ETUDE EXPERIMENTALE DE LA REMISE EN SUSPENSION PARTICULAIRE PAR IMPACT DE JETS LIQUIDES CONTAMINES SUR UNE SURFACE

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

EXPERIMENTAL STUDY OF AIRBORNE RELEASE BY CONTAMINATED LIQUID JETS IMPACT ONTO A SURFACE

RESUME

Le sujet de cette étude porte sur l'aérocontamination liée aux aérosols produits lorsqu'un jet de liquide circulaire contaminé impacte une surface solide. L'objectif de l'étude est de réaliser des expériences en laboratoire à échelle réduite et d'identifier les mécanismes qui sont à l'origine de la mise en suspension de gouttelettes secondaires évaporables lors de l'impact d'un jet de liquide. Les paramètres d'influence retenus sont la vitesse débitante et le diamètre du jet de liquide, ainsi que la hauteur d'impact du jet. Pour chaque essai, la masse totale d'aérosols collectés augmente par palier avec la vitesse : une augmentation lente pour les faibles vitesses, probablement due aux mécanismes d'impact unique de gouttes, et une augmentation plus rapide pour les fortes vitesses, causée par les impacts multiples de gouttes. La taille des aérosols collectés est dans la gamme respirable, inférieure à 10 μ m. Ce travail devrait permettre à l'IRSN de disposer des éléments pour estimer le rejet potentiel de contaminant lors d'un scénario accidentel de chute de liquide contaminé.

ABSTRACT

The topic of this study is the airborne contamination related to aerosols produced when a contaminated circular liquid jet impacts a solid surface. The objective of the study is to carry out laboratory experiments on a reduced scale and to identify the mechanisms which are at the origin of the suspension of secondary evaporable droplets linked to the impact of a liquid jet. The parameters of influence retained are: the flow velocity and the diameter of the liquid jet, as well as the impact height of the jet. For each test, the total mass of aerosols collected increases in steps with the velocity: a slow increase for low velocities, probably due to single drop impact mechanisms, and a faster increase for high velocities, caused by multiple drop impacts. The size of the collected aerosols is in the respirable range, below 10 µm. This work should allow nuclear safety authorities to estimate the potential release of contaminant during a contaminated liquid drop accident scenario.

MOTS-CLÉS: impact de jet, instabilité de Rayleigh Plateau, aérosols, gouttelettes secondaires. **KEYWORDS:** jet impingement, Rayleigh Plateau instability, aerosols, secondary droplets.

1. INTRODUCTION

Dans l'industrie nucléaire, une partie de la matière radioactive est manipulée sous forme de liquide. Lors d'un scénario accidentel correspondant par exemple à la fuite de liquide au cours du procédé chimique PUREX à l'usine de la Hague, en particulier sur les évaporateurs des produits de fission, ou à la chute d'un conteneur de liquide contaminé lors des manipulations en laboratoire, une quantité de la radioactivité peut être mise en suspension dans l'air sous forme d'aérosols via des gouttelettes évaporables. De ce fait, il est important de bien caractériser la quantité et la taille des aérosols générés lors de la chute, afin de pouvoir prédire leur transfert et les moyens de radioprotection à mettre en œuvre. Pour cela, il convient notamment d'identifier les mécanismes qui pilotent la remise en suspension d'aérosols lors de l'impact d'une masse de liquide sur une surface liquide.

Dans notre cas, on se limitera au cas d'un jet liquide circulaire non atomisé, et particulièrement au régime de Rayleigh. Lorsque la fuite du contaminant se produit sous la forme d'un jet de liquide, plusieurs mécanismes sont mis en jeu entre l'orifice de sortie du jet et la surface d'impact. Ils peuvent être classés suivant trois grandes zones d'étude : les mécanismes de la zone de pré-impact, ceux de la zone d'impact et ceux de la zone de post-impact. Les mécanismes de la zone de pré-impact sont influencés par la géométrie de la buse de sortie du jet et les paramètres du jet (vitesse du jet, hauteur de chute du jet et propriétés physico-chimiques du liquide). A la sortie de la buse, avant l'impact, il se produit des perturbations surfaciques qui se propagent le long du jet. L'amplification de ces perturbations de longueur d'onde λ provoque la désintégration du jet en gouttes de diamètre comparable au diamètre du jet, environ 1,89 fois le diamètre du jet, Figure 1. Les

premières études expérimentales sur des jets circulaires ont été menées par Savart (1833), qui a démontré que la fragmentation du jet se faisait naturellement et indépendamment des forces externes ou de la direction du jet, ce qui lui a permis de conclure que la désintégration du jet est intrinsèquement liée à sa dynamique. Les travaux de Plateau (1873) ont permis d'expliquer les résultats de Savart et ont servi de socle à Rayleigh (1879) pour développer sa théorie sur la stabilité des jets. Ce phénomène de désintégration du jet de liquide, bien connu maintenant, est appelé l'instabilité de Rayleigh-Plateau. Les gouttelettes secondaires issues de l'impact du jet sont en partie pilotées par les instabilités capillaires qui ont tendance à fragmenter le jet en gouttes avant l'impact.



Figure 1 : Illustration de la fragmentation d'un jet de liquide dans le régime de Rayleigh.

Lorsque la hauteur d'impact est inférieure à la longueur continue du jet, celui-ci s'impacte sous la forme d'un jet continu. Dans le cas contraire, l'impact se fait sous la forme d'une série de gouttes avec une fréquence d'impact élevée, d'environ 500 Hz dans notre cas. La remise en suspension suite à l'impact de gouttes isolées à faible fréquence (environ 1 Hz) a été beaucoup investiguée, mais la littérature sur l'impact de jet de liquide fragmenté ou non est assez pauvre. Les modèles ou corrélations des impacts de gouttes isolées ne peuvent pas être extrapolés aux impacts multiples de gouttes à fortes fréquences, Liang et Mudawar (2016). Ce travail a pour but de présenter en partie l'influence du diamètre, de la vitesse du jet de liquide, de la hauteur d'impact ainsi que des propriétés physico-chimiques du liquide sur la distribution granulométrique en masse des aérosols ainsi que la masse totale des aérosols collectés.

2. MATERIEL ET METHODES

Pour étudier la remise en suspension suite à l'impact d'un jet de liquide, un dispositif expérimental nommé DICAPRIO (Dispositif de Caractérisation des Particules remises en suspension par impact de jet de liquide et leurs Observations), a été développé (cf. Figure 2). Le dispositif a un volume de 0,63 m³. Les paramètres de contrôle sont la hauteur d'impact (fixée à 5 cm pour caractériser le jet non fragmenté et à 57 cm pour caractériser le jet fragmenté), la vitesse et le diamètre du jet (qui varient de 1 à 5 m/s et de 1 à 2 mm respectivement), ainsi que les propriétés physico-chimiques des liquides en termes de masse volumique, de tension de surface et de viscosité. La vitesse du jet est pilotée par une pression exercée par de l'air comprimé envoyé directement à l'intérieur de la cuve se situant au-dessus de la buse d'injection du liquide. Afin de déterminer de manière précise la concentration massique totale d'aérosols mis en suspension, nous avons dissous un traceur massique, la fluorescéine sodée ($C_{20}H_{10}Na_2O_5$), dont la limite de détection en solution est de 10⁻¹¹ g/cm³. De plus, pour augmenter la limite de détection de nos aérosols, nous avons également ajouté dans la solution du NaCl. Lors de l'impact de la solution, les gouttelettes secondaires évaporables génèrent des résidus secs de fluorescéine mélangés avec du NaCl qui sont collectés simultanément par une aspiration à fort débit sur un filtre puis analysés avec un fluorimètre et, par une aspiration à faible débit, par un compteur de particules (APS « Aerodynamic Particle Sizer»).



Figure 2 Schéma du dispositif expérimental DICAPRIO (Dispositif de Caractérisation des Particules remises en suspension par impact de jet de liquide et leurs Observations) La dynamique de l'impact est observée en utilisant une caméra rapide (1200 images par seconde, 11 µm par pixel) afin de déterminer les mécanismes en jeu durant l'impact du jet (fragmenté ou non fragmenté).

3. RESULTATS

Les premiers essais réalisés nous ont montré que le dispositif DICAPRIO était bien adapté pour mesurer la remise en suspension particulaire par impact de jet de liquide sur une surface. Les essais sont répétables avec un coefficient de variation de 30% au maximum.

Sur la Figure 3 Gauche 1), on peut voir que l'impact d'un jet non fragmenté de diamètre 1 mm, placé à 5 cm de la surface d'impact et se trouvant dans le régime de Rayleigh, n'émet pas d'éclaboussures donc pas de gouttelettes secondaires et de contaminants particulaires. Ceci est en accord avec les résultats de Lienhard et al. (1992). Toutefois, les résultats obtenus avec l'APS montrent que, lorsque la hauteur de chute est de 57 cm (jet fragmenté à l'impact), la distribution des aérosols semble multimodale pour les jets à forte vitesse et monomodale pour les faibles vitesses. Ceci pourrait être dû au fait que, pour des faibles vitesses, l'impact se produit avec des gouttes quasi isolées (impact unique), Figure 3 Gauche 2), alors que pour des fortes vitesses, l'augmentation du débit a tendance à rendre le jet turbulent et à favoriser un impact simultané de gouttes (impact multiple) Figure 3 Gauche 3). La différence entre ces régimes est que l'impact unique de qouttes génère des aérosols avec le mécanisme de crown splash, les gouttelettes secondaires provenant des digitations de la couronne de l'éclaboussure de la goutte, correspondant aux aérosols autour de 6 µm, alors que pour l'impact multiple de gouttes, les aérosols proviennent également de l'interaction de plusieurs crown splashs. Cette interaction favorise la coalescence de gouttelettes secondaires, ce qui donne des gouttelettes secondaires plus grandes, Cossali et al. (2004), et pourrait expliquer le mode de résidus secs autour de 10 µm. D'après les résultats donnés par l'APS, la transition entre ces régimes serait autour de 3,6 m/s, correspondant à un nombre de Weber de 213 dans le cas du jet de 1 mm. La production des aérosols pour le cas de la buse de 2 mm semble être le crown splash sans coalescence de gouttelettes secondaires avant évaporation.



Figure 3 Gauche : 1) impact d'un jet de 1 mm non fragmenté placé à 5 cm de la surface d'impact avec une vitesse de 3 m/s, 2) et 3) impact d'un jet de 1 mm fragmenté placé à 57 cm de la surface d'impact avec une vitesse débitante de 3 m/s (impact unique) et de 7 m/s (impact multiple) respectivement. Droite : Distribution granulométrique en masse donnée par l'APS pour un jet de 1 mm et de 2 mm.

En plus de la granulométrie fournie par l'APS, nous avons tracé sur la Figure 4 l'évolution de la fraction massique mise en suspension (K_{MES} = masse de fluorescéine mise en suspension / masse initiale de fluorescéine dans la solution d'impact) en fonction de la vitesse débitante du jet de liquide. On peut y voir d'une part que, pour un diamètre d fixé, le K_{MES} augmente avec la vitesse. D'autre part, pour le cas du jet de 1 mm, pour des faibles vitesses (< 3 m/s), l'évolution est très lente. Pour des vitessesmoyennes, comprises entre 3 m/s et 5 m/s, on peut remarquer un plateau qui pourrait être une transition entre le régime des impacts uniques et celui des impacts multiples de gouttes car, après 5 m/s, on observe une évolution très rapide de la fraction massique mise en suspension. Ceci pourrait s'expliquer par l'interaction des couronnes des éclaboussures dues aux impacts multiples de gouttes, Cossali et al. (2004).



Figure 4 : Evolution de la fraction massique mise en suspension en fonction de la vitesse débitante du jet de liquide pour une hauteur de chute de 57 cm et trois diamètres de jet (1, 1,5 et 2 mm), avec une solution d'eau déminéralisée + (0,4 g/L de fluorescéine + 199 g/L de NaCl). Propriétés du liquide : ρ = 1197 kg/m³; μ=1,271 mPa.s; σ = 62,8 mN/m.

4. CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer que les aérosols collectés provenant des gouttelettes secondaires du jet de liquide étudié ont un diamètre médian inférieur à 10 µm (gamme respirable). De plus, la distribution en taille des aérosols évolue en fonction de la dynamique de l'impact :

- Pour les grandes hauteurs d'impact adimensionnées H/d = 570, supérieures à la longueur de rupture adimensionnée du jet L/d ~ 100 deux types d'aérosols peuvent être généré : les fortes vitesses d'impact 3 < V (m/s) < 5, à la limite du régime de Rayleigh, ont tendance à générer des aérosols médian inférieur à 10 μm et également supérieur à 10 μm, Ces configurations ont tendances à augmenter la fraction massique d'aérosols mise en suspension. les vitesses moyennes inférieures à 3 m/s ont tendance à produire des aérosols de diamètre médian inférieur à 10 μm.
- Pour les moyennes hauteurs d'impact adimensionnées H/d = 285, les aérosols produit on majoritairement un diamètre médian inférieur à 10 μm. Ils contribuent également à l'aérocontamination de par leur nombre et parce qu'ils ont un temps de suspension dans l'air plus long et peuvent rester plus longtemps dans les réseaux de ventilation sans se sédimenter.
- Les faibles hauteurs d'impact, inférieures à la longueur de fragmentation du jet L/d ~ 100, ne génèrent souvent pas de gouttelettes secondaires d'après Lienhard et al. (1992). Cependant, dans certaines des configurations étudiées, des aérosols ont pu être collectés avec l'APS et sur les filtres. Nos prochains essais permettront d'éclaircir le seuil d'éclaboussures et d'émission d'aérosols suite à l'impact d'un jet de liquide non fragmenté.

La fraction massique de contaminants collectés lors nos travaux est comprise entre 2,1.10⁻⁶ et 2,5.10⁻⁵.

Références

Cossali, G., Marengo, M., & Santini, M. (2004). Impact of single and multiple drop array on a liquid film. In 19th Annual Meeting of ILASS, Nottingham, UK, 06-08/09/2004 (pp. 1-8). ILASS Europe.

Liang, G., & Mudawar, I. (2016). Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film. International Journal of Heat and Mass Transfer, 101, 577-599.

Lienhard, J. H., Liu, X., & Gabour, L. A. (1992). Splattering and heat transfer during impingement of a turbulent liquid jet.

Plateau, J. (1873). Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires (Vol. 2). Gauthier-Villars.

Rayleigh, Lord. (1879) On the Capillary Phenomena of Jets Proc. R. Soc. London 29 (196-199): 71-97.

Savart, F. (1833) Mémoire Sur La Constitution Des Veines Liquides Lancées Par Des Orifices Circulaires En Mince Paroi Ann. de Chim 53: 337– 398.