

# Production de rosée en laboratoire par refroidissement radiatif.

## Indoor radiative cooling for dew condensation.

Joachim TROSSEILLE<sup>1\*</sup>, Anne MONGRUEL<sup>1</sup>, Laurent ROYON<sup>2</sup>, Daniel BEYSENS<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, CNRS, ESPCI Paris - PSL University, Sorbonne Université, Sorbonne Paris Cité, 75005, Paris

<sup>2</sup>Laboratoire des Energies de Demain, Sorbonne Paris Cité, UMR 8236 CNRS, 75013, Paris

<sup>3</sup>OPUR, 2 rue Verderet, 75016, Paris, France

\*(auteur correspondant : joachim.trosseille@espci.fr)

**Résumé** - Cette étude propose un dispositif original permettant de reproduire le phénomène de condensation de la vapeur atmosphérique (rosée) en laboratoire par refroidissement radiatif. Grâce à une mesure du taux de condensation sur une surface dont les propriétés radiatives sont connues, il est montré qu'il est possible, en laboratoire, de reproduire la rosée dans des conditions similaires aux conditions naturelles. En mettant en évidence l'importance des propriétés radiatives des surfaces lors de la condensation, cette étude ouvre ainsi la voie à des nouvelles perspectives de recherche sur la collecte de rosée.

**Mots-clés** : Rosée ; Condensation ; Refroidissement radiatif ; Emissivité ; Infrarouges.

**Abstract** - This study presents an original device able to reproduce the phenomenon of atmospheric vapor condensation (dew) in the laboratory by radiative cooling. Measuring the rate of condensation on a surface with known radiative properties, it has been shown that it is possible, in the laboratory, to reproduce dew under conditions similar to natural conditions. By highlighting the importance of the radiative properties of surfaces during condensation, this study opens the way to new research perspectives on dew collection.

**Keywords**: Dew; Condensation; Radiative cooling; Emissivity; Infrared.

### Nomenclature

$h$  Coefficient de convection,  $W.m^{-2}.K^{-1}$   
 $HR$  Humidité relative, %  
 $L$  Chaleur latente de condensation,  $J.kg^{-1}$   
 $M$  Masse d'eau condensée, kg  
 $\dot{m}$  Taux de condensation,  $kg.s^{-1}$   
 $Q$  Débit d'air humide,  $ml.s^{-1}$   
 $R_i$  Rayon, m  
 $S_c$  Surface de condensation,  $m^2$   
 $T$  Température,  $^{\circ}C$

### Symboles grecs

$\epsilon$  Emissivité hémisphérique totale  
 $\lambda$  Conductivité thermique,  $W.m^{-1}.K^{-1}$   
 $\phi$  Densité de flux,  $W.m^{-2}$   
 $\rho$  Masse volumique,  $kg.m^{-3}$

$\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann,  $W.m^{-2}.K^{-4}$   
 $\tau$  Transmittivité totale  
 $\theta$  Angle de contact,  $^{\circ}$

### Indices et exposants

$c$  Condensation  
 $i$  Incident  
 $lat$  Latent  
 $cond$  Conduction  
 $conv$  Convection  
 $pmma$  Plexiglass  
 $r$  Rosée  
 $rad$  Radiatif

## 1. Introduction

La rosée, processus naturel de condensation de l'humidité atmosphérique, est un phénomène nocturne résultant du refroidissement des surfaces par un échange radiatif avec l'atmosphère. Par temps clair et peu venteux, sous certaines conditions de température et d'humidité, des surfaces peuvent voir leur température s'abaisser jusqu'au point de rosée et permettre à la vapeur d'eau présente dans l'air de passer de l'état gazeux à l'état liquide. Dans un contexte où les ressources mondiales en eau potable s'amenuisent, la rosée est une source d'eau alternative importante, complémentaire du brouillard et de l'eau de pluie. Il est en effet possible de collecter la rosée de manière passive et des rendements de collecte allant jusqu'à  $0,5 \text{ L.m}^{-2}.\text{nuit}^{-1}$  sont couramment observés [1]. De nombreuses études ont été menées sur la manière de collecter passivement la rosée, en particulier en modifiant la texture des surfaces [1]. En revanche ces études prennent rarement en compte les propriétés radiatives de ces matériaux, puisqu'elles utilisent un refroidissement par contact des surfaces. Le dispositif présenté dans cette étude, original dans sa conception, a été réalisé afin de reproduire le phénomène de rosée en laboratoire et permet d'étudier de manière contrôlée l'influence des propriétés de surface sur la collecte de la rosée.

## 2. Dispositif expérimental

Pour reproduire le phénomène de rosée le dispositif expérimental doit être en mesure de créer un déficit radiatif entre une surface disposée dans un environnement humide et une source froide. De telles conditions sont possibles au moyen du montage présenté dans la figure 1.

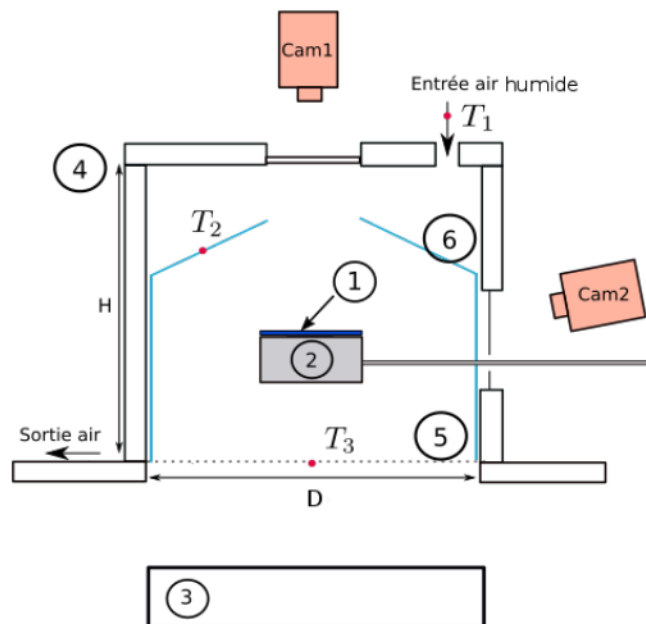


Figure 1 : Dispositif expérimental. 1) Surface étudiée. 2) Support. 3) Source froide. 4) Chambre de condensation. 5) Fenêtre. 6) Miroir.  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  : thermocouples.  $H=10\text{cm}$   $D=8\text{cm}$ .

La surface à étudier (1) est posée sur un support (2) maintenu par un bras, relié à une balance de précision permettant d'enregistrer l'évolution de la masse condensée au cours du temps. L'ensemble est positionné au centre d'une chambre de condensation (4) alimentée en air humide ( $\text{HR} = 95 \%$ , débit  $Q = 14,7 \text{ mL.s}^{-1}$ ) à température ambiante. Une source froide

(3) est positionnée sous la chambre de condensation de sorte qu'un flux thermique radiatif s'établisse entre la surface (1) et la source froide via une fenêtre (5) et un miroir (6). La fenêtre est composée d'un film de polypropylène, transparent aux infrarouges dans les longueurs d'onde considérées (transmission  $\tau > 0,9$ ). Le miroir est une feuille d'aluminium, matériau réfléchissant les infrarouges dans les longueurs d'onde considérées (émissivité  $\varepsilon < 0,2$ ). Trois thermocouples enregistrent respectivement la température de l'air entrant, du miroir et de la fenêtre radiative. Deux caméras (TheImagingSource) permettent de visualiser, au travers de fenêtres, l'évolution de la condensation sur la surface.

Le support (2) étant soumis au rayonnement provenant de la source froide, il est nécessaire qu'il transmette peu la chaleur de manière à isoler la surface (1) du flux de chaleur négatif échangé entre sa face inférieure et la source froide. Il est constitué de liège (conductivité thermique  $\lambda = 0,057 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) et est revêtu d'un film d'aluminium de manière à diminuer les échanges radiatifs.

La chambre humide étant elle aussi soumise au déficit radiatif engendré par la source froide, une chute de température d'environ  $2^\circ\text{C}$  par rapport à la température de l'air entrant  $T_1$  est couramment observée dans la chambre. La température de l'air ambiant est de l'ordre de  $20^\circ\text{C} < T_1 < 24^\circ\text{C}$  tandis que les températures du miroir  $T_2$  et de la fenêtre radiative  $T_3$  sont comprises entre  $18^\circ\text{C}$  et  $22^\circ\text{C}$ . Etant donné le confinement de l'air dans la chambre (faible débit et faibles dimensions), sa température est proche de celles des parois, soit  $18^\circ\text{C} < T_{air} < 22^\circ\text{C}$ .

Le flux radiatif incident  $\varphi_i$  sur la surface étudiée (1) et provenant de toutes les directions du demi-espace supérieur et dans toutes les longueurs d'ondes est mesuré grâce à un capteur de flux radiatif. Sa valeur est de l'ordre de  $\varphi_i \simeq 350 \text{ W.m}^{-2}$ . Connaissant le flux incident, l'émissivité du matériau et sa température, il est ainsi possible, en écrivant un bilan thermique, de connaître le déficit radiatif subi par la surface étudiée (1).

### 3. Refroidissement radiatif

Pour s'assurer du caractère radiatif du refroidissement deux expériences sont réalisées. Une première expérience (figure 2a) consiste à refroidir un bloc de plexiglass (PMMA) par contact dans un environnement humide et observer la condensation. Le bloc est positionné sur le support de la chambre de condensation décrite dans le paragraphe précédent, la source froide étant remplacée par un module Peltier collé à la base du bloc pour le refroidir. La figure 2a montre la répartition de la condensation sur une face latérale du bloc et représente sa carte thermique, les températures les plus faibles correspondant aux condensations les plus fortes. La deuxième expérience (figure 2b) consiste à insérer le bloc dans la chambre de condensation en utilisant la source froide radiative et dans les mêmes conditions hygrométriques que pour la première expérience. Le bloc de plexiglass a pour dimensions  $10 \times 13 \times 8 \text{ mm}$ , une conductivité thermique  $\lambda_{pmma} = 0,19 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  [2] et une émissivité  $\varepsilon_{pmma} > 0,9$  [3]. La valeur élevée de cette dernière permet de considérer le plexiglass comme un matériau opaque aux infrarouges. De plus l'émissivité du pmma étant proche de celle de l'eau ( $\varepsilon_{eau} \simeq 0,95$ ), la condensation de gouttes d'eau sur celui-ci ne modifie pas substantiellement les échanges radiatifs avec la source froide et la stabilité du flux radiatif est conservée au cours de l'expérience. Dans les deux expériences la température de la base de l'échantillon est égale à  $T_{base} = 16,4^\circ\text{C}$ , la température de l'air entrant est de  $T_1 = 21,8^\circ\text{C}$  et l'humidité relative de  $\text{HR} = 95 \%$ .

La figure 2a montre que dans le cas du refroidissement conductif les conditions thermiques ne sont pas remplies sur toute la surface du bloc pour condenser. En effet ce dernier se comporte comme une ailette. Le déficit thermique provient de sa base et la chaleur s'évacue par celle-ci.

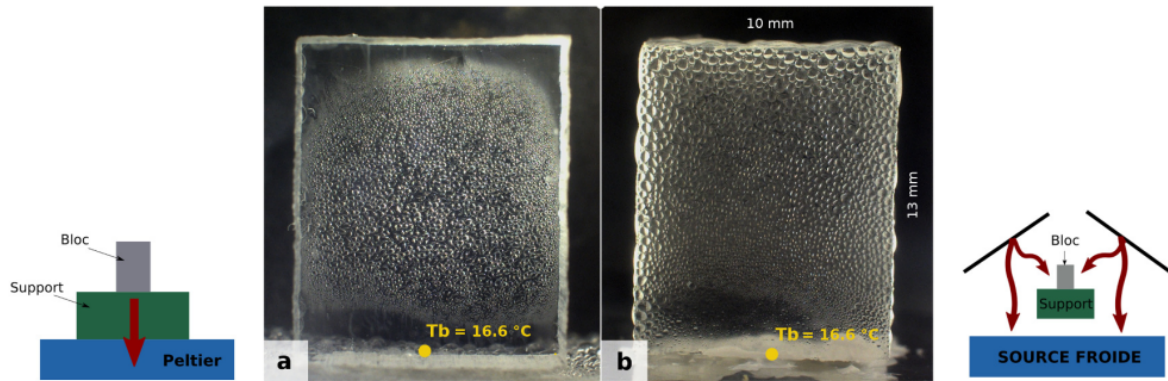


Figure 2 : Vue de côté (caméra Cam2) d'un bloc de PMMA sous condensation. a : Refroidissement par contact. b : Refroidissement radiatif.  $t=5830s$  après début de la condensation,  $T1 = 21,8^{\circ}C$ ,  $T_{base} = 16,4^{\circ}C$ ,  $HR=95\%$

Un gradient de température est ainsi créé tel que le haut du bloc, réchauffé par convection, n'est pas suffisamment froid pour qu'il y ait condensation. En revanche la figure 2b montre que dans le cas d'un refroidissement radiatif tout le bloc est propice à la condensation. Ici toute la surface est soumise au rayonnement et la chaleur s'évacue par l'extérieur, les conditions thermiques nécessaires à la condensation sont ainsi remplies sur toute la surface du bloc. On a bien un refroidissement principalement radiatif.

#### 4. Taux de condensation

De manière à comparer l'expérience à la rosée naturelle, on mesure le taux de condensation sur une surface dont les propriétés radiatives sont connues. Pour cela on place sur le support un disque fin de PVC d'émissivité  $\varepsilon_{pvc} = 0,95$  et d'aire  $S_c = 7,07 \times 10^{-4} m^2$ . Les images obtenues par la caméra Cam1 sont analysées par un traitement de reconnaissance automatique permettant de détecter le contour des gouttes présentes sur la surface et d'en suivre l'évolution avec le temps, comme le montre la figure 3.

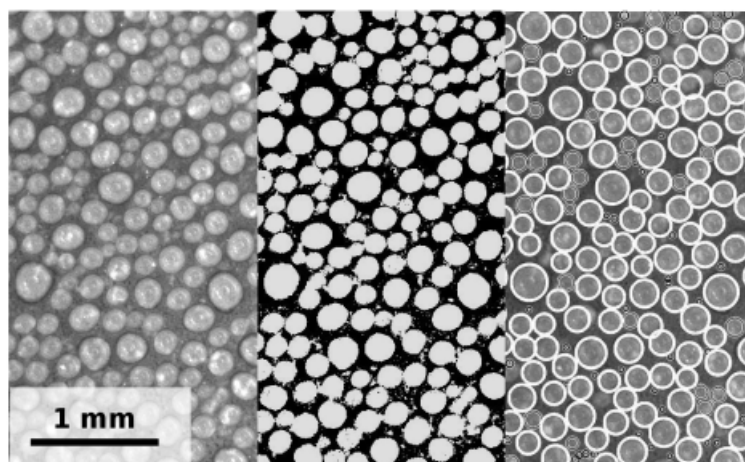


Figure 3 : Détection des contours. Gauche : image non traitée. Centre, droite : reconnaissance des contours.  $t=2300s$ . Emissivité  $\varepsilon_{pvc} = 0,95$ , Angle de contact  $\theta_{pvc} = 84,6^{\circ}$ ,  $T_{air} = 20,3^{\circ}C$ ,  $HR = 95\%$ , Débit d'air humide  $Q = 14.7 mL.s^{-1}$ .

Une analyse fine des images nous donne accès à l'évolution au cours du temps du rayon  $R_i$  de chaque goutte.  $R_i$  est ici le rayon de la projection de la goutte sur le plan de la surface de condensation (*i.e.* le rayon de la base de la goutte pour des gouttes d'angle de contact  $\theta < 90^\circ$ ), détecté avec une précision de  $\Delta R_i = 30 \mu\text{m}$ . Connaissant l'angle de contact  $\theta$  de l'eau sur la surface on peut ainsi remonter à l'évolution du volume d'eau condensé au cours du temps et à sa masse  $M$  via l'équation (1).

$$M = \pi \rho f(\theta) \sum R_i^3 \quad (1)$$

Avec  $\rho$  la masse volumique de l'eau et  $f(\theta)$  une fonction de volume dépendante de l'angle de contact [1] tel que

$$f(\theta) = \frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{3\sin^3\theta} \quad (2)$$

Ici l'angle de contact est un angle moyenné sur l'ensemble de l'assemblée de gouttes et est calculé grâce à la relation 3 entre l'angle de contact moyen et le taux de couverture  $\varepsilon^2$  des gouttes [4] sur la surface.

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{\theta}{180} \quad (3)$$

On obtient pour le PVC un angle de contact moyen  $\theta_{pvc} = 84,6^\circ$ , proche de l'angle de contact d'avancée  $\theta_a = 87,2^\circ$  mesuré indépendamment.

Le taux de couverture est déterminé grâce à la détection des contours de gouttes. La figure 4 montre l'évolution de la masse d'eau condensée sur le disque de PVC, avec un taux de condensation de  $\dot{m} = 1,1 \times 10^{-8} \text{ kg.s}^{-1}$ , ainsi que le taux de couverture  $\varepsilon^2 = 0,53$ . Le fait que ce dernier soit constant montre que le régime permanent de condensation est atteint [4].

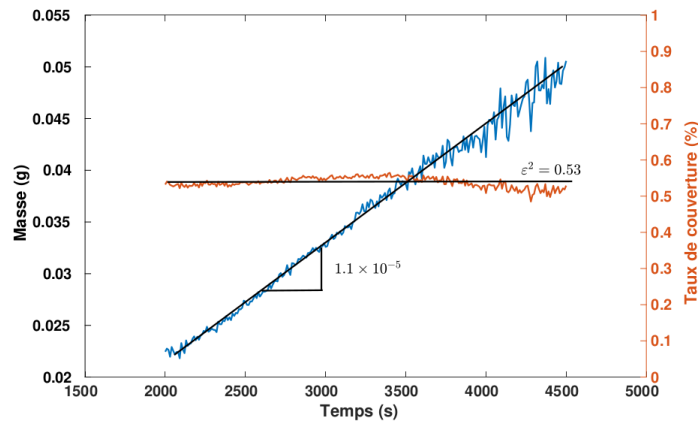


Figure 4 : Courbe de l'évolution de la masse condensée par refroidissement radiatif sur un disque de PVC d'une surface  $S_c = 7,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . Emissivité  $\varepsilon_{pvc} = 0,95$ , Angle de contact  $\theta_{pvc} = 84,6^\circ$ ,  $T_{air} = 20,3^\circ\text{C}$ ,  $HR = 95 \%$ , Débit d'air humide  $Q = 14.7 \text{ mL.s}^{-1}$

On peut remarquer que pour une condensation de 10h, correspondant à une nuit de rosée, on obtiendrait un volume d'eau condensée de  $0,56 \text{ L.m}^{-2}$ , ce qui est tout à fait comparable à une rosée classique [1].

A l'équilibre thermique et en présence de condensation, le bilan thermique sur la face supérieure du disque de PVC s'écrit sous la forme :

$$-\varphi_{lat} = \varphi_{rad} + \varphi_{cond} + \varphi_{conv} \quad (4)$$

Avec  $\varphi_{lat}$  la puissance thermique dégagée par la condensation de l'eau sur la surface,  $\varphi_{rad}$  le flux net surfacique échangé par rayonnement, négatif dans le cas d'un refroidissement radiatif,  $\varphi_{conv}$  le flux surfacique échangé par convection avec l'air ambiant et  $\varphi_{cond}$  le flux surfacique échangé par conduction avec le support.

La puissance thermique nécessaire à la condensation de l'eau sur la surface peut être calculée à partir du taux de condensation  $\dot{m}$  tel que  $\varphi_{lat} = L \times \dot{m}/S_c$  avec  $L$  la chaleur latente de condensation de l'eau. On obtient ainsi  $\varphi_{lat} = 38,9 \text{ W.m}^{-2}$ .

Le flux radiatif  $\varphi_{rad}$ , correspondant au déficit radiatif, est égal à la différence entre le flux absorbé par la surface et le flux émis par la surface. En admettant que le matériau suit la loi de Kirchhoff, le flux radiatif échangé s'écrit :

$$\varphi_{rad} = \varepsilon (\varphi_i - \sigma T_c^4) \quad (5)$$

où  $T_c$  est la température de la surface,  $\varphi_i$  est la densité de flux radiatif incident, et  $\varepsilon$  l'émissivité. Dans un environnement à  $T_{air} = 20,3^\circ\text{C}$  et  $\text{HR} = 95\%$ , la température de rosée est égale à  $T_r = 19,5^\circ\text{C}$ . Pendant la condensation, on peut considérer que la température de la surface de condensation  $T_c$  est voisine de la température de rosée  $T_r$  [1], il est ainsi possible d'en avoir une valeur approchée de  $T_c$ . Durant la condensation, la surface soumise au rayonnement est composée non seulement de la surface de base mais aussi des gouttes elles-mêmes. L'émissivité résultante doit donc prendre en compte les deux matériaux. Ici l'émissivité de l'eau ( $\varepsilon_{eau} \simeq 0,95$ ) est très proche de l'émissivité de la surface, on peut donc considérer une seule émissivité pour le calcul. En posant  $T_c \simeq T_r$  et  $\varphi_i = 350 \text{ W.m}^{-2}$  on obtient un déficit radiatif de  $\varphi_{rad} = -62,3 \text{ W.m}^{-2}$ .

Le flux convectif est calculé d'après la loi de Newton :

$$\varphi_{conv} = h (T_{air} - T_c) \quad (6)$$

Avec  $h = 3,9 \pm 0,4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  le coefficient de convection pour la surface supérieure d'un disque froid horizontal en convection naturelle [5]. En prenant la température de surface égale à la température de rosée on trouve  $\varphi_{conv} = 3,1 \text{ W.m}^{-2}$ .

Enfin, pour que le bilan (4) soit à l'équilibre il est nécessaire d'avoir un flux conductif de  $\varphi_{cond} = 20,3 \text{ W.m}^{-2}$ . Etant données les dimensions et la faible conductivité du support cette valeur est acceptable.

## 5. Pesée

Le taux de condensation déterminé précédemment permet de donner un ordre de grandeur pour une surface témoin, mais la méthode de reconnaissance ne peut être efficace que sur une surface plane sur laquelle la détection optique des gouttes est possible. De manière à pouvoir étudier des surfaces plus complexes on utilise la balance pour peser l'eau condensée sur l'ensemble {objet étudié(1) + support(2)} (voir figure 1). La courbe A de la figure 5 montre l'évolution de la masse d'eau condensée sur l'ensemble {disque PVC + support}. La courbe

A\* correspond à la masse condensée sur le disque de PVC seul, détectée visuellement au paragraphe 4.

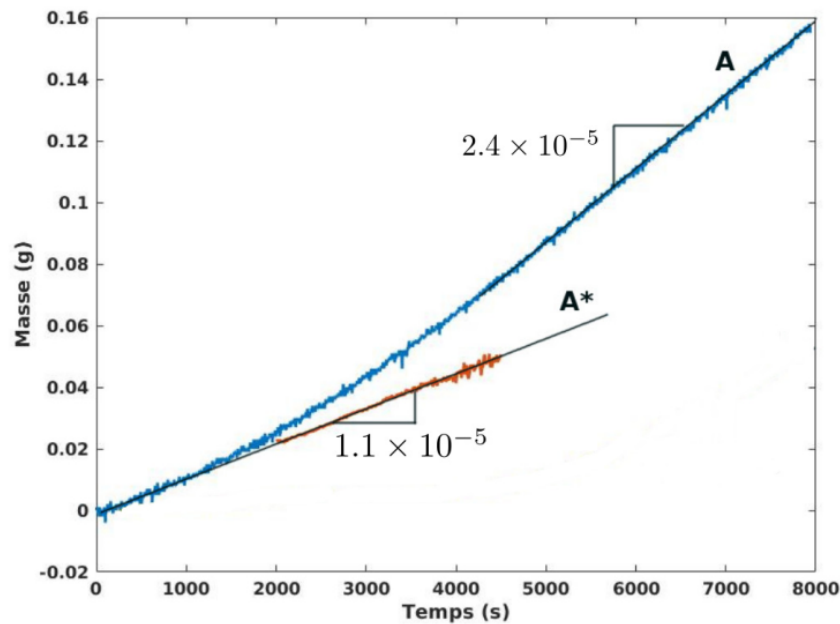


Figure 5 : Masse d'eau condensée. A : sur l'ensemble { Disque PVC + Support } . A\* : sur le disque de PVC seul et déterminé par méthode optique.  $T_{air} = 20,3^{\circ}C$ ,  $HR = 95\%$ , Débit d'air humide  $Q = 14,7$  mL.s<sup>-1</sup>.

Si la courbe A\* est linéaire avec un taux de condensation de  $1,1 \times 10^{-8}$  kg.s<sup>-1</sup>, ce n'est pas le cas pour la courbe A qui atteint son régime permanent environ 5000s après le début de l'expérience avec un taux de condensation de  $2,4 \times 10^{-8}$  kg.s<sup>-1</sup>. Cette différence de taux de condensation en régime permanent est due au fait que la courbe A\* ne concerne que la condensation sur le disque de PVC, posé sur le support, alors que la courbe A prend aussi en compte la condensation sur le support. Ce dernier est donc lui aussi un lieu de condensation. L'existence d'un régime transitoire dans la dynamique de condensation sur le support s'explique par la différence d'émissivité entre l'aluminium recouvrant le support ( $\varepsilon_{al} < 0,2$ ) et l'eau ( $\varepsilon_{eau} \simeq 0,95$ ). En effet cette dernière remplace la surface en aluminium du support lors de la condensation, augmentant ainsi le flux radiatif échangé ( $\varphi_{rad} \sim \varepsilon\sigma T_c^4$ ) et le taux de condensation. Le régime transitoire prend fin lorsque le taux de couverture de surface des gouttes condensées se stabilise, un nouvel équilibre thermique étant ainsi atteint.

## 6. Conclusion

Ce travail a présenté une technique qui s'appuie sur un échange radiatif pour refroidir une surface et permettre de reproduire le phénomène de rosée en laboratoire. Le dispositif est validé en comparant deux expériences impliquant respectivement un refroidissement radiatif et un refroidissement par contact. Une surface radiativement noire et dont les propriétés de mouillage sont connues est utilisée pour déterminer le taux de condensation sur un corps noir, permettant ainsi de vérifier que la condensation se produit dans les mêmes conditions thermiques et radiatives que le phénomène naturel. Ce dispositif, reproduisant pour la première fois le phénomène de rosée par refroidissement radiatif en laboratoire, permet d'ouvrir de nouvelles voies de recherche sur la collecte de la rosée, en particulier sur le rôle des propriétés radiatives

des matériaux utilisés comme surfaces de condensation. De plus, comme le montre la figure 6, ce dispositif permet de réaliser de la condensation sur des surfaces plus complexes jusqu'à présent inaccessibles à l'étude.

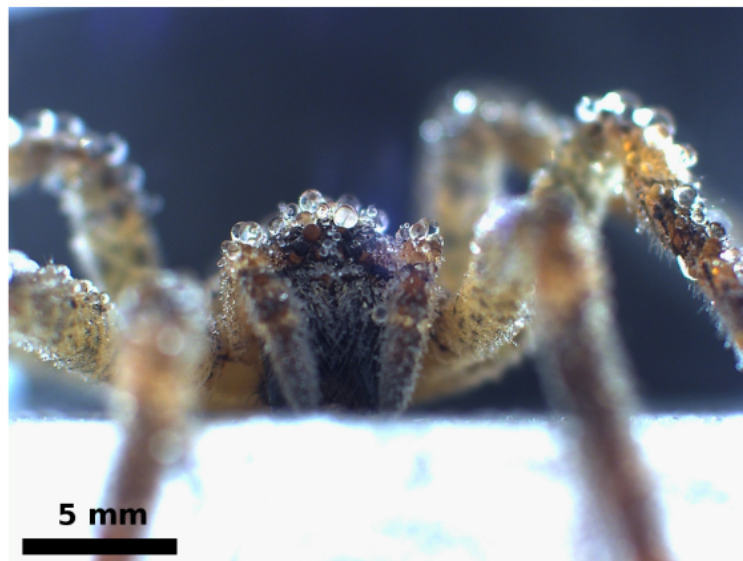


Figure 6 : Formation de rosée sur une araignée.  $t=7300s$ . Emissivité  $\varepsilon \simeq 0,9$ ,  $T_{air} = 23,7^{\circ}C$ ,  $HR = 95\%$ , Débit d'air humide  $Q = 14,7 mL.s^{-1}$ .

## Références

- [1] D. Beysens, *Dew water*, River Publishers (2018)
- [2] M.J. Assael et. al, Thermal Conductivity of Polymethyl Methacrylate (PMMA) and Borosilicate Crown Glass BK7, *Int. J. Thermophysics* 26-5(2005), 1595-1605.
- [3] M. Forsth A. Roos, Absorptivity and its dependence on heat source temperature and degree of thermal breakdown, *Fire Mater*, 35 (2011), 285-301.
- [4] H. Zhao, D. Beysens, From droplet growth to film growth on a heterogeneous surface : Condensation associated with a wettability gradient, *Langmuir*, 11 (1995), 627-664.
- [5] E. Radziemska, W. Lewandowski, Heat transfer by natural convection from an isothermal downward-facing round plate in unlimited space, *Applied Energy* 68 (2001), 347-366.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie de Sorbonne Université (UMR 7590-Sorbonne Université-CNRS-MNHN/IRD) pour les mesures de spectroscopie IR.