

IV.4 Influence de la surface d'impacte

L'amélioration du refroidissement par pulvérisation en modifiant la structure de la surface est une approche efficace et peu coûteuse, qui permet une gestion optimale des liquides et favorise l'efficacité du refroidissement local. Selon la taille de la structure, la surface améliorée est classée en quatre catégories : surface mini-structurée, surface micro-structurée, surface nano-structurée et surface à structure hybride. La plupart des premières études sur le refroidissement par pulvérisation ont été menées sur des surfaces planes. Quelques-unes d'entre elles se concentrent sur les effets de la rugosité de surface vis à vis de l'amélioration du refroidissement. Pais *et al.* [54] ont fabriqué trois surfaces rugueuses avec des grains de polissage allant de 0,3 à 22 μm et ont examiné l'influence de la rugosité sur les capacités d'évacuation de la chaleur. Les tests ont montré que, lorsque la rugosité de la surface diminue, le CHF (flux de chaleur critique) augmente. Il est de l'ordre de 1200 W/cm^2 à la surface pour un polissage de 0,3 μm mais il atteint seulement 1000 W/cm^2 en surface pour un polissage de 22 μm . Ceci est dû au fait que la grande rugosité de surface engendre une épaisseur importante du film liquide, entraînant la rupture et le départ tardifs des bulles ; Ainsi qu'une résistance amplifiée du flux de chaleur par évaporation à la surface du film et une atténuation de l'impact des gouttelettes [85].

Les surfaces à mini-texture présentent une taille de structure supérieure à 1 mm. Cette dernière peut être une structure d'ailettes à broches cubiques, d'ailettes pyramides ou d'ailettes droites, etc. (Fig. II.27a). Silk *et al.* [59] ont observé que l'ajout d'une structure à ailettes à une surface refroidie diminue la résistance thermique de convection et augmente le transfert de chaleur par convection par rapport à la surface plane. En effet, la surface totale mouillée est plus grande pour une surface améliorée. Bien que les ailettes à broches cubiques et les ailettes droites aient la même surface mouillée, les performances de refroidissement de la surface des ailettes droites sont supérieures à celles de la surface des ailettes à broches cubiques. Ceci est attribué à la gestion des liquides sur la surface chauffée et à l'efficacité du refroidissement sur la surface mouillée. D'autres études ont indiqué que la disposition des ailettes est un facteur déterminant l'amélioration du transfert de chaleur lorsque la surface est mouillée. Le mauvais agencement des ailettes provoque un film liquide lent et épais, ce qui nuit aux performances de refroidissement locales. Ce point de vue doit encore être vérifié en examinant la variation de température de la surface locale.

Les surfaces structurées micro/nano ou hybrides ont suscité un vif intérêt pour le refroidissement par pulvérisation car la technologie de micro-fabrication a permis de faire progresser de nouvelles surfaces micro/nano-conçues au cours de la dernière décennie (fig. II.27 b, c, d).

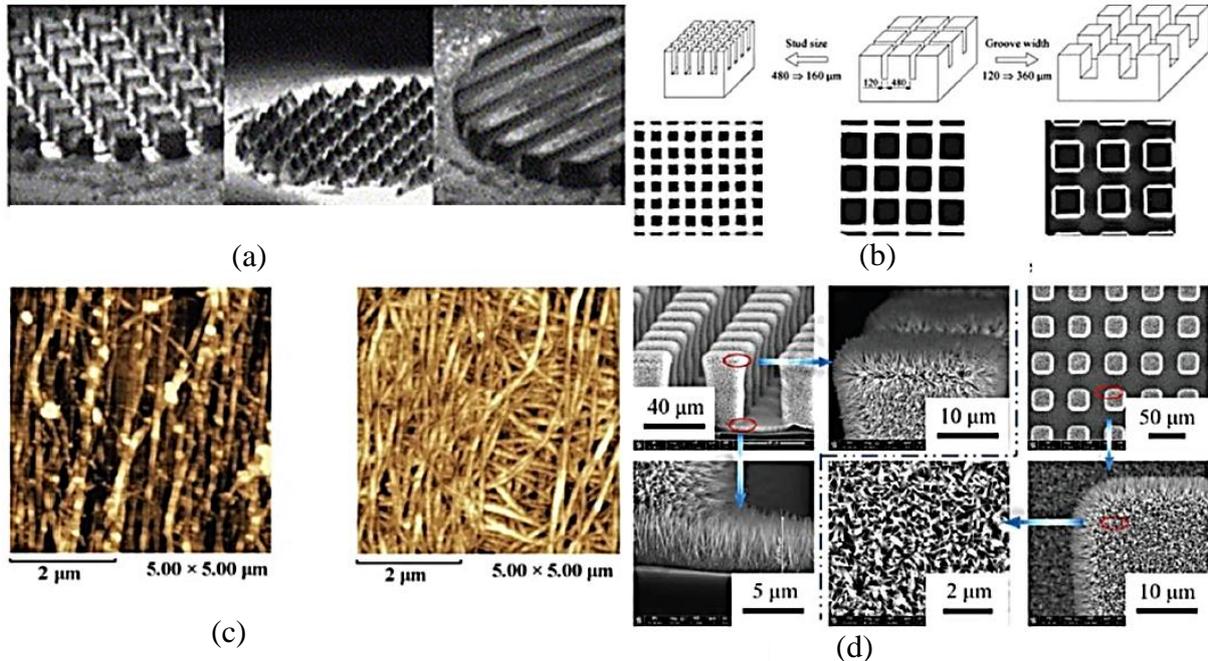


Fig. II.27 (a) Surface structurée millimétrique [77], (b) Surface micro-structurée [36], (c) Surface nano-structurée [92], (d) Surface hybride micro / nano structurée [93].

Des études expérimentales ont appliqué des surfaces micro-texturées présentant des caractéristiques de surface comprises entre 25 et 480 µm, proche de l'épaisseur du film liquide mais supérieure à la taille moyenne des gouttelettes. Elles ont montré que les surfaces micro-structurées ont un léger effet sur l'amélioration du transfert de chaleur dans la zone inondée, mais améliore considérablement les performances de refroidissement dans les régions à film mince et à séchage partiel par rapport à la surface plane [85].

Zhang *et al.* [92] ont montré que la surface nano-structurée offre de meilleures performances de refroidissement car l'angle de contact est plus faible sur la surface nano-structurée par rapport aux surfaces micro-structurées et aux surfaces planes. Récemment, Chen *et al.* [93] ont développé une surface hybride micro/nano-structurée en faisant croître les matrices de nano file de ZnO au-dessus d'une tranche de silicium micro-structurée gravée. Les résultats des tests ont montré que les performances de refroidissement des surfaces hybrides sont meilleures que celles des surfaces micro-structurées en régime d'ébullition en raison de leur grande capacité de mouillage et de la réduction de leur surface de séchage. Si l'on compare les performances de la

surface nano-structurée [92] et de la surface hybride [93], il n'y a pas de différence significative dans l'amélioration du flux de chaleur par rapport à la surface lisse.

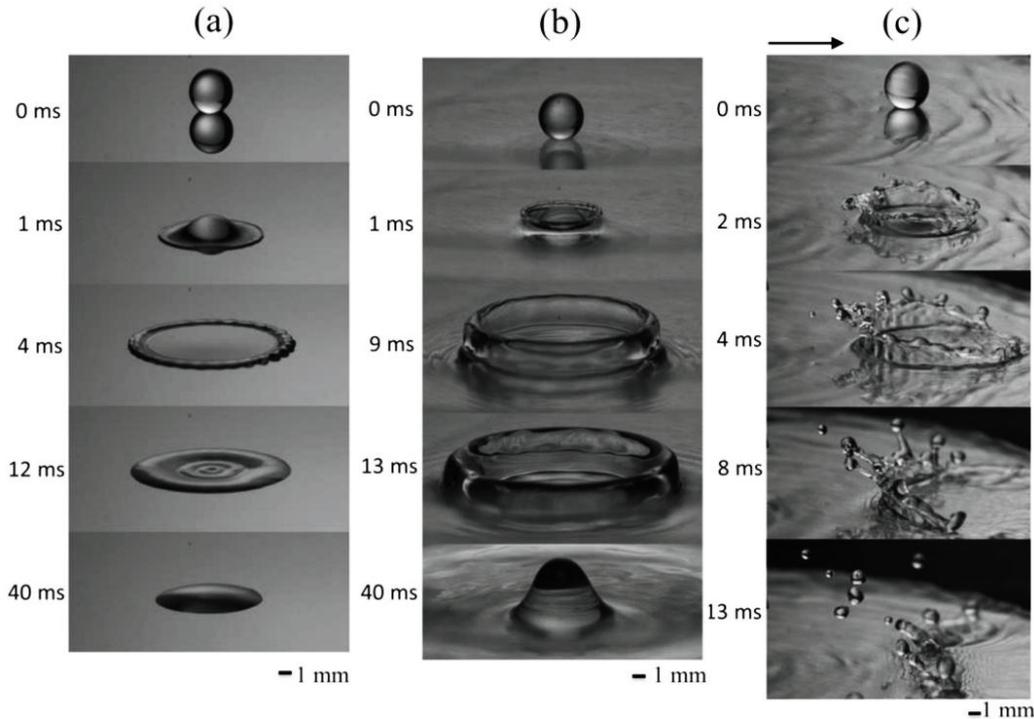


Fig. II.28 Gouttelettes d'eau de même vitesse et de même diamètre ($U_0 = 1,85 \text{ m/s}$, $D_0 = 3,2 \text{ mm}$) dans trois conditions de surface différentes : a) une surface sèche, b) un film d'eau stationnaire, c) un film d'eau en écoulement [94].

La dynamique d'impact lors du refroidissement par pulvérisation est compliquée car elle implique de nombreux phénomènes, tels que la collision de gouttelettes, la génération de film stationnaire et de film à écoulement radial et l'inondation de liquide, « spreading, receding, splashing ». Tous ces phénomènes d'impact résultent de l'interaction de l'écoulement des gouttelettes et de l'écoulement du film sur la surface d'impact. Le flux de gouttelettes comprend trois types : une gouttelette simple, un train de gouttelettes (gouttelettes continues formées par la rupture du jet) et une rafale de gouttelettes (partie du train de gouttelettes sélectionnée à une certaine fréquence). De manière similaire, les conditions d'écoulement du film impliquent une surface sèche (pas de film), un film fixe, un film circulant radialement ou leur combinaison sur la surface de refroidissement (Fig. II.28).

Les conditions d'écoulement des gouttelettes et du film sont deux paramètres d'écoulement qui déterminent directement le mécanisme de transfert de chaleur du refroidissement par pulvérisation. Les gouttelettes du liquide de refroidissement apportent une différence de température significative entre le flux de gouttelettes en expansion et le film fluide, ce qui contribue à la réduction de la résistance thermique à l'intérieur de la couche de film et à

l'amélioration du transfert de chaleur de la surface chauffée au flux fluide. La dynamique des fluides sur la surface d'impact régit le transfert de chaleur par convection locale. Le film qui coule rapidement transfère plus de chaleur en aval. L'épaisseur du film mince réduit la couche limite thermique et favorise l'évaporation à partir de l'interface liquide. Par conséquent, l'étude de la dynamique des fluides d'un film affectant les gouttelettes nous permet de mieux comprendre les résultats thermiques de l'impact des gouttelettes sur la surface chaude refroidie par le film et de mieux comprendre les performances de refroidissement par pulvérisation [85].

IV.4.1 Refroidissement par simple goutte d'impact

IV.4.1.1 Impact sur surfaces sèches

La surface sèche apparaît généralement dans un refroidissement par pulvérisation en deux phases, comme le montre le changement de longueur de la ligne de contact. Plusieurs études précédentes ont montré que le flux de chaleur critique dans le refroidissement par pulvérisation est atteint à la plus grande longueur de la ligne de contact. Sur une surface sèche, la dynamique de l'impact des gouttelettes sur une surface recouverte de gouttelettes est essentielle aux performances de refroidissement locales. Le processus d'un impact de gouttelette liquide a été divisé par Rioboo *et al.* [95] en cinq phases successives : cinématique, étalement, relaxation, mouillage et équilibre. La plupart des travaux de recherche ont été axés sur la propagation et la relaxation. En phase d'étalement, la ligne de contact se dilate radialement jusqu'à atteindre un étalement maximal, déterminé par le diamètre initial des gouttelettes, la vitesse d'impact, la tension superficielle, la viscosité et la mouillabilité de la surface solide (Li *et al.* [96]). Le diamètre maximal de propagation a une importance cruciale dans la phase de propagation. En plus, sur une surface super-hydrophobe, l'étalement maximal dépend d'une manière significative de la viscosité des gouttelettes liquides et de la graduation, en fonction du nombre de Weber $\sim We^{1/4}$. Van Dam et Clerc [97] ont mis en évidence une différence significative d'étalement maximal entre les substrats présentant des angles de contact petits et grands, ce qui montre l'influence significative de la mouillabilité au dernier stade de l'impact. Une pression atmosphérique plus faible peut empêcher la propagation des gouttelettes, ce qui provoque une faible propagation maximale [85].

Certains modèles analytiques ont été proposés pour prédire le processus d'impact, dont la plupart étaient basés sur la conservation de l'énergie de la gouttelette d'impact. Chandra et Avedisian [98] ont développé une corrélation empirique entre la dissipation visqueuse, tenant

en compte le temps d'étalement estimé, la fonction de dissipation simplifiée et le volume estimé de la dissipation visqueuse. Gao et Li [99] ont proposé un modèle théorique basé sur la forme dynamique réelle de la gouttelette, capable de prédire avec succès le diamètre maximum d'étalement et le diamètre de retrait pendant le processus de recul. Certains chercheurs ont concentré leurs efforts sur l'étude des éclaboussures sur des surfaces sèches variées. Il a été démontré que la rugosité de surface et les textures influencent la limite d'éclaboussure. Il a été constaté que l'impact des gouttelettes sur une surface en mouvement présente différents phénomènes d'éclaboussures et de non-éclaboussures par rapport aux surfaces stationnaires.

Sur une surface sèche et chauffée, Bernardin *et al.* [100] ont tracé la courbe d'ébullition du refroidissement par impact des gouttelettes comme identique au refroidissement par pulvérisation. Dans le régime de refroidissement liquide monophasé, Pasandideh-Fard *et al.* [101] ont observé qu'une augmentation de la vitesse d'impact favorise l'élévation du flux de chaleur autour de la zone d'impact. En effet, la vitesse de croissance des gouttelettes favorise la propagation des gouttelettes, élargissant ainsi la surface mouillée sur le substrat chauffé. Cependant, l'augmentation de la vitesse d'impact des gouttelettes améliore légèrement le flux de chaleur au point d'impact. Batzdorf *et al.* [102] ont proposé un modèle théorique permettant de prédire le taux de transfert de chaleur lors de l'impact des gouttelettes. La prédiction théorique est plus précise lorsque le nombre de Prandtl liquide Pr est supérieur à 5 étant donné que l'évaporation des gouttelettes n'est pas prise en compte dans le modèle. Le taux de transfert de chaleur prévu montre une augmentation rapide de la valeur maximale, puis une diminution lente.

Sur une surface surchauffée avec une température supérieure à $200\text{ }^\circ\text{C}$, Tran *et al.* [103] ont trouvé trois phénomènes significatifs après l'impact des gouttelettes : l'ébullition par contact (contacts de la gouttelette avec la surface), l'ébullition du film (couche de vapeur formée sous la gouttelette) et l'ébullition du film de pulvérisation (couche de vapeur et minuscules gouttelettes éjectées vers le haut) (Fig. II.29a). Leurs expériences ont montré que l'impact maximum d'une gouttelette s'étend après une mise à l'échelle universelle avec le nombre de Weber ($\sim We^{2/5}$), qui est plus rapide que celle sur une surface non chauffée ($\sim We^{1/4}$). Staat *et al.* [104] ont mentionné que la température de transition de Leidenfrost montre peu de dépendance vis-à-vis du nombre de Weber affectant les gouttelettes, par contre le passage aux éclaboussures dépend significativement de la température de surface. Adera *et al.* [105] ont étudié la formation de gouttelettes non mouillantes sur une surface micro-structurée super-hydrophile en chauffant légèrement la surface au-dessus de la température de saturation du

fluide en gouttelettes, ce qui est dû à l'augmentation de la conductivité thermique et à la diminution de la perméabilité à la vapeur de la région structurée. Dans une étude expérimentale de Jung *et al.* [106], la distribution transitoire de la température lors de l'étalement des gouttelettes a été détectée par thermographie infrarouge.

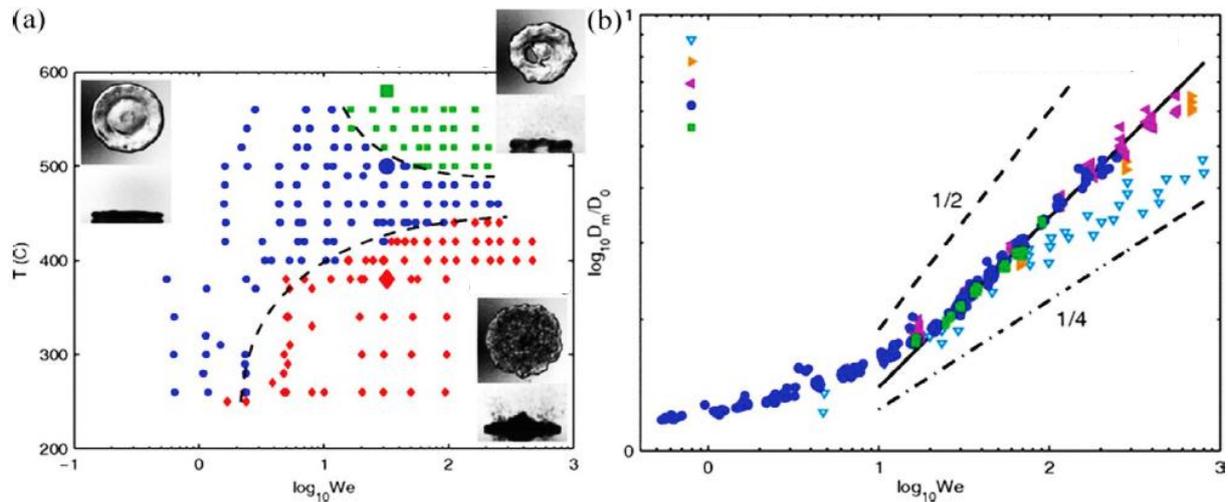


Fig. II.29 (a) Diagramme de phase de l'impact des gouttelettes d'eau sur une surface surchauffée, (b) diamètre d'épandage maximum en fonction du nombre de weber.

Au contact de l'ébullition, le liquide de refroidissement en gouttelettes entre en contact avec la surface et le flux de chaleur maximal est rapide à atteindre au début de l'impact : environ 2 ms au point d'impact. Lors de l'ébullition pelliculaire, une surface non mouillante apparaît au début de l'impact et le flux de chaleur maximal est même inférieur à celui de l'ébullition par contact en raison de la présence d'une couche de vapeur sous la gouttelette. Sur une surface chauffée, l'étude de l'impact simultané de plusieurs gouttelettes est peu importante, ce qui nécessite une discussion plus approfondie de l'influence de la collision des gouttelettes sur la ligne de contact et l'évaporation locale. Cela favorise la compréhension du refroidissement par pulvérisation en deux phases et l'optimisation de l'efficacité du refroidissement.

IV.4.1.2 Impact sur films stationnaires

Un film stationnaire apparaît au centre d'un impact de pulvérisation normal ou se situe à l'endroit où l'axe de la buse de pulvérisation est en contact avec la surface d'impact en pulvérisation inclinée. Sur un film fixe, la plupart des chercheurs se sont concentrés sur le processus de propagation et le mécanisme de formation d'éclaboussures après l'impact. Yarin et Weiss [107] ont développé un modèle quasi-unidimensionnel qui prédit l'existence d'une discontinuité cinématique dans la distribution de la vitesse et de l'épaisseur du film. La discontinuité correspond à l'émergence d'une feuille liquide de soulèvement. Roisman et

Tropea [108] ont généralisé la théorie de Yarin pour le cas de vecteurs de vitesse arbitraires dans les films liquides à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de la couronne. Yarin et Weiss [107] ont trouvé expérimentalement que le rayon de la couronne du centre d'impact pouvait être exprimé en fonction du temps d'étalement non dimensionnel. La dernière étude de Cossali *et al.* [109] ont donné deux paramètres empiriques existant dans leur modèle. L'impact de gouttelettes sur un film immobile peut entraîner ou non des éclaboussures. La recherche du seuil d'impact des éclaboussures a fait l'objet de quelques études expérimentales. Cossali *et al.* [109] ont testé des gouttes de divers mélanges d'eau et de glycérol agissant sur un film liquide mince et proposé un paramètre empirique permettant de prévoir l'apparition d'un impact par projection. Pour les films épais, Cossali *et al.* [109] Et Rioboo *et al.* [95] ont trouvé une valeur critique du paramètre de seuil, au-dessus de laquelle l'impact par éclaboussure se produit (Tab. I.1). Les auteurs reconnaissent que peu d'études ont été menées sur le transfert thermique de l'impact d'une seule gouttelette sur un film fixe chauffé [85].

IV.4.1.3 Impact sur films en écoulement

L'interaction entre l'écoulement des gouttelettes et l'écoulement du film constitue une dynamique de fluide fondamentale dans le refroidissement par pulvérisation en une seule phase ou l'ébullition nucléée. La dynamique de l'impact a été abordée dans certaines recherches. Alghoul *et al.* [110] ont présenté une étude expérimentale sur une gouttelette liquide agissant sur des films liquides en mouvement horizontal. Une forme de couronne asymétrique a été observée en raison de l'effet du film en mouvement. Che *et al.* [111] ont démontré que la forme asymétrique de la couronne en écoulement décroissant se forme également après l'impact des gouttelettes. Gao et Li [94] ont également analysé l'évolution précoce de l'impact des gouttelettes sur la base d'expériences et d'un modèle théorique. Une fois que les gouttelettes ont atterri sur le film, le flux de gouttelettes s'étend rapidement et pousse le liquide vers l'extérieur, ce qui provoque la formation des feuilles de liquide soulevées. Au début de l'impact des gouttelettes, la direction du flux d'étalement est opposée à celle du film en amont du point d'impact, alors que leur direction est la même en aval. Les feuilles de la couronne qui se lèvent peuvent éclabousser, ce qui dépend de l'instabilité du bord de la feuille. Une analyse a été menée pour dériver l'équation du taux d'étirement, en concluant que le taux d'étirement le plus élevé apparaît à l'emplacement où le flux d'étalement des gouttelettes est exactement opposé au flux du film, et l'emplacement est également l'emplacement le plus probable des éclaboussures. La valeur du seuil de projection a été fournie pour estimer si une projection se produit ou non. Les gouttelettes secondaires des éclaboussures s'envolent de la surface refroidie, ce qui ne contribue

pas à la performance de refroidissement. En d'autres termes, la suppression des éclaboussures devrait être bénéfique au refroidissement.

L'étude tardive de Gao et Li [112] [113] a également permis de mieux observer le développement de l'impact des gouttelettes sur le film fluide et de démontrer sa relation avec le refroidissement local. Le processus d'impact est observé par la vidéo à haute vitesse, montrant deux états : l'état en propagation, l'état en remplacement. En état de propagation, le flux de gouttelettes se diffuse et ralentit progressivement jusqu'à atteindre la propagation maximale. Après cela, le flux de gouttelettes est poussé vers l'aval et éventuellement remplacé par le flux de film. La température mesurée indique également deux étapes : l'étape de réponse lorsque la température diminue rapidement et l'étape de récupération dans laquelle la température revient à l'état d'équilibre. Un facteur d'amélioration a été proposé pour indiquer une amélioration de la convection par rapport au refroidissement en régime permanent. L'amélioration de pic sert à prendre en compte l'influence de la vitesse d'impact, de la taille des gouttelettes et du débit du film sur l'amélioration, laquelle est proportionnelle à la racine carrée du rapport débit de gouttelettes sur le débit du film appliqué directement au refroidissement par pulvérisation. Une des raisons est que le flux de film a été généré par une source externe plutôt que par le flux de gouttelettes lui-même.

IV.4.2 Refroidissement par impact d'une série de gouttelettes (train de gouttelettes)

Un phénomène possible dans le refroidissement par pulvérisation est que les gouttelettes fraîches impactent la surface de manière continue à une certaine fréquence. Le flux de gouttelettes est défini comme le flux du train de gouttelettes. La dynamique du fluide sous-jacente est l'interaction d'un flux continu de trains de gouttelettes avec le film fluide formé sur la surface chauffée. Afin d'étudier le transfert de chaleur du refroidissement par pulvérisation sous cet aspect, quelques études ont été menées sur le transfert de chaleur d'un train de gouttelettes continu frappant des surfaces chaudes. Qiu *et al.* [114] Ont démontré l'influence de la température de surface sur la dynamique de l'impact. Avant l'état d'équilibre, le film de gouttelettes s'étale sur la surface chauffée et la température de surface augmente le taux d'étalement du film qui s'écoule lorsque la température de surface dépasse le point d'ébullition. Avec l'augmentation de la température de surface la surface mouillée par le film à l'état d'équilibre diminue et finit par rester constante lorsque la température est supérieure à 190 ° C. En outre, la température affecte également l'angle de projection (Fig. II.30). Un angle de projection stable marqué par une ligne rouge est établi à une température de surface supérieure

à 192 ° C. La dernière étude de Qiu *et al.* [114] Ont montré que l'inclinaison du train de gouttelettes diminue l'angle d'éclaboussure et augmente la taille moyenne des gouttelettes secondaires.

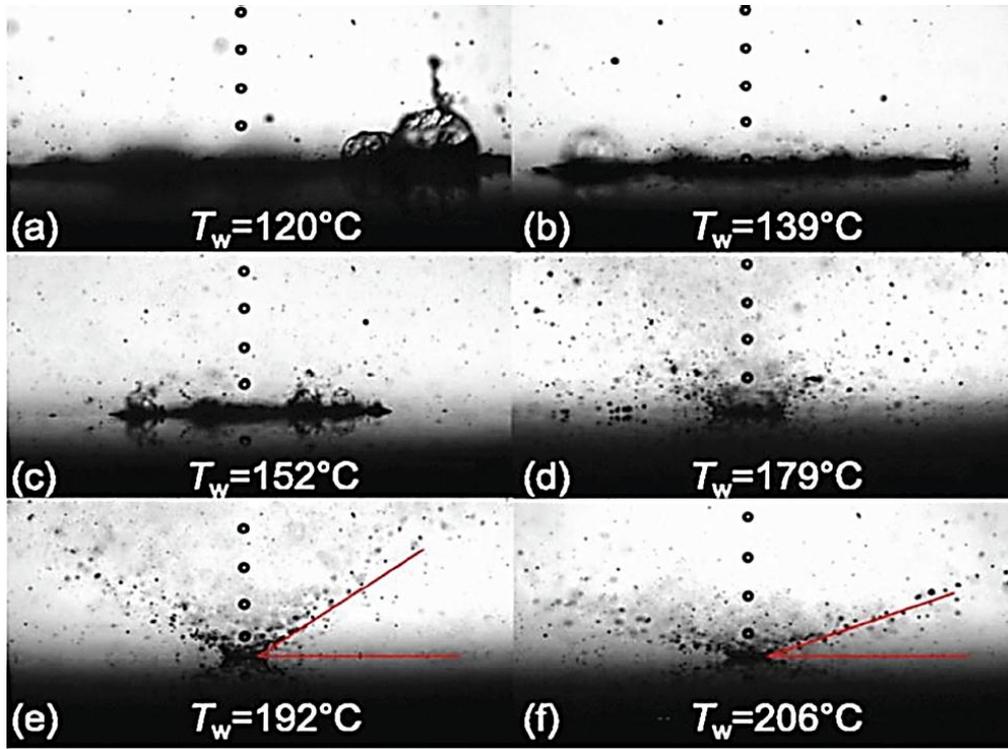


Fig. II.30 Dynamique d'impact du train de gouttelettes à différentes températures de surface est une vitesse de 15,2 m/s [114].

Soriano *et al.* Ont présenté une observation expérimentale d'un conflit entre plusieurs trains de gouttelettes. L'espacement des impacts entre plusieurs flux de gouttelettes affecterait la propagation et les éclaboussures des régimes d'impact, et la performance de refroidissement optimale était atteinte lorsque la vitesse du film n'a pas été perturbée par les flux de gouttelettes adjacentes. En outre Zhang *et al.* [92] Ont démontré que l'espacement des impacts et le motif d'impact influent considérablement sur les performances de refroidissement local et global sur la surface chaude. En comparaison avec le refroidissement par impact de jet circulaire, l'impact de train de gouttelettes permet d'obtenir de meilleures performances de refroidissement pour divers modèles. La même conclusion a été faite en comparant les performances de refroidissement du train de gouttelettes et de l'impact du jet sur un film fluide qui refroidit la surface chaude. Grâce à des buses piézoélectriques, plusieurs groupes de flux de jet ont été générés et divisés en trains de gouttelettes pour refroidir la surface chaude, et le flux de chaleur maximal atteint environ 170 W/cm² avec un diamètre de buse de 25 μm . Cependant, la

dynamique d'impact peu claire et sa relation avec le refroidissement local nécessitent une étude plus approfondie.

V. Nombres adimensionnelles pour refroidissement par pulvérisation

Il faut souligner que la courbe d'ébullition en piscine est valable pour le refroidissement par pulvérisation. En effet, ce dernier est aussi divisée en quatre régimes : régime monophasé, régime d'ébullition nucléée, régime d'ébullition de transition et régime d'ébullition du film. En régime monophasé, le flux de chaleur augmente linéairement avec l'augmentation de la différence de température de surface entre la surface chauffante et le liquide de refroidissement. La convection forcée par film en mouvement radial et l'évaporation sur l'interface instable d'une couche de film mince jouent un rôle dominant en régime monophasé. Dans le régime d'ébullition nucléée, des bulles commencent à apparaître de manière répétée sur les sites de nucléation de la surface chauffée, ainsi le flux de chaleur augmente fortement par rapport au refroidissement monophasé. Concernant le régime d'ébullition de transition, quand les sites de nucléation recouvrent complètement la surface chauffée, le flux thermique moyen atteint une valeur maximale, définie en tant que flux thermique critique (CHF). Lorsque ce point est atteint et la température d'ébullition est obtenue (zone décroissante de la courbe d'ébullition), l'efficacité du transfert de chaleur diminue considérablement. Le liquide de refroidissement absorbe la chaleur de la surface et forme une couche de vapeur, de sorte qu'il devient difficile pour les liquides environnants de pénétrer dans la surface chaude. Ce qui explique la forte diminution du flux de chaleur dans ce régime. Dans le film, le régime d'ébullition est un phénomène intéressant, à savoir une tendance croissante au flux de chaleur. Une chaleur massive est générée à partir de la surface chauffée et le transfert de chaleur par rayonnement devient un mécanisme clé de transfert de chaleur entre la surface chauffée et le liquide, de sorte que le flux de chaleur a tendance à augmenter à partir du point de Leidenfrost. Compte tenu de la limite de sécurité et de la mise en œuvre rapide du refroidissement électronique, les chercheurs se penchent sur la corrélation théorique en régime monophasé et en régime d'ébullition de nucléation [76].

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel utilisé pour caractériser les transferts thermiques entre un fluide et une paroi, appelé transfert convectif. On le définit de la manière suivante :

$$N_u = \frac{hL_c}{\lambda} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- h coefficient de transfert thermique [W/m²K]
- L_c longueur caractéristique [m]
- λ conductivité thermique du fluide [W/mK]

La longueur caractéristique dépend de la géométrie en présence. Dans le cas d'un écoulement dans une conduite, on prendra le diamètre de la canalisation, ou le diamètre hydraulique si la conduite n'a pas une section circulaire. Dans le cas d'une plaque plane, on prendra la longueur de la plaque, ou l'abscisse à compter du bord d'attaque de la plaque.

Comme tout nombre sans dimension, la valeur du nombre de Nusselt dépend fortement des grandeurs de référence que l'on choisit, et de la signification physique que l'on entend lui donner (locale ou globale par exemple). Il est notamment important de savoir, lors de l'utilisation d'une corrélation, si le coefficient de convection h a été défini par rapport à une température de référence fixe, ou à une température de mélange locale.

L'application du théorème de Buckingham à un problème de convection forcée, pour un écoulement établi en vitesse et en température avec un fluide dont les propriétés thermomécaniques sont constantes, fait apparaître trois groupements ou nombres sans dimension en relation sous la forme suivante :

$$N_u = \sum C \cdot Re^\alpha \cdot Pr^\beta \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- Re le nombre de Reynolds
- Pr le nombre de Prandtl

Cette somme représente une fonction quelconque des deux variables qui ne peut être précisée que par l'expérience :

$$N_u = f(Re, Pr) \quad (\text{II.5})$$

Ici, l'expérience montre qu'une fonction monôme est généralement adéquate.

L'objectif est, en général, de déterminer le nombre de Nusselt afin d'en déduire le coefficient de transfert thermique.

Le nombre de Prandtl (Pr) est un nombre sans dimension, ainsi nommé en hommage au physicien allemand Ludwig Prandtl. C'est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et celle de la chaleur (diffusivité thermique) :

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- ν La viscosité cinématique ;
- α La diffusivité thermique.

Qui s'expriment toutes deux en m^2/s

Comme $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ et $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, une définition équivalente est :

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- μ la viscosité dynamique (exprimée en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) ;
- ρ la masse volumique (en kg m^{-3}) ;
- λ la conductivité thermique, (en $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) ;
- C_p la capacité thermique massique à pression constante (en $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un nombre de Prandtl faible (exemple : métaux liquides) indique que la conduction thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température.

Exemple :

fluide	Prandtl
eau	7,01
air	0,707

En régime monophasé, Rybicki et Mudawar [80] ont proposé la corrélation pour le spray diélectrique PF-5050, qui est :

$$Nu = 4.7 Re^{0.61} Pr^{0.32} \quad (\text{II.8})$$

Karwa *et al.* [115] ont développé une relation concernant le transfert de chaleur pour les sprays d'eau à cône plein :

$$Nu = 20.344 Re^{0.659} \quad (\text{II.9})$$

Cette relation a une précision de $\pm 7,3\%$ pour des pertes de charge variées. Heieh et Tien [116] ont étudié le refroidissement par pulvérisation de R-134a et ont établi une corrélation entre le nombre de Nusselt et le nombre de Weber, la répartition de la taille et les effets de la chaleur sensible dans le régime monophasé, qui est :

$$Nu = 933 We^{0.36} (d_{32} / d_0)^{0.25} (\Delta T / T_s)^{0.027} \quad (\text{II.10})$$

Des relations généralisées ont été développées pour le nombre de Nusselt lié à la température de paroi et au nombre moyen de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds de pulvérisation et de la température non dimensionnelle, avec une erreur absolue de 4% et 15% lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 440 [117]. Les expériences ont été réalisées à l'aide d'une buse à cône plein Unijet fournies par la société Spraying System Company. Les résultats montrent l'influence du flux massique et la température de paroi sur les performances du transfert de chaleur en régime sans ébullition. Pour étudier le facteur d'effet de manière exhaustive, les données expérimentales ont été utilisées pour développer une relation empirique, qui relie le nombre de Nusselt au nombre de Reynolds de pulvérisation et à la température non dimensionnelle. L'expression obtenue est la suivante :

$$Nu_T = 0.1275 Re^{0.9322} \xi^{2.2485} \quad (\text{II.11})$$

La température sans dimension est le rapport entre la température de la paroi T_w et la différence de la température d'ébullition du liquide et de la température ambiante, comme suit :

$$\xi = \frac{T_w}{T_{\text{Ébullition}} - T_e} \quad (\text{II.12})$$

où T_e est la température ambiante. $T_{\text{Ébullition}}$ La température d'ébullition de l'eau 373 K.

La figure II.31 montre le nombre de Nusselt lié à la température de la paroi (Nu_T) par rapport à la température non dimensionnelle avec une erreur absolue moyenne de $\pm 4\%$ pour différents nombres de Reynolds.

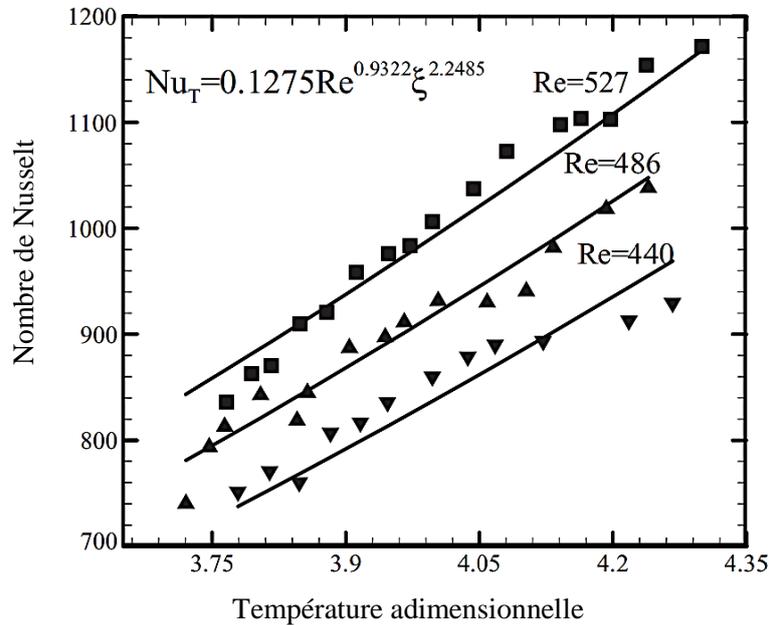


Fig. II.31 Corrélation du nombre de Nusselt pour différents nombres de Reynolds [117].

Il est clair que le nombre de Nusselt augmente avec le nombre de Reynolds et la température non dimensionnelle. Le nombre moyen de Nusselt attire également de nombreuses inquiétudes, comme celles de Nitin *et al.* [118] et Oliphant *et al.* [119] Afin de vérifier la validité de l'équation II.9, le nombre moyen de Nusselt est déterminé par intégration pour être comparé au résultat fourni précédemment :

$$\overline{Nu} = \frac{0.1275}{\xi_{\max} - \xi_{\min}} \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} Re^{0.9322} \xi^{2.2485} d\xi = 3.1699 Re^{0.9322} \quad (\text{II.13})$$

Lorsque le liquide de refroidissement est de l'eau les valeurs de ξ_{\max} et ξ_{\min} sont respectivement 4.6625 et 3.6625.

Oliphant *et al.* [119] Ont présenté la corrélation du nombre de Nusselt avec une erreur moyenne de 12% comme suit :

$$\overline{Nu} = 32.5 Re^{0.51} \quad (\text{II.14})$$

Ceci est valable pour $10 \leq Re \leq 1000$, pour les buses pneumatiques en régime sans ébullition.