Condensation et collecte de l'eau de rosée sur des substrats micro-rainurés.

Laurent ROYON[1*], Pierre Brice BINTEIN[2], Henri LHUISSIER[3], Anne MONGRUEL[4], Daniel BEYSENS[4,5]

[1]Matière et Systèmes Complexes, CNRS UMR 7057, Univ Paris Diderot, Paris Sorbonne Cité, F-75013, Paris, France
[2]Laboratoire LIED, UMR 8236, CNRS, Univ Paris Diderot, Paris Sorbonne Cité, F-75013, Paris, France
[3]Laboratoire IUSTI, UMR 7343 CNRS, Aix Marseille Université, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France
[4]Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, UMR 7636 CNRS - ESPCI - Université Pierre et Marie Curie - Université Paris Diderot, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris, France
[5]OPUR, 60 rue Emeriau, 75015 Paris, France
[*](auteur correspondant : laurent.royon@univ-paris-diderot.fr)

Résumé - Ce travail présente une étude expérimentale sur la condensation d'eau atmosphérique sur des substrats rainurés. L'influence de plusieurs paramètres physiques (taux d'humidité, inclinaison du substrat) et géométriques (taille des rainures) sur le processus de condensation et de collecte des gouttes est présentée. Le processus est étudié *via* des mesures de masse d'eau collectée au cours du temps, couplées à des visualisations des gouttes formées sur le substrat et de leur ruissellement. Les résultats montrent que les rainures permettent d'accroître la quantité d'eau collectée, en favorisant le phénomène de coalescence et ainsi, un ruissellement prématuré des gouttes.

Nomenclature

RH	taux d'humidité,
h	profondeur de la rainure, m
g	constante de gravité, ms^{-2}
r	rayon de la ligne triple, m
w	largeur du plateau, m
v	volume, m^3
s	largeur inter-rainure, m
a,	largeur de la goutte, m
b	longueur de la goutte, m
T	température, K
Symboles grecs	
α, θ	angle d'inclinaison, °
γ	tension de surface, Nm^{-1}
Indices et exposants	
av	avancée
r	recul
p	paroi

1. Introduction

Contrairement au filet à brouillard qui capture des gouttes d'eau présentes dans l'atmosphère, le condenseur de rosée développe, grâce à un échange radiatif avec le ciel, un refroidissement en surface lui permettant de condenser de la vapeur d'eau dès que le point de rosée est atteint. Ce procédé a l'avantage de pouvoir être mis en pratique dans de nombreuses régions du globe, ce qui n'est pas le cas du filet à brouillard qui se limite à des régions bien spécifiques (régions côtières et d'altitude).

Actuellement, le nombre de dispositifs en exploitation est en nombre relativement restreint en raison d'un rendement encore trop faible (<0,3 litre/ m^2/jour). La quantité d'eau récoltée est limitée par le ruissellement des gouttes, qui restent accrochées par les forces de tensions superficielles. Ces gouttes non collectées s'évaporent le matin aux premiers rayons du soleil.

Pour lever ce verrou, nous avons proposé récemment [1] l'exploitation de discontinuités géométriques ou thermiques qui apparaissent sur le haut des condenseurs. Les gouttes y collectent plus d'humidité et grossissent plus vite qu'au milieu de la surface. Elles atteignent alors plus rapidement la taille critique (~ mm) de détachement du support par gravité. En glissant, elles entrainent les gouttes plus petites de la surface, agissant comme des essuie-glaces naturels.

La démarche proposée ici consiste à favoriser la coalescence des gouttes grâce à des micro-rainures sur le substrat de condensation. On obtient ainsi, au lieu de nombreuses petites gouttes, quelques grosses gouttes de taille supérieure à la taille critique, qui vont pouvoir glisser et être collectées.

Ce travail concerne l'étude menée sur ces substrats à partir d'un dispositif de laboratoire où le phénomène de condensation est induit de façon active (le substrat est maintenu à une température inférieure à la température de rosée). L'influence de plusieurs paramètres physiques (taux d'humidité, inclinaison du substrat) et géométriques (taille des rainures) sur le processus de condensation et de collecte des gouttes est présenté.

2 Matériel et Méthode

Une chambre de condensation permettant de maintenir une atmosphère contrôlée en température et humidité a été développée (Fig.1). Les substrats réalisés se présentent sous forme de rainures de différents rapports d'aspect. On note w la largeur du plateau, s la largeur de la rainure et h la profondeur de la rainure (Fig. 2). Développés par la technique de photolithographie, ils sont réalisés à partir de disques de silicium couverts d'une résine époxy négatives (SU8) sur laquelle les motifs d'un masque permettent de définir des rainures de hauteur et largeur contrôlées. Le substrat est disposé sur une plaque à effet Peltier, qui permet de maintenir à sa surface une température inférieure à la température de rosée. L'ensemble est fixé sur un support inclinable. Une bande de tissu, placée à une distance de 100 µm du bas de la plaque, compose le collecteur des gouttes, que l'on dispose sur une balance précise au $1/10^{ème}$ de mg. Un enregistrement de la masse d'eau récupérée est réalisé tout au long de l'expérience. L'angle de contact d'une goutte d'eau sur ces substrats est de l'ordre de 50°.

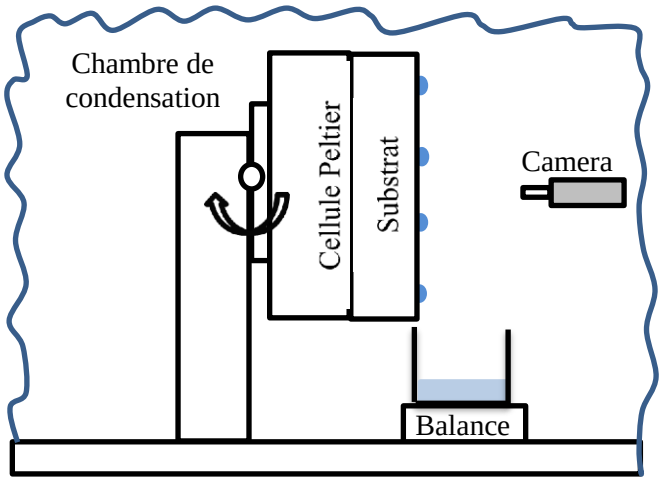


Fig. 1 : *schéma du dispositif expérimental*

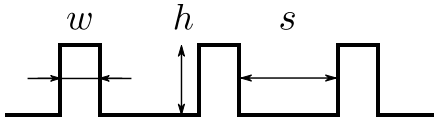


Fig. 2 : *schéma en coupe du substrat rainuré, et notations associées.*

Le protocole consiste à imposer, à partir d'un temps initial t=0, une température de surface T_P inférieure à la température de rosée. A partir de cet instant, une caméra filme en continu la surface du substrat et l'enregistrement de la masse d'eau collectée au moyen d'une balance est déclenché. Différentes expériences sont réalisées en vue d'étudier l'influence de plusieurs paramètres comme l'inclinaison du substrat, les paramètres géométriques (w, s, h) et l'humidité relative *RH*.

2. Résultats et discussion

2.1 Comparaison de la condensation sur surface lisse et surface rainurée

La figure 3 présente un cliché obtenu sur un substrat rainuré sur la partie gauche et laissé lisse sur la partie droite, après 1h de condensation. Les paramètres géométriques de la surface rainurée sont s = w = 100 µm et h = 65 µm. L'humidité relative, *RH,* et la température, *T,* de l'enceinte sont respectivement 40% et 33°C. Le substrat est maintenu à T_P= 4°C en surface. On peut observer que les gouttes sur le substrat rainuré sont significativement plus grosses que sur le substrat lisse. Etant donné que les résistances thermiques de la partie plate et rainurée respectivement sont similaires, ce résultat n'est attribuable pas à des différences au niveau du flux de vapeur et du le flux de chaleur, mais bien à la texturation qui favorise la coalescence des gouttes et leur ruissellement. Ce résultat a déjà été observé sur des substrats horizontaux [2]. Il correspond à la coalescence avec l'eau qui se forme sur le plateau entre les rainures, par un mouvement « au petit bonheur » induit par leur coalescence mutuelle [3].

Lorsque le substrat est incliné d'un angle α>0°, ces gouttes se détachent dès qu'elles atteignent une taille critique voisine de qq mm^3. Les gouttes arrivant en bas du substrat sont récupérées par le collecteur. La figure 4 montre un exemple de l'évolution de la masse d'eau collectée en fonction du temps pour deux surfaces rainurées de pas différents s = w = 100 µm et 300 µm mais de même hauteur h = 65 µm. Pour la surface, aucune goutte n'est collectée au bout des 5 heures d'expériences. Pour les différentes surfaces rainurées, la masse d'eau collectée montre une variation quasi-linéaire avec le temps ; le démarrage du processus dépend des aspects géométriques de la texture. On note $t_{\downarrow}$ le temps correspondant à la première goutte d'eau collectée. En pointillés figure l'évolution de la masse d'eau accrochée sur la surface lisse de référence (de même dimension que la partie rainurée). Cette masse a été evaluée en absorbant l'eau au moyen d'une plaquette de buvard. On peut ainsi en déduire la masse d'eau non récoltée entre le temps initial et le temps $t_{\downarrow}$.

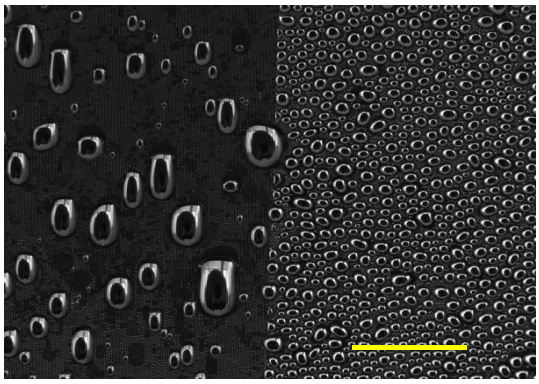


Fig. 3 : *photo de surface rainurée dans le sens vertical ($s = w = 100$ µm, $h = 65$ µm, à gauche) et de la surface lisse de référence (à droite) après une heure de condensation, pour RH = 40%, T = 33°C, et T_P = 4°C (échelle: 1cm).*

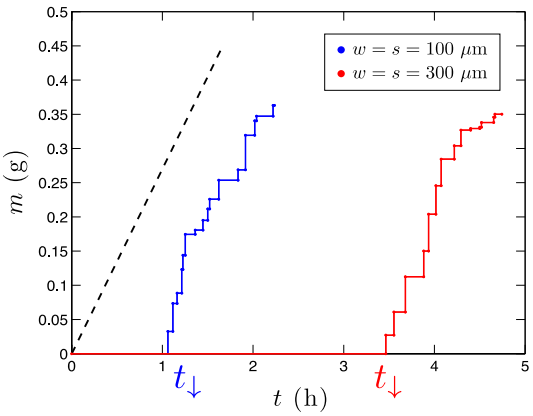


Fig. 4 : *masse d'eau collectée au cours du temps pour deux surfaces rainurées de pas différents (et même hauteur h= 65 µm) dans les conditions de la figure 3; la première goutte est récoltée à $t_{\downarrow}$.*

2.2 Influence de l'humidité relative *RH*

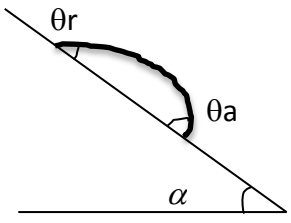
La figure 5 présente le temps de ruissellement de la première goutte en fonction du *RH* de la chambre de condensation. Ce résultat est obtenu pour un substrat de caractéristiques géométrique $s = w = h$= 65 µm, pour α= 45° et une température de la chambre fixée à T = 33°C. Pour *RH*<50%, plus l'atmosphère est humide, plus le ruissellement et la collecte des gouttes se déclenche rapidement. En effet *RH* contrôle alors la sursaturation et donc la croissance des gouttes. Pour *RH*> 50%, ce paramètre n'a plus vraiment d'influence, car le taux de condensation devient alors limité par le flux de chaleur de refroidissement disponible à travers le support.

2.3 Influence de l'angle d'inclinaison α

La goutte reste accrochée sur la surface tant que les forces de tension superficielle sont supérieures à la force de gravité, ce qui se traduit par l'inégalité suivante ([4] par exemple) :

$$\pi\, r\, \gamma\, (\cos\theta_r - cos\theta_{av}) \geq\ \rho\, v\, g\, \sin\alpha \qquad (1)$$

avec r le rayon de la ligne de contact de la goutte (supposée ici circulaire), γ la tension superficielle, ρ la masse volumique de la goutte, v le volume de la goutte, θ_{av} l'angle d'avancée, θ_r l'angle de recul et g la constante gravitationnelle.



La goutte de condensation se détache et glisse dès qu'elle a atteint un volume critique v_{max} qui varie donc comme :

$$v_{max}\ \sim 1/\sin\alpha \qquad (2)$$

Les fortes inclinaisons vont donc permettre aux gouttes de faibles volumes de glisser sur le substrat les premières. On retrouve ce résultat sur la figure 6 qui présente l'influence de l'angle d'inclinaison α sur le temps de déclenchement de ruissellement des gouttes pour une géométrie de rainures fixée. Comme attendu, on observe que, plus l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale est important, plus le ruissellement et la collecte des gouttes s'effectuent rapidement. On obtient une variation inversement proportionnelle à $1/\sin\alpha$ en cohérence avec la relation (2).

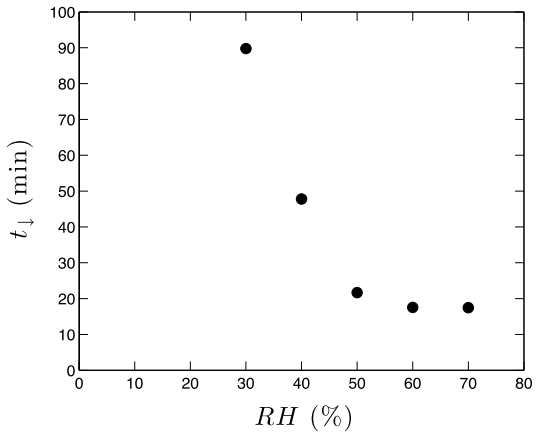


Fig. 5 : *temps de déclenchement en fonction de l'humidité relative RH pour α = 45°, s = w = h = 65 µm et T = 33°C, T_P = 12°C.*

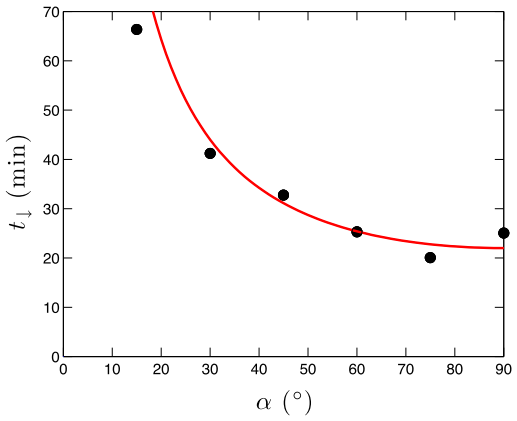


Fig 6 : *temps de déclenchement en fonction de l'inclinaison α pour s = w = h = 65 µm, RH = 50%, T = 33°C.*

2.4 Influence des paramètres géométriques

La goutte qui a suffisamment grossi par coalescence pour se détacher et ruisseler sur le substrat présente une forme similaire au cliché de la figure 7. Elle couvre plusieurs rainures et son volume est voisin du mm^3.

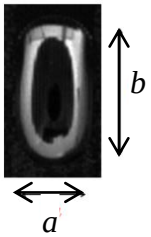


Fig.7 : *cliché photographique de la goutte de largeur a et de longueur b*

Les figures 8 et 9 présentent l'influence de la profondeur des rainures h sur le temps de déclenchement du ruissellement et sur la forme et la taille des gouttes qui se détachent, pour $s = 65\,\mu m$ et $w = 100\,\mu m$. Pour des valeurs de h comprises entre 40 µm et 150 µm, le temps de déclenchement (Fig. 8), ainsi que la taille et la forme des gouttes (Fig. 9) varient peu. La force d'accrochage est donc sensiblement indépendante de de la profondeur h de la rainure. Ce résultat s'explique par le fait que les forces d'accrochage, étant localisées sur la ligne triple liquide-vapeur-solide ne dépendent pas de la hauteur de liquide h dans les rainures.

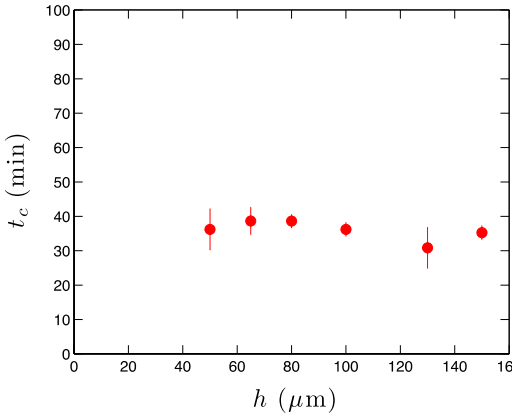


Fig. 8 : *temps de déclenchement en fonction de la hauteur h des rainures pour s = ѡ = 65 µm, α = 30°, RH = 50%, T = 33°C, T_P = 5°C.*

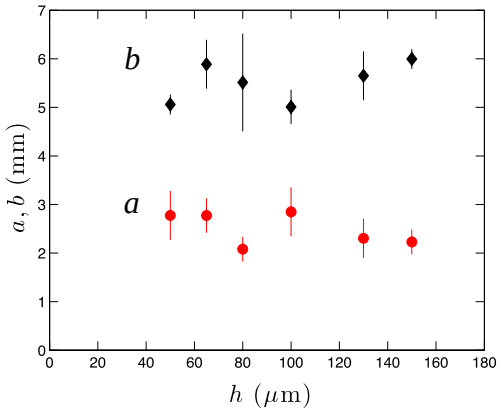


Fig. 9 : *paramètres géométriques de la goutte en fonction de la hauteur h de la rainure, pour s = ѡ = 65 µm et α = 30°, RH = 50%, T = 33°C, T_P*

La figure 10 présente l'influence de la largeur des rainures s sur le déclenchement du ruissellement pour $h = 65\ \mu m$ et $w = 100\ \mu m$. Les faibles valeurs de s ($50\ \mu m < s < 150\ \mu m$), induisent des détachements plus rapides, en favorisant la coalescence entre gouttes se formant à la surface des plateaux. Pour des valeurs plus élevées u paramètre s, ce processus de coalescence est réduit et il est nécessaire alors d'induire des coalescences avec les gouttes se formant dans la rainure pour augmenter le volume des gouttes.

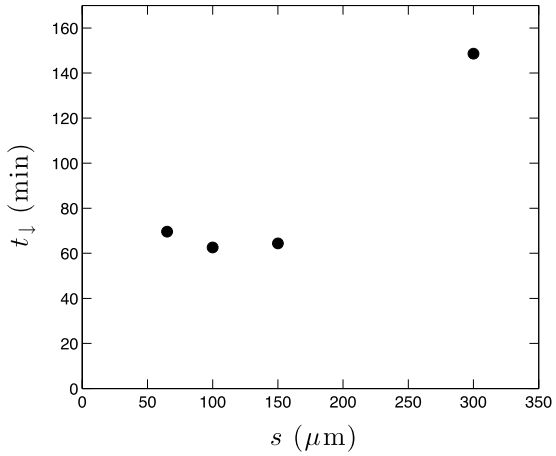


Fig. 10 : *temps de déclenchement en fonction de l'espacement s entre rainures pour ѡ = 100 µm, h = 65 µm et α = 30°, RH = 40%, T = 33°C. T_P = 3°C.*

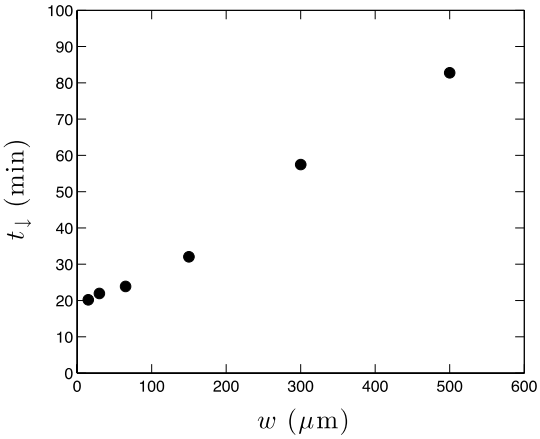


Fig. 11 : *temps de déclenchement en fonction de la largeur des rainures pour s = 100 µm, h = 65 µm et α = 45°, RH = 50%, T = 33°C, T_P = 12°C.*

La figure 11 présente l'influence de la largeur du plateau w sur le déclenchement de la collecte des gouttes pour $h = 65\ \mu m$ et $s = 100\ \mu m$. Plus le plateau entre rainures est mince, plus la collecte débute rapidement. Pour $w < 100\ \mu m$, les gouttes commencent à ruisseler dès 20 min d'expérience, alors qu'il faut attendre plus d'une heure lorsque $w > 300\ \mu m$. Ce résultat s'explique par une diminution des forces d'accrochage sur la ligne triple liquide-vapeur-solide lié au fait que les gouttes deviennent de plus en plus allongées (Fig. 12) à partir de w <150 µm.

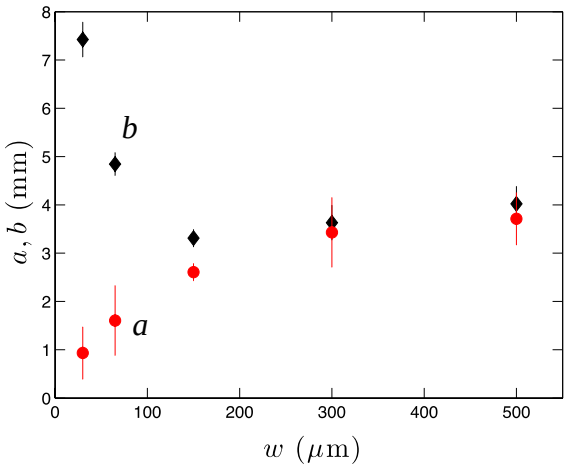


Fig. 12 : *paramètres géométriques de la goutte en fonction de la hauteur h de la rainure, pour s =100 µm, w = 65 µm et α = 45°, RH = 50%, T = 33°C, T_P = 5°C.*

3. Conclusion

L'étude expérimentale menée sur le phénomène de condensation de vapeur d'eau atmosphérique montre que les rainures du substrat permettent d'induire un déclenchement précoce du ruissellement des gouttes et offre la possibilité de collecter une quantité d'eau supérieure à ce que l'on peut obtenir au moyen d'une surface lisse. Ce résultat s'explique par une amplification du processus de coalescence lié à la géométrie du substrat utilisé. L'analyse des tailles de gouttes sur les différents substrats a permis de définir les paramètres géométriques les plus adaptés pour favoriser le processus de coalescence, à savoir une largeur de plateau et un espace entre rainures inférieurs à 150 µm. Dans la gamme de valeurs explorées ici, la hauteur des rainures n'a pas d'influence sur le phénomène de déclenchement du ruissellement.

Dans la quête d'amélioration du rendement du condenseur, notre travail se poursuit actuellement sur une modification des propriétés de mouillage du substrat par un procédé de greffage de polymère.

Références

[1] M.G. Medici, A. Mongruel, L. Royon, D. Beysens, Edge effects on water droplet condensation, Phys. Rev. E 90, 062403 (2014),1-11.

[2] R. D. Narhe and D. A. Beysens, Water condensation on a super-hydrophobic spike surface, *Europhysics Letters*, (2006) 1 – 74.

[3] M. Marcos-Martin, D. Beysens, J.-P. Bouchaud, C. Godrèche, I. Yekutieli, *Self-diffusion and visited surface in the droplet condensation problem (breath figures),* Physica A 214 (1995), 396-412.

[4] S. Bomme, H. Scholl, † , ‡ R. Seemann, K. Kanhaiya,V. Sheraton, N. Verma, Depinning of Drops on Inclined Smooth and Topographic Surfaces: Experimental and Lattice Boltzmann Model Study, Langmuir, 30 (2014), 11086−11095.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Idex Sorbonne Paris Cité pour le financement de ces travaux menés dans le cadre du programme interdisciplinaire : énergie, territoire et société: enjeux et approches.