

Étude expérimentale de la cinétique d'évaporation de gouttes multiples : Comparaison des méthodes optique, massique et thermique mises en œuvre.

Experimental Study of the Evaporation Kinetics of Multiple Drops: Comparison of the Optical, Mass, and Thermal Methods Implemented.

Oumayma SOMRANI^{1,2*}, Walid FOUDHIL^{1,2}, Sadok BENJABRALLAH^{1,2}, Lounès TADRIST³

¹ Université de Tunis El Manar, Faculté des Sciences de Tunis, LR01ES07 Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique de Tunis, 2092 Tunis, Tunisie

² Université de Carthage, Faculté des Sciences de Bizerte, 7021 Bizerte, Tunisie

³ CNRS-Aix Marseille Université, Laboratoire IUSTI (UMR 7343), 13453 Marseille cedex 13, France.

*oumaymasomrani@gmail.com

Résumé - Cette étude se concentre sur l'évaporation de gouttes multiples déposées sur un substrat rigide dans des conditions de température et de pression ambiantes. Un dispositif expérimental a été mis en œuvre pour analyser les cinétiques d'évaporation de gouttes en interaction avec un substrat solide et l'air environnant ainsi les transferts thermiques et massiques associés. Ces différentes méthodes de mesures : thermiques, massiques et optiques, ont permis de mettre en évidence l'influence de la proximité des gouttes sur le processus d'évaporation. Les résultats montrent que la disposition des gouttes influence significativement le temps d'évaporation.

Abstract - This study focuses on the evaporation of multiple droplets deposited on a rigid substrate under ambient temperature and pressure conditions. An experimental setup was implemented to analyze the evaporation kinetics of droplets interacting with a solid substrate and the surrounding air, as well as the associated thermal and mass transfers. These different measurement methods: thermal, mass, and optical, have made it possible to highlight the influence of the proximity of the droplets on the evaporation process. The results show that the arrangement of the droplets significantly influences the evaporation time.

Nomenclature

V	volume, m^3	$G2$	goutte appariée gauche, d_2
R	rayon, m	$G3$	goutte gauche : configuration 3 gouttes
d_1	distance de séparation	C	goutte centrale : configuration 3 gouttes
d_2	distance de séparation		
e	espacement d'air entre les gouttes		
$G1$	goutte appariée gauche, d_1		

1. Introduction

L'évaporation des gouttes sessiles est un phénomène complexe et multidimensionnel qui joue un rôle clé dans de nombreuses applications industrielles. Elle intervient notamment dans des domaines tels que l'impression à jet d'encre, la microfluidique, les procédés de revêtement et les technologies thermiques avancées. La dynamique d'évaporation d'une goutte est influencée par plusieurs facteurs, notamment les interactions avec d'autres gouttes dans un environnement proche. Dans le cas de gouttes voisines, les interactions par l'intermédiaire du fluide environnant (air) et du substrat modifient le champ de concentration de la vapeur dans l'air et distribution du flux de chaleur dans le substrat, pouvant conduire à des comportements d'évaporation non uniformes. Un effet d'écran peut ainsi se manifester, dans lequel la présence d'une goutte influence les conditions d'évaporation d'une autre, que ce soit par l'intermédiaire du substrat ou de l'air ambiant.

L'étude de l'évaporation de gouttes multiples a fait l'objet de plusieurs recherches récentes, que ce soit analytique [1-5], numérique [5], [6-9], ou expérimental [9], [10-17]. Ces travaux ont montré que la proximité des gouttes modifie leur dynamique d'évaporation, par exemple, dans des configurations où les gouttes sont très proches, des effets d'écran peuvent réduire le taux d'évaporation des gouttes voisines, en particulier si elles sont alignées de manière à limiter leur exposition à l'air ambiant. Ces résultats mettent en lumière l'importance de la configuration géométrique des gouttes dans le contrôle de leur évaporation.

Dans la littérature, diverses techniques expérimentales ont été employées pour étudier l'évaporation des gouttes, chacune apportant des informations spécifiques sur les phénomènes en jeu. Foudhil et al. [9] ont recours à la thermographie infrarouge pour cartographier les gradients de température, tandis qu'une caméra CCD permet de suivre la géométrie des gouttes en temps réel. Sahikeea et Basu [10] utilisent des méthodes d'imagerie haute vitesse couplées à des analyses de volume via MATLAB pour étudier l'évaporation sur des substrats hydrophobes. Aboubakri et al. [11] se concentrent sur les surfaces biphasiques, suivies par une caméra thermique pour observer l'évolution des gouttes, tout en mesurant le taux d'évaporation. Bao et al. [12] emploient des microstructures photopolymérisées pour analyser ce phénomène. S. Hatte et al. [13] se servent de techniques de shadographie et de velocimétrie par images de particules (PIV) pour observer la dynamique d'évaporation des gouttes sessiles. Les mesures dans les travaux de Khilifi et al. [14] incluent une caméra infrarouge pour la température à la surface des gouttes, un analyseur de forme Krüss pour l'angle de contact et la géométrie de la goutte, ainsi qu'une caméra CCD pour l'enregistrement de l'évaporation. Une seringue programmable a été utilisée pour le dépôt précis des gouttes. Enfin, A. Iqtidar et al. [15] ont développé une technique optique innovante reposant sur la distorsion d'un motif de points placé sous les gouttes, permettant de calculer la hauteur et le volume des gouttes au fur et à mesure de leur évaporation grâce à une caméra CCD et un script MATLAB. De manière similaire, A. Razzaghi et al. [16] observent la distorsion d'un motif de points sous les gouttes et utilisent des caméras haute vitesse pour suivre la dynamique de l'évaporation et estimer le volume des gouttes. Ces approches variées, combinées, offrent une analyse approfondie de la dynamique d'évaporation ainsi que des interactions complexes entre les gouttes.

Dans ce contexte, notre travail se focalise sur l'étude de l'impact de l'effet d'écran sur la dynamique d'évaporation des gouttes multiples. Pour ce faire, un dispositif expérimental a été conçu afin d'analyser les cinétiques d'évaporation en fonction de la disposition des gouttes, en variant les distances de séparation et l'alignement. En amont de ces investigations, plusieurs

techniques de mesure, reposant sur des principes distincts, ont été mises en œuvre pour déterminer les cinétiques d'évaporation des gouttes.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'évaporation de gouttes multiples en mettant en place un dispositif expérimental permettant de mesurer précisément l'évolution du flux thermique, du volume et de la masse des gouttes au cours du temps.

2. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est conçu pour étudier l'évaporation de gouttes multiples sur un substrat rigide en conditions ambiantes. Il repose sur plusieurs éléments complémentaires permettant un contrôle et une mesure précise des paramètres influençant le processus.

Le substrat, constitué de plexiglas, est équipé de capteurs de flux thermique et de température pour mesurer les transferts thermiques entre le substrat et les gouttes pendant l'évaporation, il est placé directement sur une balance de précision qui permet de suivre l'évolution de la masse des gouttes au cours de l'évaporation, tandis qu'un thermo-hygromètre enregistre les variations de température et d'humidité ambiantes. Le dépôt des gouttes est réalisé grâce à une plateforme de micro-déplacement Thorlabs associée à une aiguille de distribution reliée à une seringue par un tuyau, assurant un positionnement précis. Parallèlement, une caméra haute résolution capture en continu des images permettant d'analyser l'angle de contact et le volume des gouttes. Un enregistreur de données collecte l'ensemble des informations thermiques. Enfin, une table optique antivibration garantit la stabilité du système, minimisant les perturbations mécaniques et assurant ainsi la fiabilité des mesures.

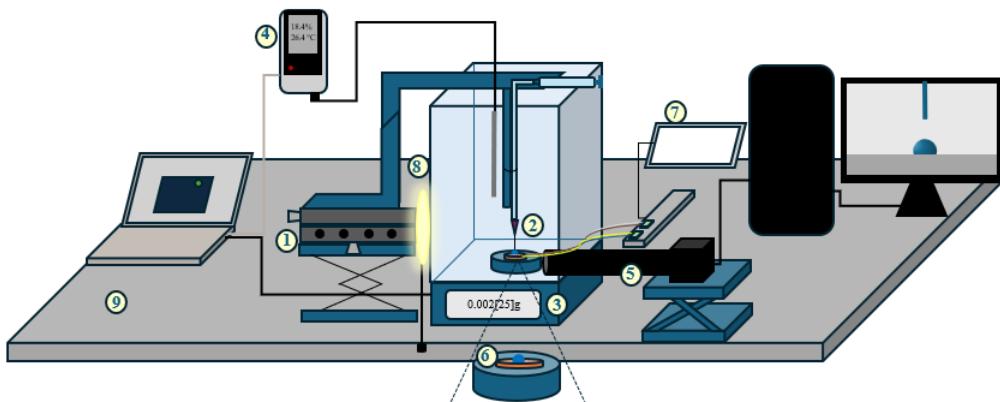


Figure 1 – Schéma du Dispositif Expérimental pour l'étude de l'évaporation des gouttes.

(1) Plateforme de micro-déplacement, (2) aiguille de distribution, tuyau et seringue pour le dépôt des gouttes, (3) Balance de précision, (4) Thermo-hygromètre, (5) Caméra haute résolution, (6) Fluxmètre avec thermocouple intégré, (7) Système d'acquisition de données, (8) Eclairage LED, (9) Table optique antivibration.

Ce dispositif permet d'analyser les cinétiques d'évaporation des gouttes en interaction avec le substrat solide et l'air environnant, ainsi que les transferts thermiques et massiques associés. Les données obtenues par différentes méthodes de mesure (thermiques, massiques et d'imagerie) ont mis en évidence le potentiel et les limites des techniques employées. En particulier, l'étude a permis d'examiner l'impact des distances de séparation entre les gouttes sur leur cinétique d'évaporation. Les résultats révèlent que la position relative des gouttes influence significativement les temps d'évaporation.

3. Approche expérimentale et comparaison des méthodes de mesure

Ce travail s'appuie sur trois techniques de mesure. Premièrement, des mesures thermiques ont été enregistrées à l'aide d'un fluxmètre sur lequel les gouttes sont directement déposées, ce qui permet d'obtenir en temps réel le flux de chaleur échangé avec le substrat. Ensuite, une technique d'imagerie optique à haute résolution est mise en œuvre afin de suivre l'évolution de la forme des gouttes. En se basant sur les images obtenues, l'angle de contact ainsi que le diamètre de la base des gouttes sont extraits pour déterminer le volume de chaque goutte toutes les 20 secondes. Enfin, à l'aide d'une balance de haute précision, la diminution de la masse des gouttes est enregistrée en continu.

Chaque méthode présente ses propres avantages et limites :

- La balance de précision : Fournit l'évolution de la masse, mais reste sensible aux moindres fluctuations ou vibrations et devient moins précise en fin d'évaporation, notamment lorsqu'un support supplémentaire comme le fluxmètre est utilisé.
- L'imagerie optique : Permet un suivi détaillé de la géométrie de la goutte, mais sa précision diminue lorsque la goutte devient très petite.
- Le fluxmètre : Offre des mesures thermiques fiables et reste efficace jusqu'à la disparition complète de la goutte, même sous forme de film mince.

4. Comparaisons des Débits Massiques pour une Goutte Unique selon les Trois Méthodes

Afin d'évaluer la cohérence entre les différentes approches expérimentales d'estimation du débit massique d'évaporation, une comparaison a été réalisée entre trois méthodes : thermique (fluxmètre), optique (imagerie), et massique (balance de précision). Les résultats de cette comparaison (figure 2) montrent une bonne cohérence globale entre les trois méthodes, malgré certaines différences quantitatives.

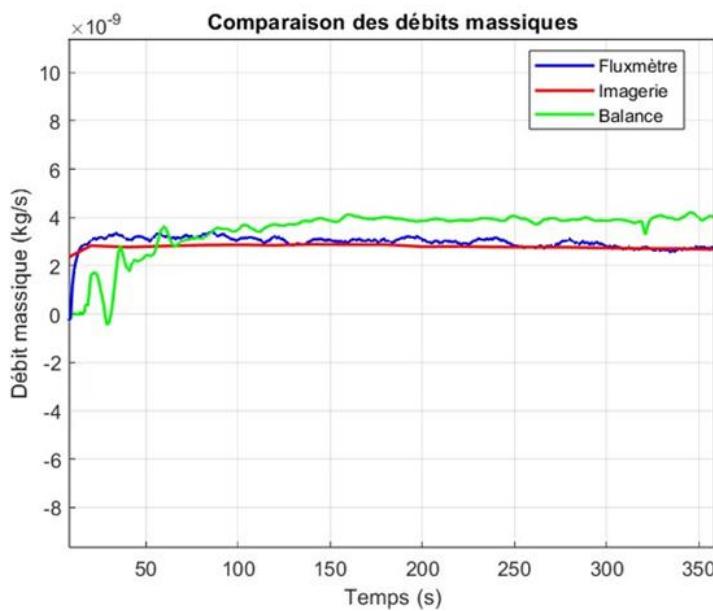


Figure 2 – Comparaison des débits massiques ($T = 25^\circ\text{C}$, $HR = 19\%$, $V = 2,3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$)

La méthode par imagerie fournit un débit massique moyen d'environ $2,8 \times 10^{-9}$ kg/s. Le fluxmètre, donne une valeur de $3,2 \times 10^{-9}$ kg/s, soit un écart d'environ 14 % par rapport à l'imagerie. La balance surestime le débit, atteignant en moyenne de $3,8 \times 10^{-9}$ kg/s, ce qui

représente une surestimation de plus de 35 % par rapport à l'imagerie et plus de 18% par rapport au fluxmètre.

Ces écarts peuvent être expliqués par des erreurs systématiques propres à chaque méthode. Malgré ces écarts, la cohérence des ordres de grandeur entre les différentes méthodes confirme la fiabilité des mesures.

5. Résultats Préliminaires

5.1. Mesures thermiques

La Figure 3 compare l'évolution du flux thermique pour différentes configurations de gouttes : une goutte unique, deux gouttes avec deux distances de séparation (d_1 et d_2 , avec $d_1 < d_2$), et trois gouttes.

Dans les premières secondes, le flux thermique augmente rapidement, atteignant un pic d'environ 4×10^{-3} W pour une seule goutte et atteint environ 9×10^{-3} W pour trois gouttes rapprochées, ce qui traduit un transfert initial élevé de chaleur entre le substrat et la goutte, lorsque la différence de température est maximale. Cette énergie est fournie par le fluxmètre pour compenser l'évaporation, particulièrement intense aux premiers instants. Après ce pic, le flux thermique diminue légèrement puis se stabilise pendant une grande partie de l'évaporation, illustrant un équilibre dynamique entre l'évaporation et le transfert de chaleur depuis le substrat. A la fin du processus d'évaporation, il chute brutalement à zéro, indiquant la disparition quasi totale de la goutte et la réduction des échanges thermiques.

La goutte unique s'évapore plus rapidement en raison d'un refroidissement plus efficace et d'une absence de protection thermique. Pour deux gouttes, l'effet écran thermique est plus marqué lorsque la distance est réduite (d_1), ralentissant l'évaporation, tandis qu'une plus grande séparation (d_2) atténue cet effet et accélère la disparition des gouttes. Dans le cas de trois gouttes, la goutte centrale bénéficie d'une protection thermique accrue, ses voisines s'évaporant en premier, retardant ainsi sa disparition. Cette configuration entraîne une stabilisation du flux thermique à environ 2×10^{-3} W entre 1700 et 1900 s, jusqu'à l'évaporation complète de la goutte centrale vers 1950 s. Ces observations soulignent l'impact des interactions thermiques entre gouttes et le rôle déterminant de la distance de séparation dans la dynamique du processus d'évaporation.

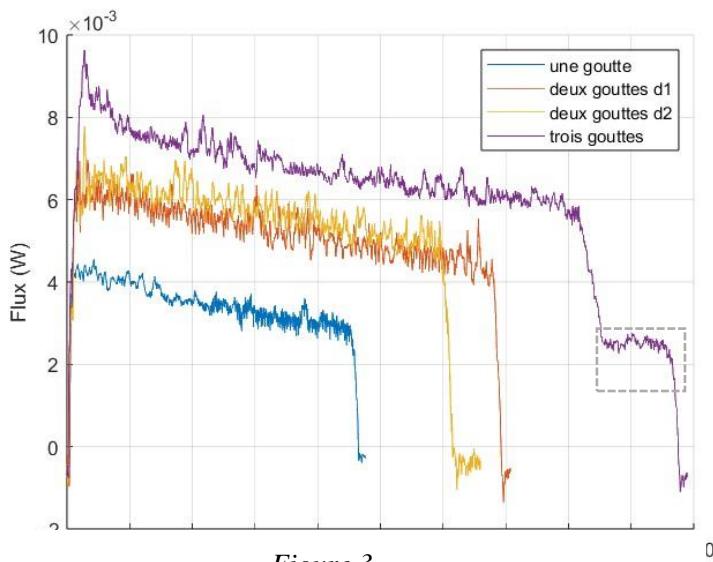


Figure 3

Figure 3 – Flux thermique pour différentes configurations de gouttes ($T = 25^\circ\text{C}$, $HR = 19\%$, $V = 2,3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$)

5.2. Mesures par imagerie

La figure 4 illustre la variation temporelle du volume pour différentes configurations de gouttes. La courbe correspondant à la goutte unique montre une évaporation rapide, car elle est entièrement exposée à l'air, sans influence de gouttes voisines. Pour les gouttes appariées, on observe que la goutte dans la configuration où la distance de séparation est plus grande (d2) s'évapore plus rapidement que celle dans la configuration avec une distance plus petite (d1). En effet, un espacement plus large (d2) réduit les interactions thermiques et de condensation entre les gouttes, permettant à chacune de s'évaporer de manière plus indépendante.

Dans la configuration à trois gouttes alignées, la goutte située à gauche (G3) s'évapore plus vite que la goutte centrale (C), cette dernière bénéficiant d'une protection thermique due à la présence des gouttes voisines. Ces observations mettent en évidence l'influence de la distance de séparation sur l'évaporation : plus l'espacement est grand, plus l'évaporation est rapide, tandis qu'un rapprochement des gouttes favorise les interactions thermiques, ralentissant leur disparition.

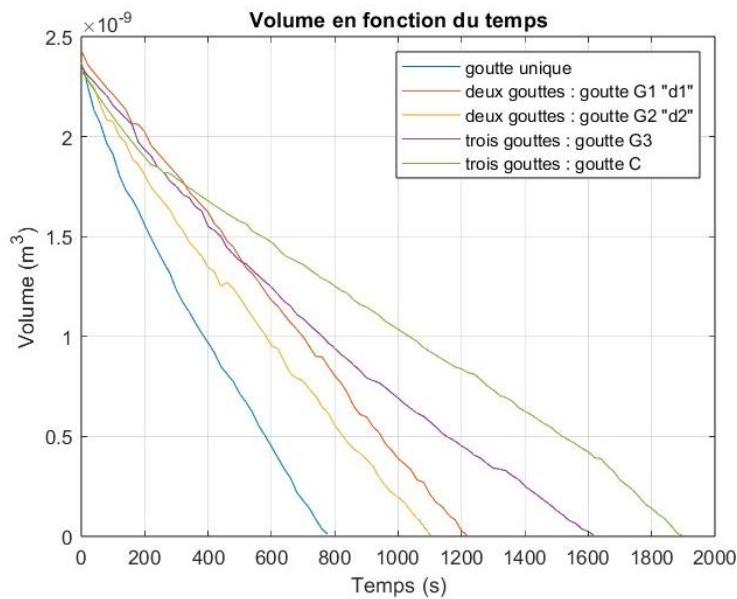
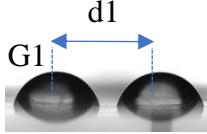
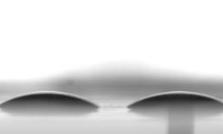
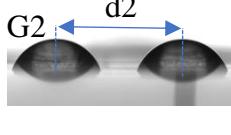
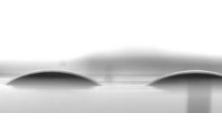
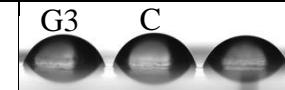
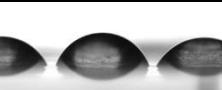


Figure 4 – Évolution temporelle du volume selon la configuration des gouttes ($T = 25^\circ\text{C}$, $HR = 19\%$, $V = 2,3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$)

Tableau 1 – Influence du nombre et de l'espacement des gouttes sur l'évaporation au cours du temps ($T = 25^\circ\text{C}$, $HR = 19\%$, $V = 2,3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$)

Nombre de gouttes	à $t = 300\text{s}$	à $t = 600\text{s}$	à $t = 900\text{s}$	à $t = 1200\text{s}$
1				

2 $d1 = 2,5 \text{ mm}$ $e = 0,4 \text{ mm}$				
2 $d2 = 3 \text{ mm}$ $e = 0,9 \text{ mm}$				
3				

5.3. Mesures massiques

La figure 5 illustre la variation temporelle de la masse pour différentes configurations de gouttes, mesurée à l'aide d'une balance de précision. Les tendances observées sont similaires à celles du volume, déterminé par imagerie optique. Ces résultats confirment l'impact de la distance de séparation sur le processus d'évaporation : un espace plus important accélère la perte de masse, tandis qu'un rapprochement favorise les interactions thermiques et ralentit la diminution de la masse des gouttes.

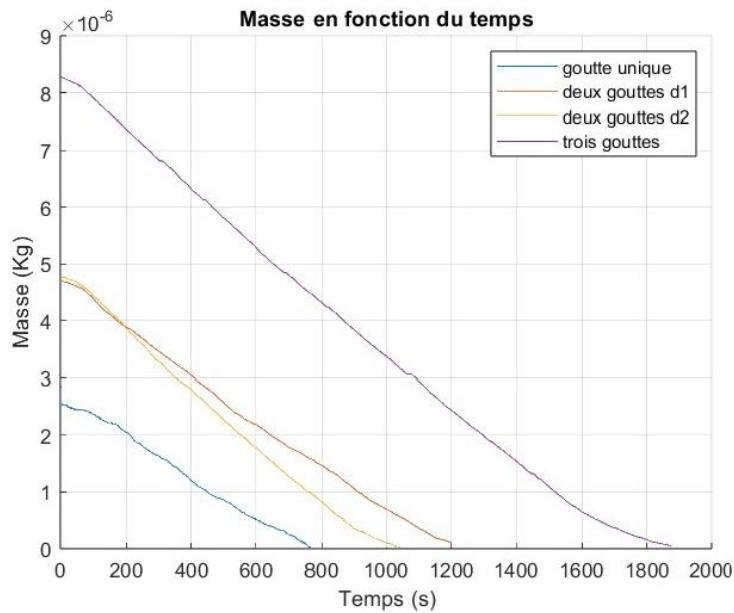


Figure 5 – Variation temporelle de la masse totale pour différentes configurations de gouttes ($T = 25^\circ\text{C}$, HR = 19 %, $V = 2,3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$)

6. Conclusion

Les résultats expérimentaux ont montré l'influence marquée de l'espacement et du nombre de gouttes sur le processus d'évaporation. En utilisant trois techniques de mesure, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Une goutte unique s'évapore plus rapidement en raison de son exposition totale à l'air.
- Dans une configuration de plusieurs gouttes, l'évaporation est ralentie, surtout lorsque les gouttes sont proches.
- Un espacement plus large entre les gouttes accélère l'évaporation en limitant les interactions thermiques.
- La goutte centrale dans une configuration à trois gouttes bénéficie d'une protection thermique accrue, retardant son évaporation par rapport aux gouttes voisines.
- L'espacement entre les gouttes ainsi que leur disposition joue un rôle clé dans la dynamique du processus d'évaporation.

Malgré les limites spécifiques à chaque méthode, les résultats obtenus par la balance, l'imagerie optique et le fluxmètre ont montré des tendances cohérentes. Le fluxmètre s'est révélé particulièrement fiable pour suivre l'évolution thermique de la goutte, tandis que l'imagerie optique a permis d'analyser les variations géométriques et la balance, bien qu'influencée par des fluctuations, a donné une estimation utile de la perte de masse. La complémentarité de ces approches renforce la validité des observations et offre une compréhension plus approfondie du phénomène d'évaporation.

Références

- [1] A. W. Wray, B. R. Duffy, and S. K. Wilson, ‘Competitive evaporation of multiple sessile droplets’, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 884, p. A45, Feb. 2020, doi:10.1017/jfm.2019.919.
- [2] A. W. Wray, P. S. Wray, B. R. Duffy, and S. K. Wilson, ‘Contact-line deposits from multiple evaporating droplets’, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 6, no. 7, p. 073604, Jul. 2021, doi:10.1103/PhysRevFluids.6.073604.
- [3] H. Masoud, P. D. Howell, and H. A. Stone, ‘Evaporation of multiple droplets’, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 927, p. R4, Nov. 2021, doi: 10.1017/jfm.2021.785.
- [4] D. J. Fairhurst, ‘Predicting evaporation rates of droplet arrays’, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 934, p. F1, Mar. 2022, doi: 10.1017/jfm.2021.1084.
- [5] F. G. H. Schofield, A. W. Wray, D. Pritchard, and S. K. Wilson, ‘The shielding effect extends the lifetimes of two-dimensional sessile droplets’, *J Eng Math*, vol. 120, no. 1, pp. 89–110, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10665-019-10033-7.
- [6] T. K. Pradhan and P. K. Panigrahi, ‘Deposition pattern of interacting droplets’, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 482, pp. 562–567, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.colsurfa.2015.07.013.
- [7] T. K. Pradhan and P. K. Panigrahi, ‘Influence of an adjacent droplet on fluid convection inside an evaporating droplet of binary mixture’, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 500, pp. 154–165, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.colsurfa.2016.03.073.
- [8] G. Laghezza et al., ‘Collective and convective effects compete in patterns of dissolving surface droplets’, *Soft Matter*, vol. 12, no. 26, pp. 5787–5796, Jun. 2016, doi: 10.1039/C6SM00767H.
- [9] W. Foudhil, D. Khilifi, Y. Dutil, S. Harmand, and S. B. Jabrallah, ‘Experimental and Three-Dimensional Numerical Study of the Single/Multiple Sessile Droplets Evaporation’, *Heat Transfer Engineering*, vol. 44, no. 20, pp. 1926–1945, Nov. 2023, doi: 10.1080/01457632.2022.2162009.

- [10] A. J. D. Shaikeea and S. Basu, ‘Insight into the Evaporation Dynamics of a Pair of Sessile Droplets on a Hydrophobic Substrate’, *Langmuir*, vol. 32, no. 5, pp. 1309–1318, Feb. 2016, doi: 10.1021/acs.langmuir.5b04570.
- [11] A. Aboubakri, Y. Akkus, A. K. Sadaghiani, K. Sefiane, and A. Koşar, ‘Computational and experimental investigations on the evaporation of single and multiple elongated droplets’, *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 10, p. 100255, May 2022, doi: 10.1016/j.ceja.2022.100255.
- [12] L. Bao et al., ‘Flow-induced dissolution of femtoliter surface droplet arrays’, *Lab Chip*, vol. 18, no. 7, pp. 1066–1074, Mar. 2018, doi: 10.1039/C7LC01321C.
- [13] S. Hatte, K. Pandey, K. Pandey, S. Chakraborty, and S. Basu, ‘Universal evaporation dynamics of ordered arrays of sessile droplets’, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 866, pp. 61–81, May 2019, doi: 10.1017/jfm.2019.105.
- [14] D. Khilifi, W. Foudhil, K. Fahem, S. Harmand, and J. Ben, ‘Study of the phenomenon of the interaction between sessile drops during evaporation’, *Therm sci*, vol. 23, no. 2 Part B, pp. 1105–1114, 2019, doi: 10.2298/TSCI180406188K.
- [15] A. Iqtidar, J. J. Kilbride, F. F. Ouali, D. J. Fairhurst, H. A. Stone, and H. Masoud, ‘Drying dynamics of sessile-droplet arrays’, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 8, no. 1, p. 013602, Jan. 2023, doi: 10.1103/PhysRevFluids.8.013602.
- [16] A. Razzaghi and A. Amirfazli, ‘Shedding of a pair of sessile droplets’, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 110, pp. 59–68, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.08.011.
- [17] A. M. J. Edwards et al., ‘Interferometric measurement of co-operative evaporation in 2D droplet arrays’, *Applied Physics Letters*, vol. 119, no. 15, p. 151601, Oct. 2021, doi:10.1063/5.0064924.