LE SPLASHING ET LES AEROSOLS : REMISE EN SUSPENSION PARTICULAIRE PAR IMPACT DE JET DE LIQUIDE SUR UNE SURFACE

J M. Mbaye^{*1,2}, M. Sow¹ et C. Josserand²

¹Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN-RES, SCA, LPMA, Gif-sur-Yvette, 91192, France

²Laboratoire d'Hydrodynamique de l'Ecole polytechnique, Boulevard des Maréchaux, 91120 Palaiseau,

France.

* modou.mbaye@irsn.fr

TITLE

SPLASHING AND AEROSOLS: RESUSPENSION OF PARTICLES BY IMPACT OF A LIQUID JET ON A SURFACE RESUME

La littérature concernant la fraction massique d'aérosols remise en suspension dans l'air lors de l'impact d'un jet de liquide est pauvre. Le but de ce travail, novateur sur cette thématique, est de quantifier la génération d'aérosols lorsqu'un jet de liquide circulaire impacte une surface solide, en prenant en compte les caractéristiques du jet en termes de vitesse, de diamètre et de morphologie ainsi que les propriétés physico-chimiques du liquide. Nous montrons que, lorsque le jet de liquide est dans le régime de Rayleigh, c'est-à-dire que le jet est brisé en plusieurs gouttes avant l'impact, l'inertie des gouttes impactantes influence l'amplitude de la distribution granulométrique en masse de la taille des aérosols mais ne change pas sa forme et, par conséquent le diamètre aérodynamique médian en masse. Nous avons également été montré que, lors de l'impact, la génération de particules dans l'air dépend des nombres adimensionnels de Weber et d'Ohnesorge par le biais du paramètre d'éclaboussures K qui caractérise la transition d'éclaboussures lors de l'impact d'une goutte isolée sur une surface. Nous proposons à partir de nos résultats expérimentaux une prédiction quantitative de la fraction mise en suspension lors de l'impact d'un jet de liquide, valable pour $10^3 < \text{Re} < 10^4$ et $10^2 < \text{We} < 10^3$, ouvrant ainsi la voie à un modèle plus général.

ABSTRACT

The literature concerning the mass fraction of aerosols resuspended in the air during the impact of a liquid jet is poor. The objective of this work, innovative on this subject, is to quantify the generation of aerosols when a circular liquid jet impacts a solid surface while taking into account the characteristics of the jet in terms of velocity, diameter and morphology as well as the physicochemical properties of the liquid. We found that, the aerosol production is strongly dependent on the morphology of the jet at impact. Moreover, when the liquid jet is in the Rayleigh regime, i.e., the jet is broken into several drops before impact, the inertia of the impacting drops influences the amplitude of the aerosol mass size distribution but does not change its shape and, therefore the aerodynamic mass median diameter. We also show that, during the impact, the particle generation in the air depends on the Weber and Ohnesorge dimensionless numbers through the splash parameter K which characterizes the splash transition upon impact of an isolated drop on a surface. Finally, we propose a quantitative prediction of the airborne resuspension fraction during the impact of a liquid jet, valid for $10^3 < \text{Re} < 10^4$ and 10^2 < We < 10^3 , thus paving the way for a more general model.

MOTS-CLÉS: Impact de jet de liquide, éclaboussures, KMES, gouttelettes secondaires. **KEYWORDS:** Liquid jet impact, splashing, ARF, secondary droplets.

1. INTRODUCTION

La fragmentation de liquides, conduisant à la formation de microgouttelettes se produit dans de nombreux processus naturels et technologiques, tels que l'impact au sol des gouttes de pluie, la production d'aérosols d'embruns marins, le refroidissement de surfaces par pulvérisations ou la génération de microgouttelettes contenant des virus comme le COVID-19. Dans les cas où la génération de gouttelettes ou de microgouttelettes n'est pas désirable lors de l'impact, il est particulièrement intéressant de se demander dans quelles conditions le liquide va se déposer totalement sur la surface solide ou si elle éclabousse en générant de microgouttelettes. Dans l'industrie nucléaire, ce dernier cas peut être problématique car lors d'une éventuelle fuite accidentelle de liquide contenant des radioéléments, des particules nocives sont mises en suspension dans l'air durant l'impact du liquide, sous forme de microgouttelettes. Pour répondre à cette question, il est important de s'appuyer sur ce qui est fait sur l'étude des impacts de gouttes isolées sur une surface solide. Dans ce cas de figure, il est nécessaire de comprendre l'ensemble du processus d'impact. Un grand nombre d'articles théoriques et appliqués témoignent de l'intérêt scientifique du problème (par exemple Allen, 1988; Yarin & Weiss, 1995; Mundo et al., 1995; Moreira et al., 2010; Thoroddsen et al., 2012; Breitenbach et al., 2018).

Dans ce papier, nous présentons les résultats d'une étude expérimentale détaillée sur les aérosols de gouttelettes générés par l'impact d'un jet de liquide circulaire, fragmenté, impactant une surface solide. Dans ce travail nous avons réalisé une étude paramétrique et évalué la fraction massique des aérosols générés pour 'identifier les mécanismes de formation des gouttelettes secondaires et les distributions en tailles des gouttelettes. Une prédiction/corrélation quantitative de cette fraction massique a été proposée, en se basant sur une analyse physique du problème en utilisant les caractéristiques du jet de liquide (diamètre du jet d_{jet} et vitesse d'impact V_{imp}, ainsi que la masse volumique ρ , la viscosité dynamique μ et la tension de surface σ du liquide).

2. MATERIEL ET METHODES

Pour quantifier et comprendre comment les aérosols sont générés par l'impact d'un jet de liquide, nous avons conçu un dispositif expérimental étanche ayant comme dimension 0.7 m x 0.6 m x 1.5 m correspondant à un volume de 0,63 m³, voir Figure 1, permettant la caractérisation des aérosols émis par l'impact d'un jet de liquide sur une plaque solide. Le prélèvement des aérosols en air calme et l'homogénéisation du mélange à l'intérieur de l'enceinte ont été vérifiés avec succès par calcul CFD. Pour caractériser la masse de liquide projetée sous forme d'aérosols, nous avons dissous une masse mi de fluorescéine sodée dans un volume Vi de liquide. Lors de l'impact de la solution de volume V_I, les aérosols contenant de la fluorescéine générée par l'impact ont été collectés par aspiration à fort débit sur un filtre qui a été analysé avec un spectrofluoromètre. A partir de cette masse d'aérosols collectée ma, nous avons introduit la fraction mise en suspension par éclaboussure définie comme le rapport entre la masse des aérosols collectée mc et la masse initiale de fluorescéine mi (KMES = m_c/m_i). La distribution en masse de la taille des particules a été obtenue avec un Aerodynamic Particule Sizer (APS). Les mécanismes très rapides qui sont en jeu durant l'impact ont été investigués avec deux techniques de visualisations. D'une part, une caméra à haute vitesse a été utilisée pour caractériser la vitesse d'impact des gouttes ou du jet, la trajectoire ainsi que les vitesses de quelques microgouttelettes secondaires produites après l'impact. La caméra à haute vitesse NAC'S, HI-Dcam a une résolution spatiale de 512 x 1280 pixels avec une cadence de 2000 images par seconde. D'autre part, une caméra à très haute résolution spatiale combinée avec un laser Nd-Yag a été utilisée pour capter les détails de l'impact et ainsi déterminer la plus petite taille de microgouttelettes secondaires observables. La caméra à haute résolution spatiale, Baumer, LXG-500C est composée de 7920 x 6004 pixels avec une cadence de 18 images par seconde. Sur un champ de 1 cm, la taille d'un pixel est égale à 2 µm.





3. RESULTATS

Dans cette section, deux principaux résultats seront présentés. Tous les résultats ont été obtenue avec de l'eau déminéralisée mélangée avec du NaCl et de la fluorescéine sodée avec une concentration de 199 g/L et 0,4 g/L respectivement. D'une part, l'influence de la hauteur d'impact et de la morphologie du liquide impactant sur les aérosols produits sera illustrée. D'autre part, l'influence de de la vitesse et du diamètre des gouttes impactantes issues de la fragmentation du jet sera illustrée. A la fin, nous proposons une formule pour la prédiction de la fraction massique d'aérosols mise en suspension, K_{MES}, et l'origine de ces microgouttelettes sera mise en évidence.

Comme illustré sur la Figure 2 gauche), l'impact du jet de liquide présente différentes caractéristiques lorsque la hauteur de chute H_{impact} varie, des jets (presque) lisses à faible H_{impact}, aux jets ondulés et même aux impacts de trains gouttes lorsque H_{impact} augmente. La Figure 2 droite) illustre l'évolution du K_{MES} en fonction de la vitesse d'impact pour des jets du même liquide avec le même diamètre de buse d_{jet} (2 mm) mais avec trois vitesses initiales de jet différentes et des hauteurs de chute différentes. Pour une faible hauteur d'impact,

 $H_{impact} = 5 \text{ cm}$ pour $V_{jet} = 1,8 \text{ m/s}$ par exemple, sur la Figure 2, le jet heurte la surface d'impact de manière continue et sans rugosité de surface. Dans cette configuration, le K_{MES} mesuré est de l'ordre du bruit de fond de la mesure (indiqué par la ligne rouge). Des vitesses d'impact similaires peuvent être atteintes pour des vitesses initiales de jet différentes : par exemple $V_{impact} = 4,2 \text{ m/s}$ peut être atteint à la fois pour $V_{jet} = 2,5 \text{ m/s}$ avec $H_{impact} = 32 \text{ cm}$ et pour $V_{jet} = 3,4 \text{ m/s}$ avec $H_{impact} = 10 \text{ cm}$. Bien que ces deux configurations aient les mêmes paramètres dynamiques ($Re_{imp} = \rho V_{imp}d_{jet}/\mu$ et $We_{imp} = \rho V_{imp}^2 d/\sigma$), les résultats illustrent de manière surprenante que la plus petit hauteur d'impact (10 cm) conduit à un K_{MES} deux fois plus petit faible que celui obtenu avec une hauteur de 30 cm. Par ailleurs, pour une même vitesse d'impact, la Figure 2 illustre clairement que plus la hauteur de chute est élevée, plus le K_{MES} est élevé. Les images des jets d'impact insérées sur la même figure (à côté de chaque point expérimental) montrent qu'aucune gouttelette secondaire aérosolisée n'est produite lorsque le jet n'est pas brisé à l'impact. Ces résultats montrent que la vitesse d'impact et donc les paramètres dynamiques ne peuvent pas être les seuls paramètres caractérisant la production d'aérosols, et que la géométrie du jet à l'impact est une donnée cruciale.

En effet, les visualisations de la région impactée illustrent que la production des éclaboussures et des aérosols dans ces expériences est clairement due à la désintégration de la corolle formée par le jet ondulé ou les trains de gouttes.



Figure 2 : Gauche) illustration de la morphologie du jet à l'impact. Plus la hauteur d'impact est élevée, plus le jet est rugueux voire fragmenté et plus il y a des éclaboussures à l'origine des microgouttelettes aérosolisées. Droite) K_{MES} en fonction de la vitesse d'impact V_{imp} pour différentes vitesses initiales de jet et pour différentes hauteurs de chute caractérisées la barre en couleur. L'image du jet à l'impact est montrée pour chaque point de la figure, étiquetée par la hauteur de chute en cm.

Dans cette étude, en fixant la hauteur d'impact à 57 cm (impact de train de gouttes) et en faisant varier le diamètre du jet de 1, 1,5 et 2 mm ainsi que la vitesse initiale du jet de 1 à 5 m/s, il été montré expérimentalement que le K_{MES} généré durant l'impact du jet de liquide (fragmenté) est bien corrélé avec les nombres adimensionnels du problème tels que Weber (We = $\rho V_{imp} d_{iet}/\sigma$) et Ohnesorge (Oh = $\mu/(\rho V_{imp} d_{iet})^{0.5}$), Figure 3. En effet, le modèle empirique le plus populaire pour la prédiction de la fraction massique des grosses gouttes secondaires générées par l'impact de gouttes, à basse fréquence sur les gouttes initiales, a été développé par (Yarin & Weiss, 1995) et nommé le paramètre d'éclaboussures, K = WeimpOh^{-0,4}. Le diamètre des grosses gouttelettes secondaires est égale à 0,1 fois le diamètre des gouttes impactantes. Elles ont une trajectoire balistique et se déposent en un temps réduit, alors que les microgouttelettes secondaires avec l'évaporation et la cinétique de cristallisation sont en suspension dans l'air. Nous avons proposé une corrélation pour la prédiction des petites gouttelettes dont le diamètre est égal à 0,01 fois le diamètre des gouttes impactantes provenant de la fragmentation du jet liquide (impact à haute fréquence). Dans nos conditions d'impact, la loi de prédiction est la suivante : K_{MES} = 2,5x10⁻¹⁴ (K-2667) (K-K_c), avec K_c =5000 le seuil de production d'aérosols. Cette relation basée sur le paramètre d'éclaboussure, K, met bien à l'échelle les microgouttelettes comme le paramètre d'éclaboussure pour les grosses gouttelettes, ce qui suggère une forte corrélation entre la prédiction des grosses gouttelettes et celle des microgouttelettes. En effet, les deux populations de gouttelettes sont générées à partir des mêmes instabilités d'atomisation : la désintégration de la couronne. Les microgouttelettes proviennent en partie des gouttelettes satellites produites lors de la rupture des digitations de la couronne due à l'instabilité du Rayleigh-Plateau.

La Figure 4 illustre la distribution granulométrique en masse normalisée, $dM/Mdlog(D_p)$, des microgouttelettes d'aérosols générées pendant l'impact. Pour les trois diamètres de jet de liquide et pour toute la gamme de vitesses d'impact utilisées, d_{jet} entre 1, 1,5 et 2 et V_{imp} entre 3 et 7 m/s, les distributions peuvent être ajustées sur une seule loi log-normale avec un diamètre aérodynamique médian en masse de 7,5 µm et un écart-type géométrique autour de 1,35. La taille de ces microgouttelettes se situe dans la gamme des aérosols respirables. Leur processus de génération en termes de diamètre semble être indépendant de la vitesse et du diamètre d'impact.



Figure 3 : K_{MES} en fonction du paramètre d'éclaboussures K basé sur le nombre de Weber et d'Ohnesorge à l'impact pour trois diamètres de jet 1 mm, 1,5 mm et 2 mm. La hauteur d'impact H est fixée à 57 cm. L'image insérée illustre le processus d'éclaboussure et l'origine des gouttelettes d'aérosols. La ligne bleue verticale placée à K_c = 5000 représente le seuil de la production d'aérosols



Figure 4 : Distribution granulométrique en masse des gouttelettes secondaires aérosolisées normalisée avec la masse totale d'aérosols donnée par APS M₀ pour des valeurs du paramètre d'éclaboussure K assez proches pour les 3 diamètres de jet.

4. CONCLUSION

Cette étude est pionnière sur la caractérisation de la production d'aérosols par un jet de liquide impactant une surface solide tout en faisant varier à la fois à la fois la hauteur d'impact, le diamètre du jet et la vitesse d'impact, dans des gammes du nombre de Reynolds et de Weber ainsi que du paramètre d'éclaboussures suivantes : $10^3 < \text{Re} < 10^4$ et $10^2 < \text{We} < 10^3$ et $10^3 < \text{K} < 10^4$. Nous avons montré que les quantités d'aérosols générées par l'impact dépendent de la vitesse d'impact et que, pour une même vitesse d'impact les impacts par trains de gouttes génèrent plus d'aérosols que les impacts de jets rugueux. De plus, la fraction d'aérosols produits peut être, en partie, prédite à partir du paramètre d'éclaboussures. Le diamètre aérodynamique en masse des aérosols semble être indépendant du diamètre et de la vitesse d'impact. La taille des aérosols produits par l'impact est dans la gamme respirable, ce qui est problématique pour la sûreté nucléaire.

- Allen, R. F. (1988). The mechanics of splashing. Journal of Colloid And Interface Science, 124(1), 309–316. https://doi.org/10.1016/0021-9797(88)90352-9
- Breitenbach, J., Roisman, I. V., & Tropea, C. (2018). From drop impact physics to spray cooling models: a critical review. *Experiments in Fluids*, 59(3), 1–21. https://doi.org/10.1007/s00348-018-2514-3
- Mundo, C., Sommerfeld, M., & Tropea, C. (1995). Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(2), 151–173. https://doi.org/10.1016/0301-9322(94)00069-V
- Thoroddsen, S. T., Takehara, K., & Etoh, T. G. (2012). Micro-splashing by drop impacts. *Journal of Fluid Mechanics*, 706, 560–570. https://doi.org/10.1017/jfm.2012.281
- Yarin, A. L., & Weiss, D. A. (1995). Impact of Drops on Solid Surfaces: Self-Similar Capillary Waves, and Splashing as a New Type of Kinematic Discontinuity. In *Journal of Fluid Mechanics* (Vol. 283). https://doi.org/10.1017/S0022112095002266