MECANISMES DE 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

MECHANISMS OF PARTICULATE RESUSPENSION BY CONTAMINATED LIQUID JETS IMPACT ONTO A SURFACE

RESUME

Cet article présente principalement des éléments bibliographiques sur la production d'aérosols suite à l'impact d'un jet de liquide sur une surface solide. Ce travail se focalise essentiellement sur les mécanismes se produisant dans la zone d'impact car, à l'état actuel, les phénomènes se produisant dans cette zone ne sont pas bien appréhendés. Ces mécanismes responsables de la production d'aérosols sont d'une part la fragmentation du film de liquide et d'autre part la génération de bulles d'air sur la surface du liquide, source de production d'aérosols par éclatement.

ABSTRACT

This article mainly presents bibliographical information on the production of aerosols due to the impact of a liquid jet on a solid surface. This work focuses mainly on the mechanisms occurring on the impact zone because, at the current state, the phenomena occurring in this zone are not well understood. These mechanisms responsible of the production of aerosols are on the one hand, the fragmentation of the liquid film and on the other hand, the generation of air bubbles, source of production of aerosols by bursting.

MOTS-CLÉS: Jet, instabilité surfacique, bulles d'air, gouttelettes secondaires. **KEYWORDS:** Jet, surface instability, air bubbles, 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 sodium liquide, utilisé comme caloporteur de refroidissement dans les réacteurs à neutrons rapides, la fuite pourrait provoquer un incendie en cas de pulvérisation de ce liquide en fines gouttelettes, en contact avec l'air. D'autres scénarios accidentels sont aussi possibles, notamment en cas de fuite de liquide au cours du procédé chimique PUREX à l'usine de la Hague, en particulier sur les évaporateurs des produits de fission. Dans ce type de scénarios, une quantité de la radioactivité peut être mise en suspension dans l'air sous forme d'aérosols. De ce fait, il est important de bien caractériser la quantité et la distribution granulométrique des aérosols générés par l'accident dans le cas où la fuite se produit sous la forme d'un jet de liquide. La caractérisation du terme source permet d'anticiper les éventuels rejets atmosphériques et leurs conséquences sur les opérateurs et le public. Pour étudier le comportement du jet de liquide (fuite) et des gouttelettes secondaires évaporables (aérosols), et procéder à la modélisation numérique de ce problème, il est nécessaire d'avoir des connaissances sur les écoulements diphasiques qui comportent plusieurs phases séparées par une interface. Cette séparation, ou interface, est le siège de transferts de masse et de quantité de mouvement entre chaque phase.

Les mécanismes qui pilotent la remise en suspension d'aérosols lors de l'impact d'un jet de liquide sur une surface liquide ou solide sont nombreux et sont souvent étudiés séparément. 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 provoque la désintégration du jet en gouttes de diamètre comparable au diamètre du jet, voire plus petit. 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 principalement pilotées par ce qui se passe dans la zone de pré-impact (dynamique du jet) et ce qui se passe dans la zone d'impact. Lors de l'impact du jet, plusieurs mécanismes sont mis en jeu et sont présentés dans ce qui suit.

2. LES MECANISMES DE PRODUCTION D'AEROSOLS DANS LA ZONE D'IMPACT DU JET

Lorsqu'un jet de liquide impacte une surface, l'intensité et la taille des éclaboussures qui en résultent sont différentes selon que la surface soit liquide ou solide. Dans le cas où l'impact se produit sur une surface liquide, la pénétration du jet dans

le liquide provoque un entraînement de bulles d'air à l'intérieur du liquide. Ces bulles d'air entraînées remontent par la suite à la surface du liquide par flottabilité avant de s'éclater et laisser en suspension des gouttelettes de film. Ce phénomène ne sera pas présenté ici.

Dans le cas où l'impact du jet se produit sur une surface solide, le liquide s'étale radialement et rapidement en un mince film de liquide. A partir d'une certaine distance du point d'impact, une augmentation brutale de la hauteur du film de liquide peut être observée. Ce phénomène de transition est connu sous le nom de ressaut hydraulique circulaire. La configuration de l'écoulement du ressaut hydraulique est représentée sur la Figure 1. L'écoulement à l'impact peut être divisé en quatre régions : voir Figure 1 (Droite)



La région de stagnation,

- la région de développement de la couche limite dynamique. Zone pour laquelle l'épaisseur de la couche limite $\delta(r)$ est inférieure à celle du film de liquide. Le film de liquide s'étale à une vitesse égale à celle de l'impact,
- la région pleinement visqueuse. Zone pour laquelle la couche limite a atteint la surface libre et la vitesse du film commence à décroître

. la région de développement de la turbulence.

Figure 1 Gauche : ressaut hydraulique circulaire (Liu et Lienhard (1993)). Droite : schéma descriptif du ressaut (Bush et Aristoff (2003))

Watson (1964) a été le premier à éclaircir l'effet de la viscosité sur le ressaut hydraulique. Il a adapté le principe de la conservation de la quantité de mouvement aux ressauts hydrauliques circulaires pour déterminer la position radiale du ressaut hydraulique. Plusieurs auteurs ont par la suite testé sa théorie et l'ont légèrement améliorée. Le lien entre le rayon du ressaut hydraulique, les conditions d'impact du jet ainsi que les propriétés physico-chimiques du fluide ont été mis en lumière par Bohr et al. (1993), Brechet et Neda (1999) et Kasimov (2008). Ils ont réussi à montrer que le rayon du ressaut hydraulique est proportionnel à la gravité, au débit du jet q, à la viscosité cinématique du liquide v et, dans une moindre mesure, à la hauteur de chute du jet x. D'après l'étude théorique et expérimentale de Brechet et Neda (1999), pour un débit de liquide q=23,3 ml/s, une viscosité cinématique $v = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ et une hauteur de chute x=37,8 cm, le rayon du ressaut Ri vaut théoriquement 2,3 cm et expérimentalement 2,7 cm. On constate donc une erreur relative de 15% entre la théorie et l'expérience dans ce cas de figure. Bush et Aritoff (2003) ont amélioré le modèle de Watson pour la prédiction du rayon du ressaut hydraulique en prenant en compte les effets de tension de surface (nombre de Bond Bo). En partant du point d'impact, la viscosité entraîne la diffusion de tourbillons à travers la couche limite à expansion radiale jusqu'à la position r_v=0,315 a Re^{1/3} avec a le rayon du jet et Re (2aU/v) le nombre de Reynolds basé sur la vitesse du jet U. La nature de l'écoulement change à partir de la coordonnée r= rv. Bhagat et al. (2018) ont tenté de déterminer les paramètres influents permettant de déterminer le rayon du ressaut hydraulique et leurs résultats théoriques et expérimentaux montrent que le ressaut est principalement piloté par la viscosité cinématique υ et la tension de surface σ. Pour les mêmes conditions que Brechet et Neda (1999) en termes de débit, de viscosité et de hauteur de chute avec une tension de surface σ = 0,072 N/m, le ressaut de l'étude de Bhagat et al. (2018) vaut théoriquement 3,2 cm et expérimentalement 3,4 cm, soit une erreur relative de 6%.

Toutefois, il existe un désaccord entre les différents modèles de prédiction de la position du ressaut hydraulique circulaire, avec une erreur relative de 28% entre le modèle de Brechet et Neda (1999) et celui de Bhagat et al. (2018). Ce désaccord est d'autant plus grand que le rapport de profondeur en aval et en amont du ressaut est important. Les mécanismes de production de gouttelettes secondaires, en amont et en aval du ressaut hydraulique, sont présentés dans ce qui suit.

2.1. Mécanismes de production d'aérosols en amont du ressaut hydraulique

Dans le cas des jets naturellement perturbés, une grande partie des éclaboussures prennent naissance à partir du film de liquide en amont du ressaut. Les travaux pionniers d'Errico (1986) et de Lienhard et al. (1992) ont montré que les éclaboussures sont pilotées par les perturbations surfaciques du jet. Les jets laminaires non perturbés n'éclaboussent pas, à moins qu'ils ne soient suffisamment longs pour développer des instabilités capillaires, contrairement aux jets turbulents, qui sont susceptibles d'éclabousser à l'impact à cause de leur rugosité de surface. Ces perturbations surfaciques présentes sur le jet se propagent, à l'impact, sous forme d'ondes concentriques sur le film de liquide. Ces ondes présentes sur le film s'affinent et se cassent en gouttelettes secondaires. Lienhard et al. (1992) ont pu montrer que la vitesse de départ des gouttelettes secondaires est très proche de la vitesse du jet à l'impact. De plus, le rayon initial des gouttelettes secondaires, r_s , est égal à 5,7 fois le diamètre du jet. Cette valeur est proche de la longueur d'onde λ responsable de la rupture du jet dans le régime de Rayleigh-Plateau (λ =4,51×d). Pour un jet de diamètre d = 2 mm et une vitesse v = 6 m/s, les gouttelettes secondaires quittent le film de liquide à la coordonnée radiale $r_s = 1,14$ cm à une vitesse légèrement inférieure à 6 m/s. Il n'existe pas dans la littérature des données précises sur la distribution en taille et en nombre des gouttelettes secondaires évaporables générées par l'impact du jet. Néanmoins, il existe des corrélations, déterminées par Lienhard et Bhunia (1994), permettant de déterminer la condition critique de début des éclaboussures et le pourcentage de liquide éclaboussé en fonction du nombre de Weber et de la hauteur de chute adimensionnée x/d. Toutefois, la gamme de validité de leur modèle est étroite en termes de tension de surface et de hauteur de chute.

2.2. Mécanismes de production d'aérosols en aval du ressaut hydraulique

La source principale de production d'aérosols dans la région en aval du ressaut hydraulique est l'éclatement des bulles d'air emprisonnées dans le ressaut. D'ailleurs, l'éclatement des bulles d'air est l'une des principales causes de la production d'aérosols marins. L'impact du déferlement d'une vague entraîne des bulles d'air qui finissent par remonter à la surface avant de se transformer en gouttelettes de film et de jet. En fonction de leur taille, de la température et de l'humidité de l'atmosphère, les gouttelettes s'évaporent et deviennent des aérosols marins (Johansson et al. 2019).

Les différents types de ressaut ont été documentés par Craik et al. (1981). La Figure 2 (Gauche) illustre les différentes transitions d'un ressaut circulaire lorsque la profondeur extérieure du ressaut (H) augmente. Les ressauts sont classés en types I, Ila et Ilb, par Bush et al. (2003). L'augmentation de la hauteur du film en aval du ressaut donne naissance au ressaut de type I. Ce type de ressaut, appelé ressaut à un seul rouleau, est marqué par une zone de recirculation provoquée par l'augmentation de la pression hydrostatique le long de la surface du ressaut. Il en résulte un vortex qui tourne vers l'arrière de la surface libre. Au fur et à mesure que la hauteur en aval augmente, la pression hydrostatique continue d'augmenter jusqu'à atteindre une nouvelle transition très abrupte dans la profondeur du liquide. Cette forte augmentation de pression crée une paire de tourbillons séparés entre la surface d'impact et la surface libre du ressaut (type IIa). Ce type de ressaut est nommé ressaut à double rouleau. Si la hauteur diminue, le ressaut à double rouleau redevient ressaut à simple rouleau. Dans le cas où la profondeur continue d'augmenter (ressaut de type IIb), le double rouleau devient très instable. La turbulence présente sur la surface libre du liquide crée des ondulations provoquant l'emprisonnement de bulles d'air dans le ressaut. Ce cas de figure est similaire au cas des ressauts hydrauliques à canal ouvert, appelé ressaut hydraulique plan (Figure 2 Droite). Dans ce type de ressaut plan, l'entraînement se produit lorsque la contrainte de cisaillement turbulente (contrainte de Reynolds) est supérieure à la force capillaire par unité de surface. Une fois entraînées, les bulles d'air sont advectées dans une couche de cisaillement turbulente. Dans les régions de forte turbulence, les bulles d'air sont brisées en petites bulles. Par flottabilité, elles finissent par remonter à la surface du ressaut hydraulique. Ces bulles d'air entraînées participent en partie à la production de spray de gouttes dans la région au-dessus du ressaut hydraulique.

En revanche, à notre connaissance, ce phénomène de production de gouttelettes secondaires présent dans le cas des ressauts hydrauliques plans (Chanson, H., 2006), n'a pas été investigué dans le cas du ressaut hydraulique circulaire. Il est à noter que les différentes catégories de ressaut sont certainement à l'origine d'émission de microgouttelettes très différentes en aval du ressaut hydraulique, ce qui peut être un enjeu pour aborder la problématique d'aéro-contamination dans une situation de fuite d'un jet de liquide contaminé sur une surface.



Figure 2 Gauche : classification des différents ressauts hydrauliques circulaires : (1) Type I, (2) Type IIa, (3) Type IIb (Bush et al. (2006)). Droite : schéma descriptif d'un ressaut hydraulique plan (Chanson, H., 2006).

Lors de l'impact du jet sur une surface solide, une grande quantité de gouttelettes secondaires est générée en amont du ressaut hydraulique par fragmentation du film de liquide et une quantité non négligeable est produite en aval du ressaut hydraulique par éclatement de bulles. En fonction de la température, de l'humidité et de la taille des gouttelettes secondaires, des résidus secs d'évaporation nocifs sont susceptibles d'être mis en suspension dans l'atmosphère.

3. STRATEGIE EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental, nommé DICAPRIO (Dispositif de Caractérisation des Particules Remises en suspension par Impact de liquide et d'Observation), schématisé sur la Figure 3, a été conçu à partir d'une similitude dynamique basée sur les nombres adimensionnels du problème, afin d'avoir une enceinte à échelle réduite permettant d'étudier des phénomènes pouvant se dérouler à échelle réelle. L'acquisition des données lors de l'impact du jet se fera en deux parties :

- un montage expérimental basé sur une méthode ombroscopique, consistant à utiliser une caméra rapide (5000 images par seconde et une résolution spatiale de 25 μm / pixel), pour étudier l'état du jet, le seuil d'éclaboussures et le phénomène d'impact en termes d'instabilité et de bullage ;
- 2. un montage expérimental, basé sur une quantification par aspiration des aérosols en termes de concentration et de distribution granulométrique. Les instruments utilisés seront de type compteur optique (APS, WELAS pour les particules entre 0,2 à 40 μm) et de type impacteurs en cascade (ELPI et Impacteur Andersen Mark II pour les particules entre 0,03 et 10 μm). Un Compteur à Noyau de Condensation (CNC) sera utilisé pour avoir la concentration des particules de diamètres inférieurs à 1 μm.



Figure 3 Schéma du dispositif expérimental DICAPRIO

4. CONCLUSION

Au vu des lacunes actuelles de la littérature sur la caractérisation des aérosols générés suite à l'impact d'un jet de liquide sur une surface solide, ce travail devra permettre de mieux identifier les mécanismes responsables de la production de ces aérosols et de pallier les manques de connaissances sur le sujet, plus particulièrement sur le phénomène de bullage. De plus, des simulations numériques seront réalisées en parallèle au laboratoire d'hydrodynamique de l'Ecole polytechnique (LadHyX) dans le but de mieux comprendre ce phénomène d'emprisonnement de bulles d'air dans le ressaut hydraulique. Les simulations numériques se feront avec le code basilisk qui permet de résoudre les équations de Navier-Stokes en formulation à deux fluides, avec la prise en compte précise de la tension de surface et de l'évolution de l'interface.

Bhagat, R. K., Jha, N. K., Linden, P. F., & Wilson, D. I. (2018). On the origin of the circular hydraulic jump in a thin liquid film. Journal of Fluid Mechanics, 851.

Bhunia, S. K., & Lienhard, J. H. (1994). Splattering during turbulent liquid jet impingement on solid targets.

Bush, J. W., & Aristoff, J. M. (2003). The influence of surface tension on the circular hydraulic jump. Journal of Fluid Mechanics, 489, 229.

Bohr, T., Dimon, P., & Putkaradze, V. (1993). Shallow-water approach to the circular hydraulic jump. Journal of Fluid Mechanics, 254, 635-648.

Brechet, Y., & Neda, Z. (1999). On the circular hydraulic jump. American Journal of Physics, 67(8), 723-73.

Bush, J. W., Aristoff, J. M., & Hosoi, A. E. (2006). An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump. Journal of Fluid Mechanics, 558, 33. Chanson, H. (2006). Bubble entrainment, spray and splashing at hydraulic jumps. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 7(8), 1396-1405.

Chanson, H. (2006). Bubble entrainment, spray and splashing at hydraulic jumps. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 7(8), 1396-1405.

Craik, A. D. D., Latham, R. C., Fawkes, M. J., & Gribbon, P. W. F. (1981). The circular hydraulic jump. Journal of Fluid Mechanics, 112, 347-362.

Errico, M., (1986). A Study of the Interaction of Liquid Jets with Solid Surfaces, Preventing School Failure 51 (3), 49-51

Kasimov, A. R. (2008). A stationary circular hydraulic jump, the limits of its existence and its gas dynamic analogue. Journal of Fluid Mechanics, 601, 189.

Johansson, J. H., Salter, M. E., Navarro, J. A., Leck, C., Nilsson, E. D., & Cousins, I. T. (2019). Global transport of perfluoroalkyl acids via sea spray aerosol. Environmental Science: Processes & Impacts, 21(4), 635-649.

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

Liu, X., & Lienhard, J. H. (1993). The hydraulic jump in circular jet impingement and in other thin liquid films. Experiments in Fluids, 15(2), 108-116.

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.

Watson, E. J. (1964). The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane. Journal of Fluid Mechanics, 20(3), 481-49