

Modélisation individu centré de la condensation en gouttes

Jérémy. LETHUILLIER¹, Pascal. LAVIEILLE¹, Frédéric. TOPIN^{1,2}, Marc. MISCEVIC^{1,*}

¹ LAPLACE, UMR CNRS-INP-UPS 5213, University of Toulouse, France

² IUSTI, UMR CNRS-AMU 7343, Aix-Marseille Université, France

*(auteur correspondant : marc.miscevic@laplace.univ-tlse.fr)

Résumé - La comparaison de deux approches ("Individual Based Model" et "Population Balance Model") permettant de calculer la distribution de la taille des gouttes se formant sur un substrat lors de la condensation d'une vapeur est réalisée. Des écarts significatifs ont été observés entre les deux approches, en particulier sur la distribution des gouttes de petite taille (i.e. celles qui ne sont pas observables expérimentalement). Les différences observées sur les distributions sont ensuite analysées en terme d'écart sur la prédiction des flux de chaleur transférés. Enfin une étude paramétrique a été réalisée en considérant trois paramètres qu'il est *a priori* possible de contrôler expérimentalement.

Mots-clés : Condensation en goutte ; Modèle basé sur un bilan de population ; Modèle basé sur l'individu ; Coefficient de transfert ; Analyse paramétrique.

Abstract - The comparison of two approaches ("Individual Based Model" and "Population Balance Model") that allow to calculate the drop-size distribution during dropwise condensation process is carried out. Significant differences were observed between the two approaches, in particular on the distribution of small drops (i.e. those which are not observable experimentally). The differences observed on the distributions are then analyzed in terms of discrepancies between the prediction of the heat flux obtained by both methods. Finally, a parametric study was carried out by considering three parameters that are *a priori* possible to control experimentally.

Keywords: Dropwise condensation; Population balance model; Individual based model; Heat transfer; Parametric analysis.

Nomenclature

G	Vitesse de croissance, m/s	σ	Tension de surface, N/m
k	Conductivité thermique, W/(m.K)	τ	Temps caractéristique, s
L	Chaleur latente, J/kg	<i>Indices et exposants</i>	
n	Distribution de la taille des gouttes, m ⁻³	a	avancée
N_s	Densité de site de nucléation, m ⁻²	b	balayage
q	Densité de flux, W/m ²	c	coalescence
Q	Flux, W	g	global
r	Rayon, m	l	liquide
t	Temps, s	t	traitement
T	Température, K	v	vapeur
<i>Symboles grecs</i>		min	minimum
θ	Angle de contact, °	max	maximum
ρ	Masse volumique, kg/m ³	sat	saturation

1. Introduction

La modélisation de la condensation en goutte se décompose en deux parties complémentaires : un modèle de transferts de chaleur entre une goutte unique et son environnement, ainsi qu'un modèle de distribution de la taille des gouttes. Actuellement, le modèle de transfert au travers d'une goutte unique communément utilisé est celui de Kim et Kim [1]. Celui-ci repose sur un réseau de résistances thermiques en série entre le substrat et la phase vapeur (conduction dans la couche correspondant au traitement de surface, dans la goutte liquide, interface liquide-vapeur et courbure de l'interface), ainsi que sur l'hypothèse d'un transfert purement conductif au sein de la goutte. Récemment, cette seconde hypothèse a été remise en question par Xu et al. [2]. Ces auteurs ont utilisé un modèle numérique complet afin de montrer que les écoulements dans la goutte en croissance diffèrent fortement des cas quasi-statiques. Le rayon critique où la convection commence à avoir une influence significative sur la croissance des gouttes est d'environ quelques microns dans les configurations testées.

Le modèle de Kim et Kim [1] qui conduit à des expressions explicites est donc probablement trop simplifié et peut présenter des biais. En revanche, les modèles complets, même s'ils sont particulièrement efficaces pour l'étude détaillée d'une goutte unique, n'ont pas encore permis de générer des expressions simples de transferts de chaleur et de masse à l'échelle d'une goutte.

La distribution de la taille des gouttes peut être déterminée par deux types d'approches différentes (communément appelées "Population Balance Model" - PBM- et "Individual Based Model" - IBM). L'approche couramment utilisée dans la littérature (PBM), consiste à décomposer la distribution en 2 parties distinctes séparées par leur positionnement par rapport à un rayon r_e (qui correspond à la moitié de la distance moyenne entre deux sites de nucléation). La distribution des rayons des "grosses" gouttes (i.e. les gouttes qui sont observables expérimentalement) est déterminée à l'aide d'une loi semi-empirique [3]. La distribution des rayons des "petites" gouttes (i.e. plus petites que quelques microns) est calculée à partir d'un bilan de population [4] et repose sur plusieurs hypothèses : i) le mécanisme de renouvellement de ces gouttes est uniquement lié au phénomène de balayage (i.e. aux coalescences avec des gouttes en mouvement ayant atteint le rayon critique r_{max}). Cela signifie que les gouttes plus petites que quelques microns ne coalescent pas avec d'autres gouttes immobiles ; ii) on impose la continuité des distributions ainsi que celle de leurs dérivées en r_e , ce qui implique une connaissance précise de la valeur de cette limite ainsi que de la distribution de ces tailles de goutte. Il n'existe actuellement pas de validations expérimentales de la distribution des rayons des "petites" gouttes. La seconde approche (IBM) modélise chacune des gouttes en suivant son cycle de vie : nucléation, croissance, coalescences et évacuation. La distribution de la taille des gouttes correspond à la moyenne de tous ces cycles de vie. De nombreuses études utilisant cette approche [5, 6, 7] ont retrouvé la distribution des gouttes de "grande" taille (i.e. la loi semi-empirique de Rose et Glicksman [3]). En revanche, du fait des temps de calcul importants, la distribution des gouttes de petite taille n'est généralement pas calculée par ces études.

Afin d'obtenir des éléments de validation de la distribution des gouttes de petite taille calculée par l'approche PBM, un modèle individu centré a été développé et détaillé dans [8]. Dans cet article, une comparaison de ce modèle avec l'approche PBM est effectuée avec une attention particulière portée sur la distribution des gouttes de petites tailles. Dans la présente communication, la comparaison des deux approches se concentre sur le coefficient de transfert prédit par chacun des deux modèles. Une analyse paramétrique de l'influence de 3 paramètres principaux (i.e., ceux qui pourraient *a priori* être ajustés expérimentalement) est réalisée : l'angle d'avancée θ_{adv} , la densité des sites de nucléation N_s et le rayon maximum r_{max} qu'une goutte peut atteindre avant sa mise en mouvement par une force externe.

2. Distributions de la taille des gouttes (PBM et IBM)

Pour comparer les résultats obtenus à partir d'IBM et de PBM, il est nécessaire d'utiliser des configurations aussi proches que possible. Ainsi, un IBM [8] a été développé en retenant les hypothèses suivantes communes avec PBM :

- La température du substrat est constante et homogène ;
- La phase gazeuse est constituée de vapeur d'eau pure à pression atmosphérique ;
- Les gouttes se forment au rayon $r_{min} = \frac{2\sigma_{lv}}{\Delta T} \frac{T_{sat}}{\rho_v L_{lv}}$;
- La densité de sites de nucléation N_s est fixée (on rappelle que fixer N_s équivaut à imposer la distance moyenne entre 2 sites de nucléation voisins) ; Cependant, pour IBM les sites sont répartis aléatoirement alors que pour PBM ils sont equirépartis ;
- Le modèle de croissance des gouttes est basé sur le modèle thermique de Kim et Kim [1].

L'un des principaux inconvénients d'IBM est le temps de calcul important. En effet, la nécessité de simuler une grande surface de substrat pour obtenir un échantillonnage suffisant des plus grosses gouttes ainsi que la valeur élevée de la densité de sites de nucléation N_s conduisent à un nombre très important de gouttes à simuler. De plus, ces gouttes interagissent les unes avec les autres à une fréquence très élevée. Ainsi, le pas de temps utilisé dans la simulation doit être aussi petit que possible pour prendre en compte tous les événements de coalescence. Enfin, la simulation doit être poursuivie jusqu'à l'obtention d'un régime permanent.

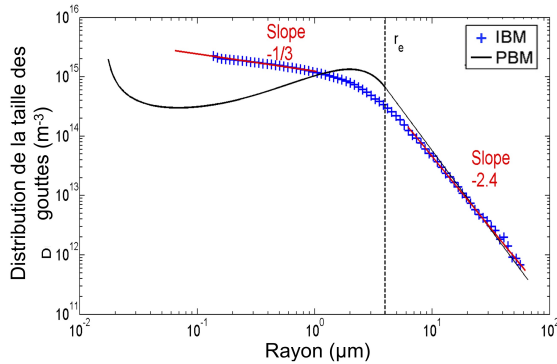


Figure 1 : Comparaison des distributions de taille de goutte en fonction du rayon obtenues à partir des 2 modèles

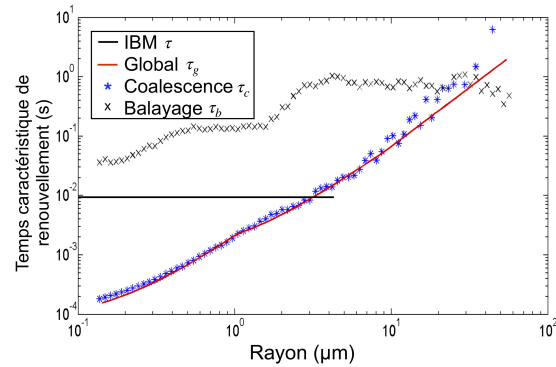


Figure 1 bis : Comparaison des différents temps caractéristiques (IBM τ , global τ_g , coalescence τ_c et balayage τ_b) obtenus à partir des 2 modèles

L'un des objectifs principaux étant de comparer la distribution des petites gouttes obtenue à partir de notre IBM au PBM, il est donc important d'utiliser un pas de temps suffisamment petit pour capturer toutes les coalescences. A la fin de chaque pas de temps, la durée avant le prochain événement de coalescence est calculée et le pas de temps est ajusté en conséquence ; ainsi tous les événements de coalescence sont pris en compte. Cependant, pour garder un temps de calcul raisonnable, une valeur minimale $\delta t_{min} = 10^{-5} s$ a été choisie (voir [8]) qui convient aux comparaisons quantitatives entre IBM et PBM tout en conservant un temps de calcul acceptable (quelques jours sur une station de travail standard en utilisant un code Matlab®). Les calculs ont été réalisés autour d'un cas de référence décrit ci-dessous. Le domaine de calcul est un carré de côté $340 \mu m$ avec 2025 sites de nucléation (correspondant à une densité de sites $N_s = 1,56 \times 10^{10} m^{-2}$). L'angle d'avancée est $\theta_a = 85^\circ$ et le sous-refroidissement est $\Delta T = 1 K$. Comme le fluide considéré est de l'eau pure, le coefficient de condensation intervenant dans la résistance thermique d'interface est fixé à 1. Les paramètres du revêtement sont imposés à des

valeurs typiques : $k_t = 2W.m^{-1}.K^{-1}$ pour une épaisseur de 100 nm. Le rayon maximal est fixé à $r_{max} = 65\mu m$ et la vitesse des gouttes qui balayent la surface est fixée à $0,01m.s^{-1}$. Un exemple de résultats de calcul peut être visionné à l'URL ¹.

Les distributions de la taille de gouttes obtenues à partir des deux approches sont reportées sur la figure 1. Pour les gouttes supérieures à $10\mu m$, la distribution de la taille des gouttes est presque identique à la loi de Rose et Glicksman, à l'exception près que celle-ci prédit une pente de $-\frac{8}{3} \approx -2.67$ tandis qu'IBM donne -2.4.

Entre r_{min} et r_e , les résultats PBM présentent une courbe en forme de N avec un maximum à r_{min} et l'autre légèrement en dessous de r_e . L'IBM donne des résultats clairement différents de ceux de PBM pour des rayons inférieurs à r_e , avec des écarts dépassant un ordre de grandeur. PBM suppose un temps caractéristique de renouvellement τ constant quelle que soit la taille des gouttes. Ce paramètre apparaît dans l'équation différentielle qui permet de calculer la distribution des rayons des "petites" gouttes :

$$\frac{d(G(r)n(r))}{dr} = -\frac{n(r)}{\tau} \quad (1)$$

En utilisant cette même équation avec les données issues de la simulation IBM, il est possible de calculer un temps caractéristique global τ_g qui dépend du rayon. L'approche IBM a également pour avantage de pouvoir discerner les coalescences entre gouttes immobiles de celles avec des gouttes en mouvement et ainsi de leur associer des temps caractéristiques τ_c et τ_b :

$$\frac{d(G(r)n(r))}{dr} = -\frac{n(r)}{\tau_g(r)} = -n(r) \left[\frac{1}{\tau_c(r)} + \frac{1}{\tau_b(r)} \right] \quad (2)$$

La figure 1 bis présente les différents temps caractéristiques calculés par l'approche IBM. La valeur de τ obtenue à partir de l'équation 1 est également rapporté dans son domaine de définition (i.e. de r_{min} à r_e).

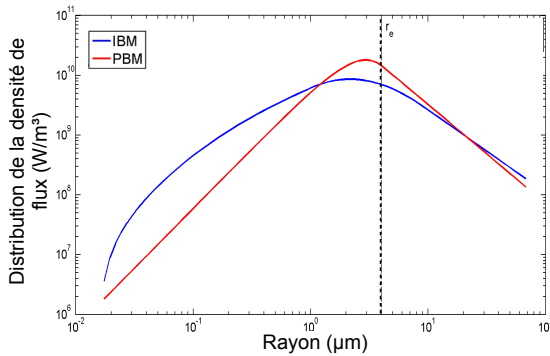


Figure 2 : Distribution de la densité de flux obtenue à partir des 2 modèles en fonction du rayon des gouttes

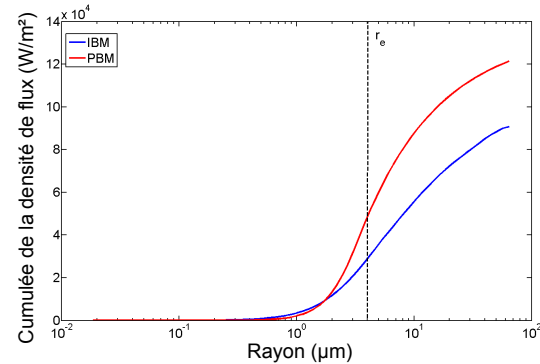


Figure 2 bis : Cumulée de la densité de flux ($q(r_{min}, r)$) obtenue à partir des 2 modèles en fonction du rayon des gouttes

Le temps caractéristique τ_g augmente de $10^{-4}s$ pour les plus petites gouttes à environ $10^{-2}s$ pour $r = r_e$. Dans le même intervalle, PBM donne $\tau = 10^{-2}s$ quel que soit le rayon. La prise en compte des coalescences entre les gouttes immobiles dans IBM conduit ainsi à un temps caractéristique de renouvellement jusqu'à 2 ordres de grandeur plus petit. Les écarts peuvent

¹<https://www.youtube.com/watch?v=W4sgNEoCwuo>

s'expliquer par l'hypothèse faite dans PBM qui considère que τ ne dépend que du balayage par les gouttes en mouvement.

Si l'on observe les temps caractéristiques liés aux différents mécanismes d'évacuation (coalescence et balayage) calculés par IBM, on observe que τ_c est largement inférieur à τ_b et presque égal à τ_g excepté pour les plus grosses gouttes ($r > 20 \mu m$), ce qui signifie que les événements de coalescence sont beaucoup plus fréquents que ceux de balayage.

Par exemple, les gouttes de $1 \mu m$ sont renouvelées avec un temps caractéristique τ_c de $10^{-3} s$ alors qu'il est d'environ $0,1 s$ pour τ_b . Ainsi, les gouttes ne sont renouvelées qu'une fois en raison du balayage lorsqu'elles sont renouvelées cent fois en raison des événements de coalescence. L'hypothèse selon laquelle les petites gouttes ne coalescent pas dans PBM ne semble pas acceptable dans ce cas.

3. Analyse thermique

À partir d'une distribution quelconque de taille de gouttes donnée $\bullet(r)$ ainsi que du modèle de transfert de chaleur à travers une goutte unique [1], il est possible de calculer la densité surfacique de flux thermique échangé avec le substrat associée à n'importe quelle gamme de rayon $[r_1, r_2]$:

$$q(r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} \bullet(r) Q_d(r) dr \quad (3)$$

La densité de flux globale est obtenue en intégrant cette équation de r_{min} à r_{max} .

L'impact de la distribution de la taille des gouttes sur la variation du flux en fonction du rayon peut alors être analysé. Comme les distributions de taille de gouttes obtenues en utilisant IBM et PBM diffèrent clairement, en particulier pour les petits rayons, des différences significatives en terme de flux thermique sont attendues. Le flux thermique associé à chaque rayon de goutte est reporté sur la figure 2. La frontière entre les "petites" et "grandes" gouttes (selon PBM) est représentée par la ligne pointillée. Le comportement des courbes est assez similaire, mais on observe un écart important entre les 2 approches pour les "petites" gouttes et un accord relativement bon pour les "grandes" gouttes. On peut également souligner qu'entre $1 \mu m$ et $20 \mu m$, PBM surestime le flux par rapport à IBM et qu'en dehors de cette gamme il le sous-estime. Il existe donc des zones de compensation sur le flux global entre les deux approches.

La contribution de chaque taille de goutte au flux de chaleur global (obtenue en intégrant l'équation 3 de r_{min} à r avec r variant de r_{min} à r_{max}), est reportée sur la figure 2 bis. On observe que la valeur du flux de chaleur global (qui correspond au dernier point de la courbe) est différente selon l'approche utilisée (i.e. $q = 121.4 kW.m^{-2}$ pour PBM et $q = 90.6 kW.m^{-2}$ pour IBM, ce qui équivaut à un écart d'environ 35%). On peut souligner que dans la configuration considérée, les deux modèles prédisent que le flux de chaleur est principalement évacué par des gouttes entre 1 et 10 microns (70 % pour PBM et 60 % pour IBM). Cependant, dans cette gamme de rayon, les deux courbes tracées sur la figure 2, bien qu'elles présentent toutes les deux un maximum dans cette plage, diffèrent significativement : la forme des courbes est différente et le maximum observé à environ $\frac{r_e}{2}$ pour PBM est bien supérieur à celui d'IBM. Ainsi, comme ces différences entraînent des changements importants sur les flux de chaleur cumulés (figure 2 bis), il apparaît particulièrement important d'utiliser un modèle précis de la population des gouttes dans cette gamme de taille afin de prédire correctement le flux de chaleur global.

4. Analyse paramétrique

Les variations du flux thermique obtenues à partir des deux approches en fonction de l'angle de contact d'avancée sont reportées sur la figure 3. IBM et PBM prédisent que la diminution de θ_a entraîne une forte augmentation du flux thermique. Par exemple, la valeur du flux thermique est environ 3 fois plus élevée pour $\theta_a = 45^\circ$ par rapport à $\theta_a = 140^\circ$. Pour un rayon de goutte donné, le volume de goutte (et donc l'épaisseur de la couche liquide) est beaucoup plus faible en configuration hydrophile. En conséquence, la résistance thermique de conduction à l'intérieur du liquide est plus faible, et le flux thermique est donc plus élevé. Notez qu'ici, θ_a et r_{max} sont découplés (r_{max} est maintenu constant), ce qui n'est généralement pas le cas dans les expériences. Les différences entre les résultats PBM et IBM se révèlent significatives pour des

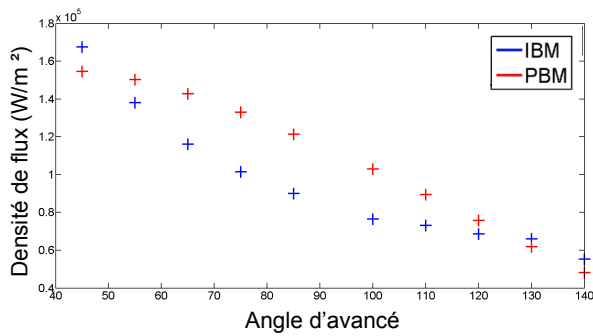


Figure 3 : Variation de la densité de flux obtenue à partir des deux approches en fonction de l'angle d'avancée

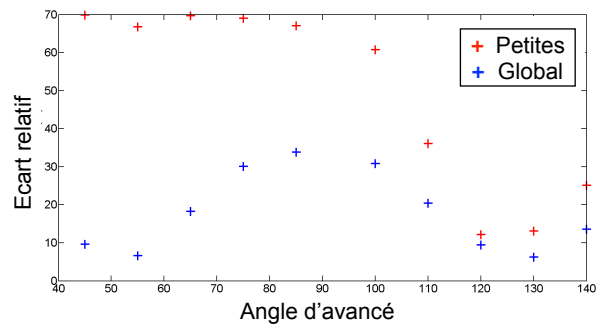


Figure 3 bis : Écart relatif (base IBM) entre les flux globaux ainsi que la contribution des petites gouttes en fonction de l'angle d'avancée

angles d'avancée de 60° à 100° , avec un écart maximum d'environ 35%. Afin de mieux quantifier l'écart entre les contributions des petites gouttes au flux thermique total obtenu à partir des deux approches, les écarts relatifs des résultats PBM par rapport aux résultats IBM sont reportés sur la figure 3 bis. Les écarts entre les flux thermiques totaux sont également reportés sur la même figure. Comme déjà mentionné, l'écart le plus important entre les flux de chaleur globaux se trouve aux angles de contact intermédiaires (c'est-à-dire autour de $\theta_a = 90^\circ$). Pour les petites gouttes, la déviation est particulièrement importante lorsque l'angle de contact est faible. On peut expliquer ce résultat par le fait que sur une surface hydrophile, la contribution des petites gouttes est faible, donc même une grande différence entre les deux approches conduit à un écart modéré entre les flux de chaleur globaux. Au contraire, pour les configurations hydrophobes, la contribution des petites gouttes est plus élevée, et donc les deux courbes de la figure 3 bis ont les mêmes comportements pour $\theta_a > 120^\circ$.

Les autres paramètres sur lesquels il est possible *a priori* d'agir expérimentalement sont le rayon maximum (en imposant par exemple une force externe) et la densité de sites de nucléation (en réalisant des micro et/ou nano structurations de surface). Les écarts relatifs entre les flux de chaleur, ainsi qu'entre les contributions de petites gouttelettes à ces flux de chaleur, obtenus avec PBM par rapport à ceux obtenus avec IBM sont reportés sur les figures 4 et 4 bis. Les écarts augmentent lorsque r_{max} et N_s augmentent, avec une légère nuance pour le paramètre r_{max} où l'écart global atteint une valeur asymptotique d'environ 45% pour le flux de chaleur global et 70% pour la contribution des petites gouttelettes. Les deux approches montrent qu'augmenter N_s et/ou diminuer r_{max} entraîne une augmentation importante du flux de chaleur (figures 5 et 5 bis). Afin de maximiser les transferts, il est donc intéressant d'augmenter au maximum N_s et de

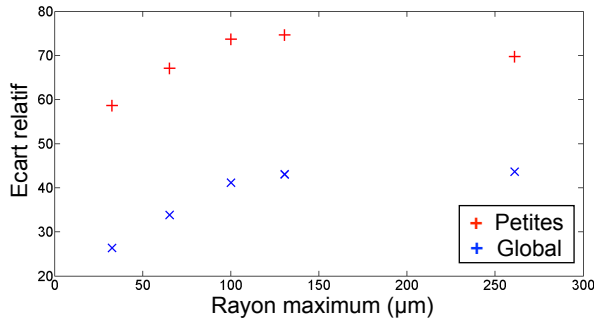


Figure 4 : *Ecart relatif (en prenant IBM comme référence) entre les flux thermiques globaux et entre les contributions de petites gouttes à ces flux globaux en fonction de r_{max}*

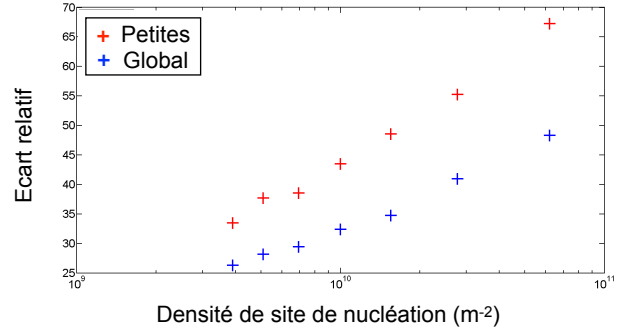


Figure 4 bis : *Ecart relatif (en prenant IBM comme référence) entre les flux thermiques globaux et entre les contributions de petites gouttes à ces flux globaux en fonction de N_s*

diminuer autant que possible r_{max} . L'amélioration du flux thermique est plus prononcée pour les plus petites valeurs de r_{max} , mais il est important de rappeler que ces valeurs peuvent être difficiles à obtenir expérimentalement. Enfin, l'amélioration du flux thermique est à peu près constante avec l'augmentation de la densité des sites de nucléation : une augmentation d'un ordre de grandeur de N_s conduit à un gain de plus de 100 % pour le flux thermique. Cependant, si la diminution de r_{max} réduit l'écart entre les 2 approches, à l'inverse, l'augmentation de N_s entraîne une augmentation de cette déviation. Concernant cette dernière remarque, il est important de rappeler que les variations de N_s conduisent à une modification de la frontière entre petites et grandes gouttes (la frontière étant à $r_e = \frac{1}{\sqrt{4N_s}}$). L'augmentation de N_s conduit à une plus faible contribution des petites gouttes au flux de chaleur global, car les tailles de gouttes qui contribuent principalement au flux de chaleur restent autour de quelques microns

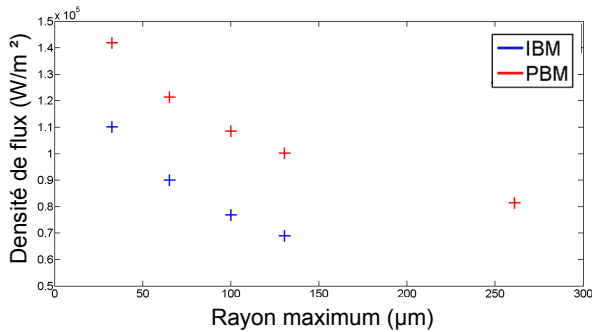


Figure 5 : *Variation de la densité de flux en fonction de r_{max}*

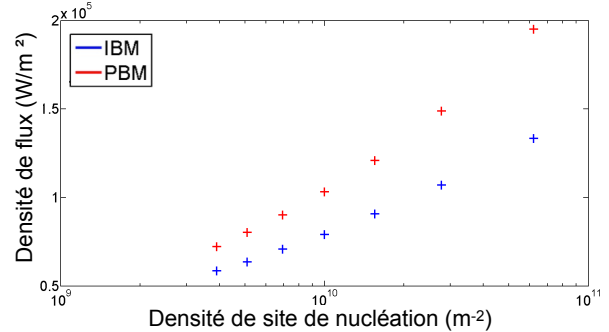


Figure 5 bis : *Variation de la densité de flux en fonction de N_s*

5. Conclusion

La condensation en goutte permet d'atteindre des coefficients de transfert thermique élevés, jusqu'à plusieurs centaines de milliers de $W/(m^2.K)$. Modéliser le transfert de chaleur dans un tel régime implique de prédire la distribution de la taille des gouttes sur la surface, avec des rayons de goutte répartis sur 6 ou 7 ordres de grandeur ainsi que les transferts de chaleur à travers chacune des gouttes. Expérimentalement, la distribution de la taille des gouttes est très difficile d'accès en raison des temps caractéristiques très faibles et de l'énorme différence entre les rayons qui doivent être mesurés simultanément. Seule la distribution des gouttes supérieures

à quelques microns a été mesurée jusqu'à présent, bien prédite par la corrélation de Rose et Glicksman [3]. Ainsi, des approches théoriques fortement simplifiées ont été développées pour calculer à la fois le flux de chaleur à travers une seule goutte et la distribution des gouttes de petite taille (basé sur un bilan de population). Les résultats donnés par ces approches théoriques n'ont pas encore été validés car aucune donnée de référence expérimentale n'existe à ce jour.

Comme alternative au modèle de bilan de population, un modèle basé sur le suivi de chaque individu a été développé. La comparaison de ce modèle avec le modèle basé sur un bilan de population a été réalisé en utilisant un ensemble d'hypothèses communes. Des écarts importants ont été mis en évidence pour les distributions de la taille des gouttes qui peuvent être critiques du point de vue du transfert de chaleur, en particulier pour des rayons proches de la moitié de la distance moyenne entre deux sites de nucléation. Sans préjuger de l'exactitude de l'approche individuelle, l'hypothèse d'un temps caractéristique de renouvellement dû uniquement au balayage (et donc indépendant du rayon des gouttes) utilisée dans les modèles de bilan de population s'est avérée être la principale cause de divergence et est donc discutable pour la modélisation de la condensation en goutte. Bien que les différences soient importantes pour les distributions de taille de goutte, la prédiction du transfert de chaleur global par les deux approches peut être assez proche en fonction de l'ensemble de paramètres d'entrée.

Ces résultats indiquent que des travaux supplémentaires sont nécessaires pour fiabiliser les modèles de condensation en goutte et rendre leurs prédictions plus précises à l'avenir. Ceci est particulièrement vrai pour les situations où l'amélioration des transferts (en augmentant la densité des sites de nucléation et/ou en réduisant le rayon maximum) rendra plus important le rôle des plus petites gouttes dans le coefficient de transfert global.

Références

- [1] S. Kim and K. Kim. Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces. *Journal of Heat Transfer*, 133(8) :081502, 2011.
- [2] Z. Xu, L. Zhang, K. Wilke, and E. Wang. Multiscale dynamic growth and energy transport of droplets during condensation. *Langmuir*, 34(30) :9085–9095, July 2018.
- [3] J. Rose and L. Glicksman. Dropwise condensation, the distribution of drop sizes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16(2) :411–425, February 1973.
- [4] H. Wen and R. Jer. On the heat transfer in dropwise condensation. *The Chemical Engineering Journal*, 12(3) :225–231, January 1976.
- [5] W. Xu, Z. Lan, Q. Liu, B. Du, and X. Ma. Droplet size distributions in dropwise condensation heat transfer : Consideration of droplet overlapping and multiple re-nucleation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127 :44–54, December 2018.
- [6] K. Stevens, J. Crockett, D. Maynes, and B. Iverson. Simulation of drop-size distribution during dropwise and jumping drop condensation on a vertical surface : Implications for heat transfer modeling. *Langmuir*, 35(39) :12858–12875, September 2019.
- [7] S. Zheng, F. Eimann, C. Philipp, T. Fieback, and U. Gross. Modeling of heat and mass transfer for dropwise condensation of moist air and the experimental validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120 :879–894, May 2018.
- [8] J. Lethuillier, P. Lavieille, and M. Miscevic. About the role of falling droplets' sweeping in surface renewal during dropwise condensation. *Langmuir*, 36(43) :12877–12886, 2020.