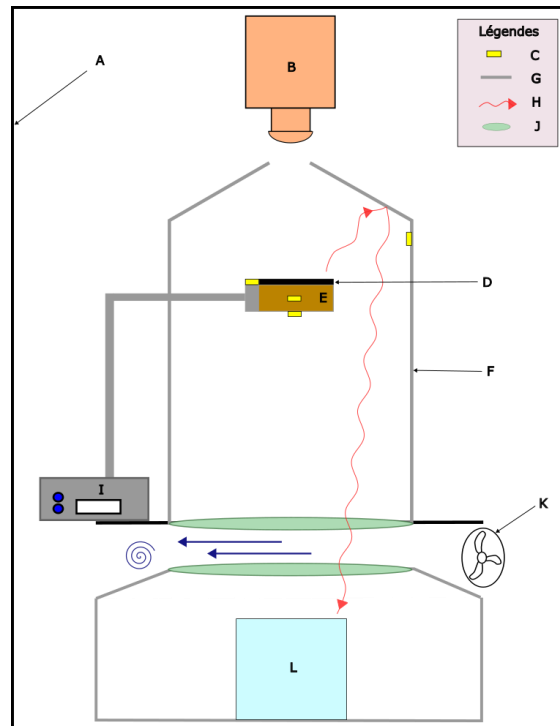


Figure 1 : schéma du dispositif expérimental. A : enceinte climatique. B : caméra infra-rouge. C : thermo-fluxmètres. D : échantillon. E : isolant polyuréthane. F : chambre radiative. G : parois en aluminium. H : représentation de l'échange radiatif. I : balance. J : film de polypropylène. K : ventilation. L : glace carbonique.

Deux réservoirs de glace carbonique sont utilisés afin de faire varier le déficit radiatif, un petit réservoir de dimensions 15x15cm² et un grand réservoir de dimensions 28x28cm². Les parois de la chambre radiative sont en aluminium (G) dont la propriété est de réfléchir le rayonnement IR, augmentant l'échange radiatif entre l'échantillon et la glace carbonique. Un système de ventilation (K) est mis en place entre les deux films de polypropylène afin d'y éviter la condensation d'eau dont la conséquence serait d'absorber et réémettre les radiation IR et donc d'inhiber les échanges radiatifs. Un échantillon (D) est placé sur un porte-échantillon composé d'un isolant en polyuréthane (E) qui repose sur une balance (I). Une caméra thermographique (B) permet la visualisation de la nucléation et de la croissance des gouttes sur l'échantillon. Des thermo-fluxmètres (C) sont disposés sur les parois de l'enceinte, ainsi que sur le porte-échantillon. Les dispositifs (B), (C), et (I) permettent l'acquisition de données tout le long de l'expérience.

2.1. Matériaux

Les surfaces étudiées sont des wafers de Silicium (Si) de dimensions 6x6x0.025 cm³ (L*1*h) et de conductivité thermique égale à 148 W.m⁻¹.K⁻¹, dont on fait varier l'émissivité par traitement plasma. Le traitement a pour conséquence de nano-structurer la surface en y formant des pics dont la hauteur est d'environ 1 µm. Cette texturation de surface a un impact sur les

propriétés radiatives du substrat et augmente son absorptivité. Le matériau obtenu par cette texturation du silicium est appelé Black Silicon (BSi) en référence à sa très grande absorptivité proche de 1 [7], [8]. Une très forte propriété d'absorption du matériau implique donc une très forte propriété d'émission et va donc permettre un refroidissement radiatif plus efficace. Dans le cadre de nos expérimentations, nous considérons les émissivités totales $\varepsilon_{Si} = 0.7$ et $\varepsilon_{BSi} = 0.95$. Il est à noter, cependant, que dès que la condensation commence, l'émissivité de l'eau (0.95-0.98) [9] dans la fenêtre atmosphérique va rapidement dominer l'émissivité du substrat sec.

2.2. Taux de condensation

Le taux de condensation est défini comme l'évolution du volume d'eau condensée par unité de surface et est exprimé en L/m²/h ou mm/h. Expérimentalement, le taux de condensation est obtenu par trois méthodes différentes à partir des mesures fournies par les thermo-fluxmètres (B), la balance (C) et la caméra IR (I) présentés sur la figure 1.

2.2.1. Mesure de flux de chaleur

Des thermo-fluxmètres sont positionnés à divers emplacements du dispositif expérimental, et sont reliés à des systèmes d'acquisitions continues. Les capteurs 1 et 2 sont situés sur les parois de la chambre radiative et renseignent sur la température ambiante T_{amb} (fig.3). Cette mesure dont la précision est de 0.1°C est plus adéquate que la valeur de consigne de l'enceinte climatique. Les thermo-fluxmètre 6 et 7 sont positionnés à côté de la surface, sur la partie supérieure du porte-échantillon (fig.3). Le capteur 7 mesure uniquement le flux radiatif net du capteur tandis que le capteur 8 mesure le flux global qui est la somme du flux radiatif et du flux convectif. La différence entre les deux valeurs enregistrées renseigne donc sur le flux convectif φ_{conv} . A partir de ces deux capteurs, il est possible de déterminer la valeur du flux radiatif incident $\varphi_{rad,sup}$ ainsi que le coefficient de convection k_{sup} sur le porte-échantillon. Les capteurs 4 et 5 (fig.3), identiques aux capteurs 6 et 7, sont placés sous le porte-échantillon et donnent accès au flux radiatif net incident sous le porte échantillon, $\varphi_{rad,inf}$. La figure 2 montre les valeurs des flux radiatifs nets $\varphi_{rad,sup}$ et $\varphi_{rad,inf}$. Le déficit est environ 2 fois plus conséquent sous le porte-échantillon ce qui est cohérent car la face inférieure du porte-échantillon est située en face de la glace carbonique. De plus, on observe que le flux global sur le porte-échantillon est plus important que le flux radiatif net seul, car le flux convectif apporte de l'énergie au capteur, la température ambiante étant supérieure à celle du capteur. Il est à noter que ces capteurs ne sont pas en contact direct avec l'isolant ce qui implique qu'ils soient moins refroidis que le substrat utilisé. Cela permet d'éviter qu'il y ait de la condensation sur les capteurs. Le capteur 3 (fig.3) est situé au centre de l'isolant. Il permet de mesurer la valeur du flux conductif φ_{cond} transmis par l'isolant au substrat. Un thermo-fluxmètre 8 placé sous l'échantillon (fig. 3) permet de mesurer la température de l'échantillon, T_s (supposée uniforme dans l'épaisseur de l'échantillon).

La température T_s de l'échantillon peut être calculée à chaque instant grâce à l'équation (3) :

$$mC_p \frac{dT_s}{dt} = \varepsilon(\varphi_{rad,sup} - \sigma T_s^4) + \varphi_{conv,sup} + \varphi_{cond} \quad (3)$$

Ici m est la masse de l'échantillon et C_p est sa capacité calorifique massique. Le taux de condensation peut par la suite être calculé à partir de l'équation (2). Il est à noter que l'équation (3) introduit une approximation. Nous considérons que l'émissivité totale est égale à

l'absorptivité totale du substrat ce qui implique que l'émissivité spectrale de notre échantillon soit constante. En effet, le flux radiatif reçu par l'échantillon est composé d'un rayonnement dans l'infra-rouge lointain dont la source est la glace carbonique. Le rayonnement émis et le rayonnement reçu par le substrat diffèrent donc par leur domaine spectral. La comparaison entre le calcul de la température de l'échantillon (équation 3) et la mesure du thermo-fluxmètre 8 est présentée sur la figure 3, l'écart moyen est de 0.3 °C.

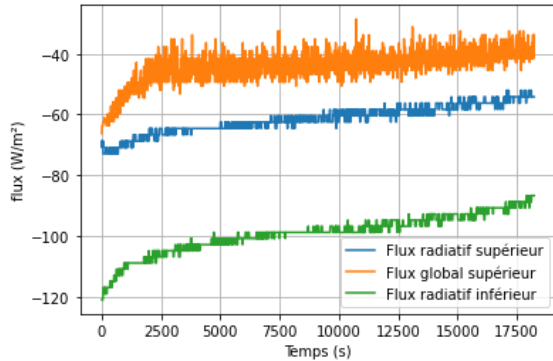


Figure 2 : Flux de chaleur radiatifs et globaux mesurés sur et sous le porte-échantillon.

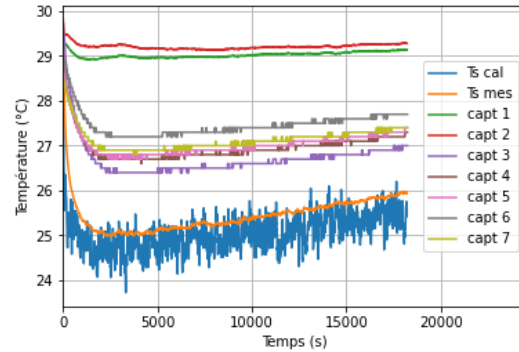


Figure 3 : Evolution des températures mesurées et calculées dans la chambre radiative.

2.2.2. Mesure de masse

La mesure la plus directe du taux de condensation est fournie par la balance sur laquelle repose le porte-échantillon. La balance enregistre une variation de masse qui correspond à la nucléation et à la croissance des gouttes d'eau sur l'échantillon, mais aussi sur les parois du porte-échantillon. La condensation sur les parois du porte-échantillon est diminuée par le fait que les surfaces sont en aluminium, et donc peu émissives. La condensation sur les thermo-fluxmètres survient de manière plus fréquente. Elle est identifiable grâce aux valeurs acquises par les capteurs car l'énergie transmise par la condensation de l'eau perturbe la mesure des différents flux.

2.2.3. Visualisation des gouttes

L'acquisition d'images par caméra thermique permet la visualisation de la croissance des gouttes sur les surfaces lisses (fig. 4). Il est à noter que le gradient de température (fig. 4 et 5) n'est pas une mesure physique réelle mais un effet induit par l'utilisation de bague-allonges qui réduisent le rayonnement capté par la caméra thermique. De plus, l'échelle mesurant la densité de flux énergétique rayonnée par le substrat n'est pas la même entre les figures 4 et 5. Une analyse des images renseigne sur la surface S couverte par chaque goutte. Dans le cas d'une goutte ayant la forme d'une calotte sphérique, le volume est calculé à partir de S connaissant l'angle de contact θ de la goutte sur le substrat, à l'aide de l'équation (4) [10], [11] :

$$V = \frac{S^{3/2}}{\sqrt{\pi}} * \frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{3\sin^3\theta} \quad (4)$$

L'évolution du volume d'eau sur les différentes images s'avère par conséquent être une nouvelle mesure du taux de condensation de la surface. L'angle de contact statique d'une goutte d'eau sur les différentes surfaces a été caractérisé avec un goniomètre Kruss DSA 25S. Sur le BSi, une goutte déposée est dans un état Cassie-Baxter. En revanche, la condensation de l'eau

sur le BSi se fait sous forme de film (état Wenzel, fig. 5) car les nucléi d'eau sont suffisamment petits pour se former au fond des interstices du BSi [12]. La nucléation hétérogène de l'eau dans les interstices est privilégiée lorsque la surface est chimiquement hydrophile, ce qui est le cas pour le Silicium. Dans le cas du BSi, la détermination du volume d'eau condensé à partir des images de thermographie IR n'est donc pas possible.

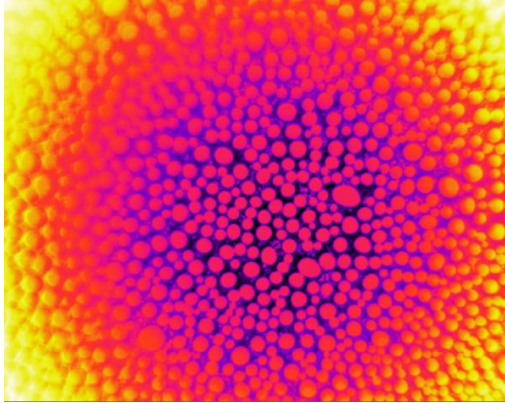


Figure 4 : Visualisation par thermographie IR, condensation en gouttes sur du Si.

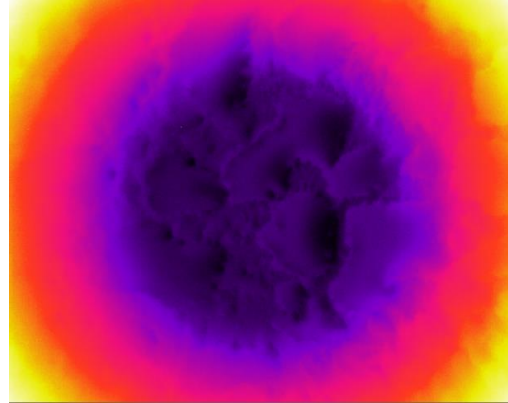


Figure 5 : Visualisation par thermographie IR, condensation en film sur du BSi.

3. Résultats

Nous présentons ici les résultats obtenus lors des expériences menées dans la chambre radiative. Il est à noter que les taux de condensation obtenus par l'analyse des flux ne sont pas renseignés lorsque la température du substrat T_s est proche du point de rosée T_r car les incertitudes sont trop importantes.

3.1. Influence de la source froide

Une première expérience consiste à comparer les taux de condensation sur un échantillon donné (Si) en faisant varier la taille de la cuve de glace carbonique (fig. 6). On observe que le flux radiatif incident sur la surface $\varphi_{rad,sup}$ est compris entre 400 et 415 W/m² avec la petite cuve (15×15 cm²) et vaut entre 355 et 365 W/m² avec la grande cuve (28×28 cm²). On observe que la température du substrat est plus faible avec la grande cuve et que le taux de condensation mesuré par la balance est significativement plus grand.

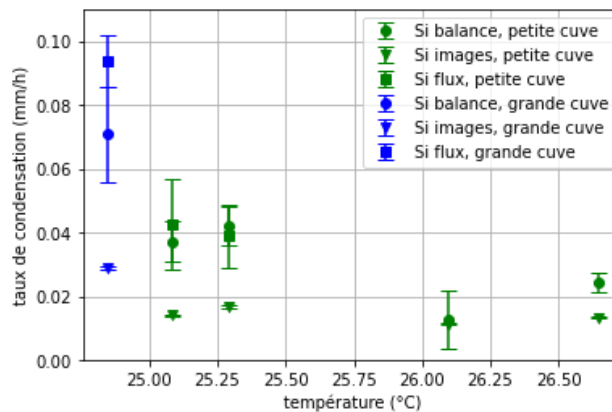


Figure 6 : Taux de condensation mesuré par les méthodes (2.2.1), (2.2.2) et (2.2.3) : influence de la surface de la source froide.

Bien que l'analyse d'images indique des taux de condensation inférieurs à ceux obtenus soit par la balance, soit par les flux, les résultats sont tout de même cohérents. Les images provenant du centre de la surface ne tiennent en effet pas compte des gouttes sur les bords. Or il s'avère que le taux de condensation n'est pas homogène sur la surface [13], la croissance des gouttes étant plus importante sur les bords. Les gouttes de bord peuvent capter les molécules d'eau sur un plus grand angle solide que sur la surface, où elles sont en compétition. Cette compétition conduit à un gradient de concentration dirigé uniquement perpendiculairement à la surface. On constate cependant une différence significative du taux de condensation pour les différentes tailles de cuve. Le taux de condensation mesuré par analyse d'images pour les expériences avec la petite cuve est en effet compris entre 0.11 et 0.17 mm/h alors que celui de la grande cuve est de 0.29 mm/h.

3.2. Effet de l'émissivité du substrat

Une seconde expérience consiste à comparer deux surfaces d'émissivité différentes, Si et BSi (fig.7). Les différences de température entre Si et BSi ne semblent pas significatives par rapport aux incertitudes de mesure car les valeurs ne semblent pas avoir une incidence importante sur le taux de condensation mesuré par la balance. Cette observation corrobore le fait que l'émissivité d'un substrat mouillé est dominée par l'émissivité de l'eau [9]. On remarque par ailleurs que, comme prévu, les taux de condensation augmentent lorsque la température diminue sur un même substrat.

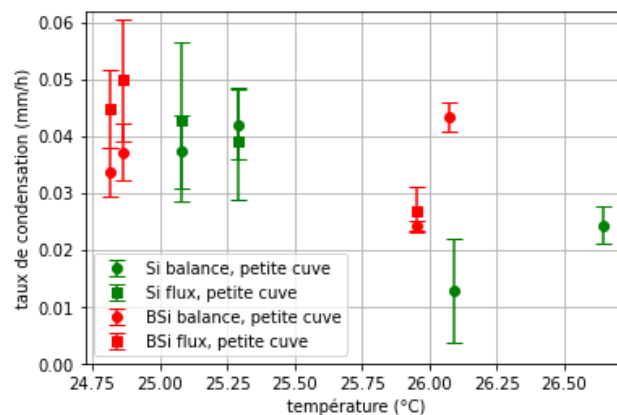


Figure 7 : Comparaison des taux de condensation mesurés sur du Si et du BSi en fonction de la température de la surface.

Il est à noter que les variations des déficits radiatifs ne sont pas équivalentes entre (3.1) et (3.2). On considère comme référence les échantillons Si refroidis par la petite cuve à une température moyenne de 25.75°C. L'utilisation de la grande cuve (3.1) induit une augmentation du déficit radiatif de 33 W/m². En revanche, la variation d'émissivité entre Si et BSi (3.2) induit une augmentation du déficit radiatif de 12.5 W/m², et cette valeur diminue lorsque l'eau se condense et fait varier l'émissivité effective de la surface. Cela explique que les taux de condensation mesurés soient significativement plus importants lors de l'expérience (3.1). On remarque enfin que pour toutes les manipulations faites sur du Si et du BSi, lorsque la différence entre T_s et T_{amb} est suffisamment grande, les taux de condensation mesurés par les flux et par la balance sont cohérents, compte-tenu des barres d'erreur. Ceci valide donc l'utilisation du modèle de croissance des gouttes par diffusion des molécules d'eau à travers la couche limite de concentration.

4. Conclusion

Dans le cadre de l'étude de nouveaux matériaux pour la condensation de l'eau de rosée, la chambre radiative s'avère un dispositif expérimental adapté et efficace pour reproduire en laboratoire les conditions de refroidissement radiatif observées pour la rosée naturelle. Avec ce dispositif, un refroidissement du substrat de quelques °C est obtenu, ce qui permet, dans un air humide, la condensation de l'eau. Deux expérimentations ont permis de faire varier l'intensité du refroidissement radiatif : tout d'abord en modifiant la surface rayonnante de la source froide (glace carbonique), et ensuite en modifiant les propriétés émissives du substrat. Dans ce dernier cas, on observe comme prévu que l'eau domine l'émissivité du substrat mouillé par la condensation. Les taux de condensation obtenus par trois méthodes différentes (pesée, flux, taille des gouttes) se sont avérés être cohérents, démontrant la robustesse des méthodes de traitement des données.

Références

- [1] D. Beysens, *Dew Water*, River Publishers. Gistrup, 2018.
- [2] B. Zhao, M. Hu, X. Ao, N. Chen, et G. Pei, « Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects », *Appl. Energy*, vol. 236, p. 489-513, févr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.018.
- [3] P. Berdahl, M. Martin, et F. Sakkal, « Thermal performance of radiative cooling panels », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 26, n° 6, p. 871-880, juin 1983, doi: 10.1016/S0017-9310(83)80111-2.
- [4] A. Dimoudi et A. Androusoyopoulos, « The cooling performance of a radiator based roof component », *Sol. Energy*, vol. 80, n° 8, p. 1039-1047, août 2006, doi: 10.1016/j.solener.2005.06.017.
- [5] M. Tomaszewicz, M. Abou Najm, D. Beysens, I. Alameddine, E. Bou Zeid, et M. El-Fadel, « Projected climate change impacts upon dew yield in the Mediterranean basin », *Sci. Total Environ.*, vol. 566-567, p. 1339-1348, oct. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.195.
- [6] J. Trosseille, A. Mongruel, L. Royon, et D. Beysens, « Radiative cooling for dew condensation », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 172, p. 121160, juin 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121160.
- [7] K. N. Nguyen, P. Basset, et F. Marty, « On the optical and morphological properties of microstructured Black Silicon obtained by cryogenic-enhanced plasma reactive ion etching », *J Appl Phys*, p. 9, 2013.
- [8] X. Liu *et al.*, « Tailoring silicon for dew water harvesting panels », *iScience*, vol. 24, n° 7, p. 102814, juill. 2021, doi: 10.1016/j.isci.2021.102814.
- [9] J. Trosseille, A. Mongruel, L. Royon, et D. Beysens, « Effective substrate emissivity during dew water condensation », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 183, p. 122078, févr. 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122078.
- [10] J. Trosseille, « Refroidissement radiatif et texturation de surface pour condenseurs de rosée à haut rendement. », p. 208.
- [11] R. D. Narhe, M. D. Khandkar, P. B. Shelke, A. V. Limaye, et D. A. Beysens, « Condensation-induced jumping water drops », *Phys. Rev. E*, vol. 80, n° 3, p. 031604, sept. 2009, doi: 10.1103/PhysRevE.80.031604.
- [12] K. K. Varanasi, M. Hsu, N. Bhate, W. Yang, et T. Deng, « Spatial control in the heterogeneous nucleation of water », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, n° 9, p. 094101, août 2009, doi: 10.1063/1.3200951.
- [13] M.-G. Medici, A. Mongruel, L. Royon, et D. Beysens, « Edge effects on water droplet condensation », *Phys. Rev. E*, vol. 90, n° 6, p. 062403, déc. 2014, doi: 10.1103/PhysRevE.90.062403.

Remerciements

Nous remercions Tarik Bourouina, Elyes Nefzaoui et Frédéric Marty (laboratoire ESYCOM, ESIEE Paris) pour la fabrication des surfaces de black silicium. Ce travail a été réalisé avec le support de l'ANR METAWATER (ANR-20-CE08-0023).