

Mesure de taille et de vitesse de gouttes par ombroscopie : Application au refroidissement par spray

Guillaume CASTANET¹, Pierre DUNAND, Ophélie CABALLINA, Fabrice LEMOINE

LEMTA – Université de Lorraine, CNRS, 54504 Vandœuvre-lès-Nancy cedex

1 Introduction

L'étude d'écoulements diphasiques, particulièrement dans le cas de gouttes impactant des parois, nécessite des techniques d'investigation permettant la caractérisation de gouttes. Les grandeurs recherchées sont généralement leurs distributions de taille et de vitesse, les corrélations taille/vitesse ainsi que la concentration volumique des gouttes. Néanmoins, il existe peu de techniques optiques et non intrusives permettant de mesurer simultanément la taille et la vitesse de particules. L'Anémométrie Phase Doppler (PDA) est parmi elles la plus répandue. Elle présente l'avantage d'un taux d'acquisition très élevé et ne nécessite aucune calibration. Cependant, elle perd de sa fiabilité en présence de gouttelettes non-sphériques [1]. Une autre limitation concerne la mesure de la concentration locale en nombre et en volume des gouttelettes et la mesure de flux. La mesure de ces quantités peut s'avérer délicate en raison de la dépendance du volume de mesure à la taille des gouttes. De plus, il est souvent nécessaire de faire des hypothèses sur les gouttes rejetées.

L'analyse d'images des gouttelettes (PDIA : Particle/Droplet Image Analysis) est une alternative à la mesure PDA. Cette approche connaît un regain d'intérêt avec l'amélioration de la résolution et de la sensibilité des systèmes d'imagerie. L'imagerie par ombroscopie (ou rétro-éclairage) est souvent préférée à l'éclairage direct pour la détermination des contours d'objets de formes irrégulières. Elle est de plus facile à mettre en œuvre en termes d'alignement optique et est peu sensible aux propriétés optiques des particules étudiés [2]. De plus, il est admis que ces techniques d'analyse d'images ont une précision comparable à celle du PDA [3]-[4]. Néanmoins, les approches de type PDIA ont une précision des mesures de taille qui dépend de la distance entre la particule et le plan focal, du fait de la difficulté à délimiter le contour d'un objet flou.

Dans de nombreuses études, un critère sur la profondeur de champ (DOF) est utilisé afin d'éliminer les particules qui sont trop floues. Néanmoins, le choix de ce critère reste subjectif et différentes approches sont possibles. Certains auteurs s'appuient sur une valeur du contraste (différence de niveau de gris entre le centre de la particule et le bruit de fond de l'image) [5]-[7]. D'autres auteurs fixent un seuil sur le gradient du niveau de gris au niveau du contour des particules [2],[8]. Bien que l'utilisation d'un critère DOF pour l'élimination des gouttes floues soit souvent inévitable, il introduit des biais qui doivent être éliminés pour une bonne précision, notamment celui causé par la dépendance du critère DOF à la taille de la particule. En effet, lorsqu'une particule devient très petite, le critère DOF décroît drastiquement [9] entraînant un rejet ou une mauvaise détection plus fréquents pour les petites gouttes. La distribution de taille se trouve alors biaisée en faveur des particules de plus grande taille. Ce problème devient majeur lorsque la détection des particules s'appuie sur un seuil unique de niveau de gris, puisqu'il est alors difficile de trouver une valeur adéquate pour chaque gouttelette. Le nombre de gouttes détectées ainsi que leur taille sont alors dépendants du seuil choisi. Plusieurs auteurs ont par conséquent suggéré de baser le choix du seuil sur une valeur relative, le plus couramment le niveau de gris à mi-pente [5],[10]-[12]. Une toute autre méthode consiste à s'appuyer sur les gradients d'intensité en considérant que la variation du niveau de gris est la plus forte sur le contour des particules. Nishino et al. [13] ont ainsi obtenu les contours des particules en suivant les points de gradient maximum. Ces méthodes d'identification basées sur le gradient sont néanmoins moins fréquentes et leur sensibilité au critère DOF très peu renseignée.

¹ Correspondant : Guillaume.Castanet@univ-lorraine.fr

Le but du présent travail est de développer une technique d'analyse d'images afin d'obtenir simultanément les tailles et les vitesses des gouttes incidentes et réémises lors d'impacts sur une paroi chaude. Dans ce contexte, l'imagerie a été largement utilisée pour identifier les régimes d'impact (le rebond, l'éclatement, et le dépôt d'un film liquide) mais très rarement pour caractériser les gouttes en taille et en vitesse. Récemment, Richter et al. [14] et Müller et al. [15] ont appliqué l'ombroscopie à l'étude de l'éclatement d'une goutte, couplée à la vélocimétrie par image de particules (PIV). Cependant, les mesures en taille et en vitesse n'étaient pas corrélées. Dans notre étude, l'utilisation d'une caméra rapide permet la visualisation par ombroscopie de l'impact des gouttelettes et la haute fréquence temporelle d'acquisition des images rend possible le suivi des particules. Le traitement d'images comporte deux étapes : la détection des gouttes et le suivi de leur trajectoire. Dans cet article, l'accent est mis sur la détection des contours de gouttes ainsi que l'identification et la séparation de celles se superposant partiellement. Nous présentons ensuite l'algorithme de suivi des trajectoires. Ce dernier s'appuie sur les méthodes de *suivi multi-hypothèse*, techniques à privilégier dans le cas d'environnements denses [16]. Les performances de cette technique de mesure sont ensuite analysées. En guise d'illustration, les résultats obtenus lors de l'étude de l'impact d'une goutte sur une paroi chauffée à haute température seront présentés.

2 Dispositif expérimental

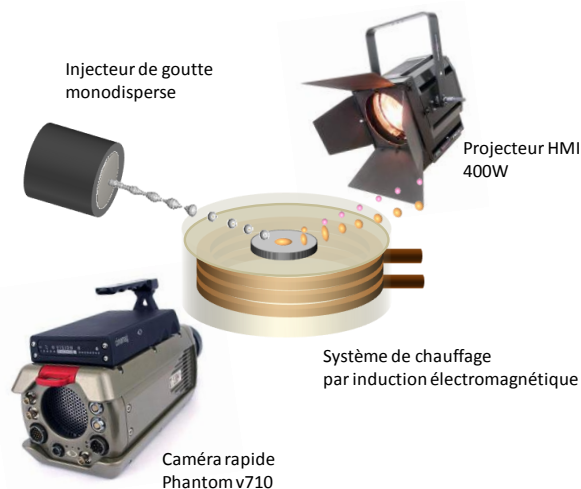


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

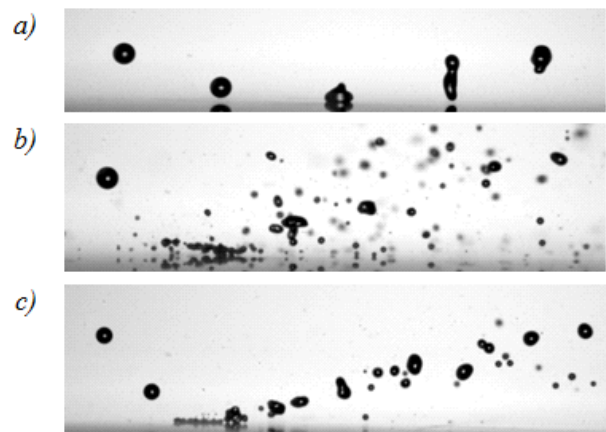


Figure 2 : Exemple de rebond et d'éclatement de gouttes d'eau

L'interaction entre des sprays liquides et des parois chauffées se rencontre dans de nombreuses applications industrielles. Par exemple, le refroidissement par spray est largement utilisé dans l'industrie métallurgique pour sa haute efficacité, sa faible consommation en eau et la bonne homogénéité spatiale du transfert de chaleur sur les bandes d'acier. Dans ces domaines d'application, les parois sont chauffées au-dessus de la température de Leidenfrost où un film vapeur se crée immédiatement entre le liquide et la paroi. Dans ces conditions, plusieurs régimes d'impact sont alors observés : le rebond et l'éclatement. Le dispositif expérimental présenté sur la figure 1 permet d'étudier l'impact de gouttes dans ces régimes. Il a été préalablement utilisé pour la caractérisation du transfert de chaleur dans ces situations [17]. Un train de gouttes monodisperses et régulièrement espacées est généré grâce un injecteur piézoélectrique. Les diamètres obtenus vont de 80 μm à 250 μm alors que la vitesse est fixée à quelques m/s. Les gouttes viennent impacter une fine pastille de nickel chauffée par induction au-delà de la température de Leidenfrost. Le générateur de gouttes peut pivoter afin de modifier la vitesse normale incidente des gouttes et ainsi le régime d'impact. La partie supérieure de la plaque de Nickel est polie afin d'obtenir une surface lisse à l'impact. Une caméra rapide (Phantom v710, Vision Research) permet l'observation de l'impact des gouttes. Sa fréquence d'acquisition maximale est de 7 500 im/s en pleine résolution (1 280 x 800 pixels). L'utilisation d'un zoom optique (OPTEM zoom 125C dans sa

configuration minimale) permet un agrandissement de 2,1 à 26 alors que la taille des pixels du capteur est de 20 μm . Etant donné la faible ouverture du zoom, une source de lumière très puissante (un projecteur HMI de 400 W muni d'un réflecteur parabolique) est nécessaire pour obtenir un contraste suffisant des images par ombroscopie, même sur des temps d'exposition très courts, ici 1 μs . Le flou de bougé dû au déplacement des particules pendant l'ouverture reste très faible (un pixel dans le pire des cas pour les gouttes primaires). Afin de réaliser le suivi des trajectoires de gouttes, les visualisations sont résolues dans le temps en travaillant à des taux d'acquisition de l'ordre de 80 000 im/s avec une résolution spatiale réduite. Cette valeur reste élevée comparée à la fréquence d'injection des gouttes qui est de l'ordre de 10 000 Hz. La figure 2 présente des images types de cas de rebond et d'éclatement obtenues avec cette configuration.

3 Technique d'identification de gouttelettes et mesure de tailles

Toutes les analyses d'images ont été réalisées sur PC grâce à l'utilisation de Matlab et de sa boîte à outil « Image processing ».

Conditionnement des images - Les images sont dans un premier temps normalisées. Cette étape a pour but d'obtenir un fond uniforme étant donné que la source de lumière est le plus souvent inhomogène. Cette normalisation consiste à diviser les images par une image du bruit de fond [3]. Après la normalisation de l'image, les gouttes se détachent plus facilement qu'avant du

fond. Les images sont aussi corrigées de la distorsion en barillet. Pour cela, une grille de points régulièrement espacés est utilisée. Une transformation spatiale est calculée à partir de la position des centres des points de la grille.

Détection des contours de gouttes - La détection des plus petites gouttes est de première importance étant donné leur grand nombre dans les situations qui nous intéressent. Or, les méthodes d'identification basées sur un seuil fixe du niveau de gris ou du gradient de niveaux de gris ne sont pas très adaptées à cette situation. Il est en effet difficile de trouver une valeur du seuil adaptée autant à des petites gouttes qu'à des grosses gouttes. Cette difficulté est renforcée par la présence de gouttes floues qui peuvent modifier localement le fond autour de gouttes nettes rendant inadapté l'usage d'un seuil unique pour extraire ces gouttes. Dans cette étude, nous avons choisi comme indicateur des contours des gouttes les lieux de plus forte pente. La détection des particules consistent en une recherche du zéro du laplacien L de l'image et des zones de valeur négative (correspondant à l'intérieur des particules). Pour réduire le bruit de l'image normalisée, un filtre gaussien est appliqué avant le calcul du laplacien. Ce filtrage doit rester modéré pour limiter le grossissement artificiel des gouttelettes et éviter la disparition des plus petites d'entre elles. Malgré ce filtre, le laplacien L demeure bruité pouvant conduire à la détection d'objets erronés. Nous procédons donc à un double seuillage par hystérésis. Les particules retenues sont définies comme les régions telles que $L < 0$ et où au moins un des pixels vérifie $L < L_1 < 0$. Le seuil L_1 est choisi comme légèrement supérieur à la valeur du bruit résiduel sur L . Lorsqu'on augmente la valeur de ce seuil L_1 , les premiers objets non-détectés correspondent aux grosses particules floues. L_1 est donc relié à la netteté des objets et si l'on applique un seuil L_1 plus faible, il y a un peu plus de particules floues détectées. Les contours fermés correspondant à $L=0$ sont vus comme le bord des particules. Une résolution sub-pixel du contour est obtenue par interpolation. La méthode de détection est adaptée aussi bien à l'identification de grosses gouttes qu'à celle de petites gouttes dont la taille est inférieure à 2 pixels qui ont un contraste très différents. Cependant, son implémentation passe par un compromis pour le choix de L_1 et celui de la taille du masque du filtre gaussien.

Séparation de gouttes se chevauchant – La recherche de la ligne de plus forte pente permet de séparer la plupart des gouttes lorsqu'elles se recouvrent partiellement. Si une procédure de séparation est mise en œuvre, c'est avant tout afin de n'oublier aucune goutte. Des gouttes non-détectées et donc manquantes sur plusieurs images rendent à l'évidence plus difficile le suivi de leur trajectoire. Deux méthodes de séparation sont mises en œuvre. Dans la première méthode, l'image est vue comme un relief où les gouttes représenteraient des montagnes. La fonction watershed de matlab permet de trouver toutes les vallées. Une séparation est effective si la vallée est encaissée. La seconde méthode consiste à analyser la courbure des contours et à identifier les zones de rétrécissement du contour. Si le rétrécissement est important, l'objet est découpé.

Calcul des paramètres de la goutte – Le calcul du diamètre d de la goutte est basé sur l'aire S_d de son contour. En supposant la goutte circulaire, d est donné par $\sqrt{4S_d/\pi}$. Le barycentre de chaque particule est calculé à partir de l'ensemble des points contenus dans l'aire S_d . Celui-ci est considéré comme étant aussi le centre de masse de la goutte, et donc il sera utilisé pour le suivi de la trajectoire. La profondeur de champ (DOF) peut engendrer des biais de mesure sur la taille des gouttelettes. Ainsi, à chaque objet détecté, le programme y associe la valeur moyenne du gradient sur son contour noté G , ainsi que l'intensité maximale I_{max} en son centre. Ces paramètres G et I_{max} sont intéressants car ils sont des indicateurs de la profondeur de champ, c'est-à-dire de la netteté de l'objet [2],[7],[12].

4 Suivi de la trajectoire des gouttes

4.1 Algorithme de suivi

Le suivi de particules (Particle Tracking Velocimetry PTV) a été préféré à la méthode PIV car les gouttes peuvent avoir des déplacements très différents dans une fenêtre d'interrogation classique d'un algorithme de PIV, notamment dans la zone de fragmentation à l'impact avec la paroi. De plus, la PIV donne lieu à une description eulérienne du champ de vitesse des particules. Or, le suivi lagrangien des gouttes, permis par le suivi de particules, est généralement plus adapté pour la modélisation des phénomènes d'impact. Ensuite, la connaissance de la vitesse des gouttes permet de corriger le poids statistique des gouttes les plus lentes dans la distribution de taille (les gouttes les plus lentes apparaissent sur un nombre plus important d'images et sont donc comptées plus de fois si aucune correction n'est réalisée). L'algorithme de PTV est inspiré de la méthode de *suivi multi-hypothèse* (Multi-Hypothesis Tracking ou MHT) proposée par Reid [18] pour le suivi de cibles multiples dans des environnements encombrés, un contexte relativement proche du nôtre (bien que les applications soient très différentes) et récemment perfectionnée par Chenouard et al. [16]. Le principe du suivi est de considérer l'ensemble des associations possibles entre les objets détectés. En d'autres termes, il est pris en compte la totalité des associations possibles entre les objets détectés à l'image i et ceux détectés à l'image $i+1$, et ainsi de suite. Ces associations peuvent se représenter sous la forme d'un arbre. A chaque nouvelle image, de nouvelles branches apparaissent. Seulement quelques branches correspondent à de vraies trajectoires de particules. Un nombre bien plus grand de branches n'ont en fait aucune réalité et sont purement hypothétiques. L'application de règles de sélection est donc nécessaire afin d'éliminer les associations improbables de façon à faire émerger (sans ambiguïté) les seules associations qui correspondent à des trajectoires. L'algorithme se divise entre plusieurs étapes : l'initialisation des branches, leur prolongement et leur terminaison, puis l'épuration et la sélection des branches les plus probables assimilées aux trajectoires (régularité des trajectoires, nombre suffisant d'éléments par branche).

4.2 Classification des gouttelettes

Les gouttes sont classées par catégories suivant le signe de leur vitesse normale. Les trajectoires possédant une vitesse dirigée vers le haut permettent d'identifier les gouttes secondaires. Une approche basée sur l'heuristique permet de distinguer les gouttes primaires des gouttes tertiaires, dont la vitesse est également dirigée vers le bas. Les gouttes tertiaires correspondent à des gouttes secondaires qui retombent à nouveau vers la paroi. L'intérêt de cette classification est illustré sur la figure 9, où la distribution de taille par catégorie est représentée. Dans le cas d'un rebond, cette classification permet d'associer une goutte primaire à toutes les gouttes secondaires qu'elles génèrent à l'impact. Dans le cas d'un éclatement, les gouttelettes en contact avec la paroi sont exclues du suivi et aucun lien ne peut être fait entre les gouttes incidentes et secondaires.

5 Précision sur la mesure de taille et effet de la profondeur de champ

Une mire de calibration possédant des disques de différentes tailles connues est utilisée pour évaluer la précision sur la mesure de taille et quantifier l'effet de la profondeur de champ (figure 3). La figure 4 présente les erreurs de mesure en fonction du diamètre des disques sur la mire lorsqu'elle est située dans le plan focal de la caméra. Quel que soit le niveau du fond, une erreur

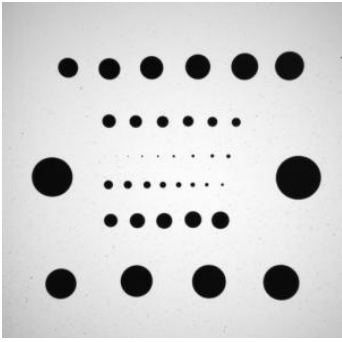


Figure 3 : Mire de calibration dotée de disques de 4 à 500 μm

systematique de 4 μm (moins de $\frac{1}{2}$ pixel) est commise pour les tailles de plus de 40 μm . L'interpolation subpixel étant moins précise pour les petits objets, la surestimation sur leur taille est plus importante. Par la suite, cette erreur systematique est corrigée grâce à la courbe de tendance présentée sur la figure 4. La mire est ensuite déplacée suivant l'axe de la caméra. Comme attendu, le DOF augmente avec la taille de l'objet (figure 5). Le DOF est défini comme la distance jusqu'à laquelle la goutte reste détectable et analysable. Par exemple, un disque de 10 μm (plus petite taille détectable en pratique) reste visible sur une épaisseur d'environ 0,7 mm. L'épaisseur du volume de mesure augmente rapidement avec la taille du disque, jusqu'à 2 mm pour des disques d'environ 20 μm . Un volume de mesure épais de 2 mm semble suffisant pour visualiser la plupart des gouttelettes dans nos expériences.

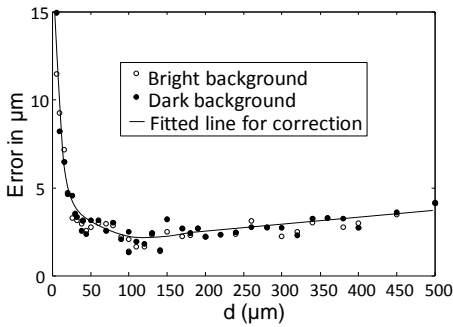


Figure 4 : Erreur de mesure de taille en fonction du diamètre des disques

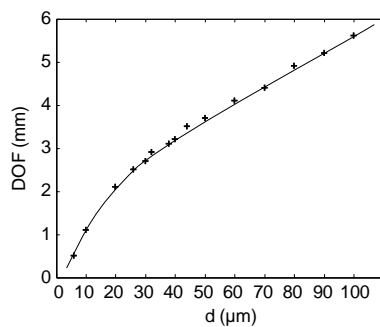


Figure 5 : Profondeur de champ en fonction de la taille réelle des disques

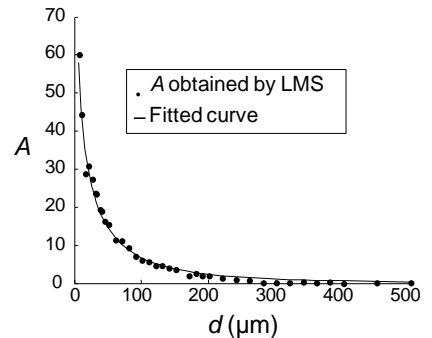


Figure 6 : Evolution de A de l'équation (1) en fonction de la taille réelle des disques

Sur la figure 7, on peut noter que l'erreur de mesure sur la taille Err_d (différence entre la taille mesurée et la taille réelle des disques) reste modérée dans un intervalle $z = \pm 0.5$ mm. Cette région contient en pratique la majorité des gouttes générées lors de l'expérience. Bien évidemment, la taille des gouttes floues est surestimée et la taille apparente augmente avec la profondeur z . Malgré une légère dissymétrie entre l'avant-plan et l'arrière-plan ($z > 0$ ou $z < 0$), l'erreur en taille peut s'exprimer suivant un polynôme de degré 2 :

$$Err_d = A(d)z^2, \tag{1}$$

où A est un paramètre dépendant du diamètre réel des disques de la mire. La valeur de A est estimée par la méthode des moindres carrés et son évolution en fonction de d est présentée en figure 6.

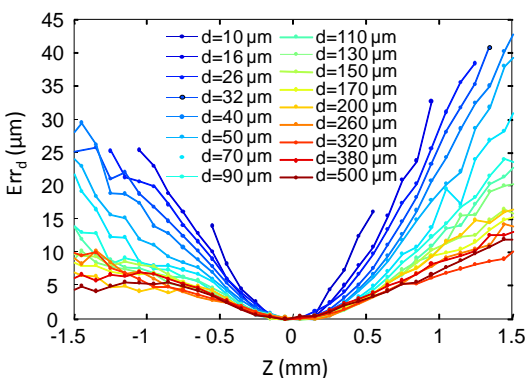


Figure 7 : Erreurs de mesure de taille en fonction de la distance z par rapport au plan focal

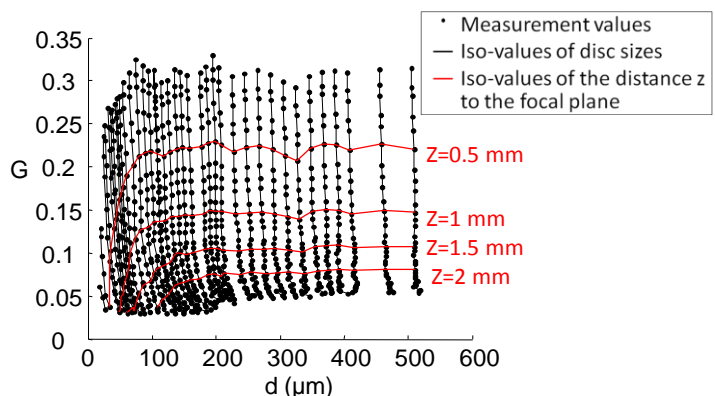


Figure 8 : Valeurs du gradient G sur le contour des disques en fonction de leur taille à différentes distances z du plan focal (d est le diamètre mesuré).

La figure 8 illustre comment le gradient maximum (G) dépend de la distance au plan focal z . Pour une valeur donnée de z , G augmente avec la taille du disque pour atteindre un plateau. Bien évidemment, cette valeur asymptotique de G décroît avec z . Ce comportement a déjà été souligné par plusieurs auteurs [12],[19].

6 Résultats et discussions

La méthode de mesure a été utilisée pour l'étude des cas de rebond et d'éclatement présentés sur la figure 2. Nous ne présenterons ici que le cas d'un éclatement pour illustrer la robustesse de la méthode proposée.

En effet, l'analyse des images se révèle plus délicate dans le cas d'un éclatement de gouttelettes car les biais de mesure doivent être identifiés et corrigés. Ce point est moins primordial dans le cas d'un rebond avec ou sans création de satellites, car la majorité des gouttelettes demeurent dans le plan de focalisation. Afin d'estimer les performances du suivi de particules, le taux de rejet (pourcentage d'objets détectés mais non inclus dans une trajectoire) est calculé au moment du suivi. Ce taux est de 19,9 % dans l'exemple de la figure 2.b, en comparaison il est presque nul dans le cas du rebond de la figure 2.a et de 10% pour l'éclatement modéré de la figure 2.c. La distribution de taille est présentée sur la figure 9 où la discrimination des gouttelettes par classes y est illustrée. On peut noter que la distribution de taille varie peu en y en excluant les gouttes qui n'ont pas été intégrées dans une trajectoire lors du suivi. Cette variation est plus sensible sur les plus petites gouttelettes pour lesquelles le taux de rejet est légèrement plus important. Les débits volumiques des gouttelettes primaires et secondaires ont également été calculés pour comparaison. Pour son évaluation, le volume transporté par l'ensemble des trajectoires (chaque suivi n'est compté qu'une seule fois) est divisé par la période d'acquisition des images. En procédant ainsi, le volume des gouttes secondaires obtenu est égal à deux fois celui des gouttes primaires. Par contre, si le débit volumique est calculé en s'appuyant uniquement sur les trajectoires traversant une frontière proche de la région d'impact, les deux débits volumiques sont alors très proches. Celui représenté par les gouttes secondaires est en fait inférieur de 10 % à celui des gouttes incidentes. Ces erreurs sont principalement liées aux gouttelettes masquées ou celles se superposant qui ne sont pas séparées.

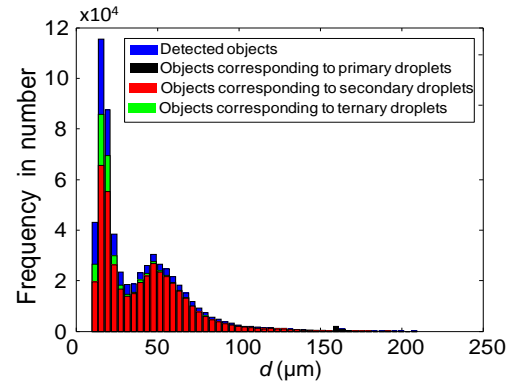


Figure 9 : Distribution en taille des objets détectés en fonction de leurs catégories

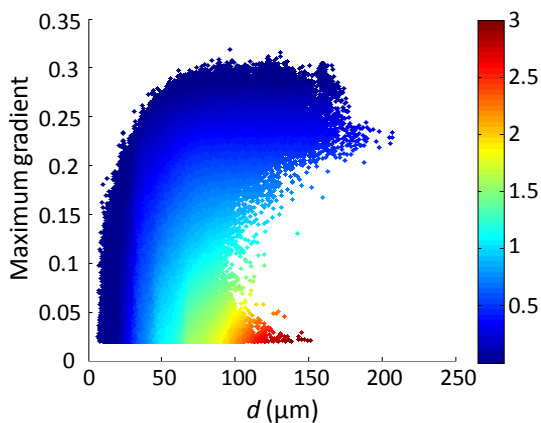


Figure 10 : Gradient maximum en fonction du diamètre des gouttes dans le cas de l'éclatement de la figure 2.b (l'échelle de couleur traduit la distance z au plan focal)

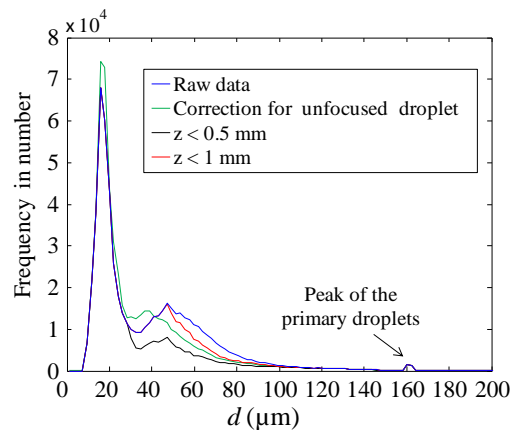


Figure 11 : Influence de la profondeur de champ DOF sur la distribution en taille dans le cas de l'éclatement de la figure 2.b

Le DOF est également une source possible d'erreur. Sur la figure 10, le gradient maximal, détecté sur les contours des objets, est représenté en fonction de leur taille mesurée. La distance z de chacun de ces objets au plan focal est déterminée par interpolation en s'appuyant sur les données issues de la mire de calibration (figure 8). L'échelle de couleur de la figure 10 correspond ainsi aux valeurs obtenues pour cette distance z . Il y apparaît qu'éclairément que 75% des objets détectés se trouvent à une distance comprise dans l'intervalle $0 < z < 0.5$ mm où l'erreur de mesure sur la taille liée au DOF reste faible (figure 7). Seuls 1.8% des objets détectés se trouve au-delà de $z=1.5$ mm. Afin de limiter les erreurs de taille liées à la profondeur de champ, une méthode simple consiste à rejeter les gouttes qui sont trop éloignées du plan focal. Le résultat de cette approche est présenté sur la figure 11 où la distribution de taille est affichée après avoir éliminé les objets se trouvant au-delà d'une distance de 0.5 mm ou 1 mm. On remarque que les fréquences des gouttes secondaires les plus grandes sont les plus affectées par ces suppressions d'objets. Cela est dû au fait qu'un objet flou apparaît toujours comme étant plus gros qu'il ne l'est réellement. Par exemple, une goutte de $35 \mu\text{m}$, qui peut être détectée jusqu'à une distance $z=1,5$ mm du plan focal (figure 5) aura à cette distance maximale une taille apparente de près de $80 \mu\text{m}$ (figure 7). Elle se retrouve alors dans la classe des gouttes de $80\mu\text{m}$. A l'inverse, les gouttes dont le diamètre apparent est faible ont nécessairement un diamètre réel faible et une faible distance au plan focal. Ces gouttes sont donc moins susceptibles d'être supprimées par un filtrage selon z . Réduire l'épaisseur du volume de mesure peut être une bonne approche pour obtenir une pdf de taille très précise, mais elle doit s'accompagner d'une exploration de l'écoulement par plans successifs selon z à la manière des techniques de tomographie. Sans cela, une partie des gouttes (celle s'écartant du plan focal) seront écartées, résultant en une perte d'information et donc un biais de mesure.

Une approche plus simple est de corriger la taille des gouttes floues. Nous nous sommes appuyés sur les valeurs estimées de z sur la figure 10 pour en déduire la surestimation de taille Err_d à partir de l'équation (1). Néanmoins, dans cette équation, la taille réelle de l'objet est nécessaire pour en déduire le paramètre A à partir de la figure 6. Nous avons donc mis en place une procédure itérative. A chaque itération, la valeur de d dans l'équation (1) est remplacée par la taille mesurée, corrigée de la valeur de Err_d obtenue à l'itération précédente. Trois ou quatre itérations sont alors nécessaires pour converger avec une précision de $0,1 \mu\text{m}$. La distribution de taille intégrant cette correction des objets flous est également reportée sur la figure 11. On note que le second pic des gouttes secondaires de grandes tailles, principalement affecté par le changement de volume de mesure, est maintenant décalé d'environ $10 \mu\text{m}$ vers des tailles plus faibles. Néanmoins cette correction n'intègre pas tous les effets de la DOF. En particulier, elle ne tient pas compte du fait que les gouttes les plus petites peuvent être présentes au-delà de leur DOF et ne sont ainsi pas vues sur l'imagerie. Néanmoins, ce cas semble peu probable car peu de gouttes secondaires de taille plus importante sont détectées au-delà de 2 mm (figure 10).

7 Conclusion

Cette étude met en évidence l'efficacité de l'imagerie rapide par ombroscopie pour déterminer la taille et la vitesse des gouttes secondaires produites par l'impact d'une goutte sur une paroi chauffée. Cette technique présente l'avantage de fournir un contraste marqué des images, idéal pour l'identification des contours de gouttes. Elle est de plus adaptée à la détection d'objets de forme irrégulière, ici des gouttes ayant subi une déformation. Dans le cas des expériences présentées, le caractère très polydisperse des gouttes rend inadéquat l'utilisation d'un seuil fixe sur le niveau de gris ou le gradient pour la détection des contours. Il est alors proposé en alternative de s'appuyer sur les lieux de plus forte pente pour localiser la frontière des objets. L'analyse d'images consiste donc en un pré-filtrage gaussien et en un seuillage sur le laplacien pour s'affranchir de la détection d'objets erronés liés au bruit. Deux approches complémentaires sont utilisées pour identifier et séparer les gouttes se superposant. L'une se base sur l'analyse de la forme du contour, l'autre s'assimile à une recherche des vallées et de cols.

L'utilisation d'une caméra rapide permet une résolution temporelle du phénomène, en plus d'une résolution spatiale compatible avec la granulométrie. La mise en place d'un algorithme de suivi permet ainsi d'accéder simultanément à la vitesse des gouttes. Basé sur un suivi multi-hypothèse, cet algorithme est particulièrement robuste. Couplé à la mesure de taille, le suivi offre des possibilités intéressantes. Par exemple, il permet la correction du biais de mesure sur la

distribution de taille vers les gouttes les plus lentes, lorsque la plage des vitesses de gouttes est très étendue. Il permet également de réduire l'erreur sur la mesure de taille due à la déformation des gouttes en moyennant la taille sur l'ensemble des objets d'une trajectoire. Enfin, le signe de la vitesse des gouttes permet une identification aisée des gouttes primaires et secondaires.

Une mire de calibration composée de disques de différentes tailles est utilisée pour évaluer la précision sur la mesure de taille et pour analyser l'effet de la profondeur de champ. La mire est ainsi translatée vers l'avant et l'arrière suivant l'axe de la caméra, permettant ainsi de suivre la variation du gradient sur les contours en fonction de cette distance au plan focal. Le maximum de gradient s'est ainsi révélé un indicateur pertinent pour déterminer la distance des gouttes au plan focal. Il peut ainsi être utilisé comme un moyen de contrôler l'épaisseur du volume de mesure en éliminant les gouttes se trouvant en dehors de cette épaisseur. Enfin, une correction de taille pour les gouttes floues est également rendue possible avec ce critère.

Références

- [1] N. Damaschke, G. Gouesbet, G. Gréhan, H. Mignon, C. Tropea, «Response of PDA systems to non-spherical droplets», *Applied Optics* – 37, 1752-1761, (1998)
- [2] A. Lecuona, P.A. Sosa, P.A. Rodriguez, R.I. Zequeira, «Volumetric Characterization of Dispersed Two-phase Flows by Digital Image Analysis», *Measurement Science and Technology* – 11, 1152-1161, (2000)
- [3] J. Blaisot, J. Yon, «Droplet size and morphology characterization for dense sprays by image processing: application to the Diesel spray», *Experiments in Fluids* – 39, 977-994, (2005)
- [4] J.T. Kashdan, J.S. Shrimpton, A. Whybrew, «Two-Phase Flow Characterization by Automated Digital Image Analysis. Part 1: Fundamental Principles and Calibration of the Technique», *Particle & Particle Systems Characterization* – 20, 387-397, (2003)
- [5] K.S. Kim, S.S. Kim, «Drop Sizing and Depth-of-Field Correction in TV Imaging», *Atomization and Sprays* – 4, 65-78, (1994)
- [6] D. Lebrun, C.E. Touil, C. Özkul, «Methods for the Deconvolution of Defocused-Image Pairs Recorded Separately on Two CCD Cameras: Application to Particle Sizing», *Applied Optics* – 35, 6375-6381, (1996)
- [7] H. Malot, J-B. Blaisot, «Droplet Size Distribution and Sphericity Measurements of Low-Density Sprays Through Image Analysis», *Particle & Particle Systems Characterization* – 17, 146-158, (2000)
- [8] E. Fantini, L. Tognotti, A. Tonazzini, «Drop size distribution in sprays by image processing», *Computers & Chemical Engineering* – 14, 1201-1211, (1990)
- [9] L.M. Oberdier, «An Instrumentation System to Automate the Analysis of Fuel-Spray Images using Computer Vision», *ASTM* – 848, 123-136, (1984)
- [10] K.J. Hay, Z.C. Liu, T.J. Hanratty, «A backlighting technique for particle size measurements in two-phase flows», *Experiments in Fluids* – 25, 226-232, (1998)
- [11] J.Y. Kim, J.H. Chu, S.Y. Lee, «Improvement of Pattern Recognition Algorithm for Drop Size Measurement», *Atomization and Sprays* – 9, 313-329, (1999)
- [12] K.U. Koh, J.Y. Kim, S.Y. Lee, «Determination of In-focus Criteria and Depth of Field in Image Processing of Spray Particles», *Atomization and Sprays* – 11, 317-333, (2001)
- [13] K. Nishino, H. Kato, K. Torii, «Stereo Imaging for Simultaneous Measurement of Size and Velocity of Particles in Dispersed Two-Phase Flow», *Measurement Science and Technology* – 11, 633-645, (2000)
- [14] B. Richter, K. Dullenkopf, H.J. Bauer, «Investigation of secondary droplet characteristics produced by an isoctane drop chain impact onto a heated piston surface», *Experiments in Fluids* – 39, 351-363, (2005)
- [15] A. Müller, K. Dullenkopf, H-J. Bauer, «Application of an Extended Particle Tracking Method to Analyze Droplet Wall Interaction», *14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, (2008)
- [16] N. Chenouard, I. Bloch, J-C. Olivo-Marin, «Multiple hypothesis tracking in cluttered condition», *International Conference on Image Processing*, (2009)
- [17] P. Dunand, G. Castanet, F. Lemoine, « A two-color planar LIF technique to map the temperature of droplets impinging onto a heated wall », *Experiments in Fluids* – 52, 843-856, (2012)
- [18] D.B. Reid, «An algorithm for tracking multiple targets», *IEEE Trans on Automatic Control* AC:843-854, (1979)
- [19] S. Lee, Y. Kim, «Sizing of spray particles using image processing technique», *Journal of Mechanical Science and Technology* – 18, 879-894, (2004)

Remerciement

Cette étude a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme de recherche IDHEAS (ANR-NT09 432160).