



IMAGERIE OMBROSCOPIQUE ULTRA-RAPIDE POUR L'ANALYSE DES PROCESSUS D'ATOMISATION APPLIQUÉE À L'INJECTION DIESEL

Kamel Lounnaci*, Saïd Idlahcen, Claude Rozé, Jean Bernard Blaisot

CORIA UMR 6614 - Normandie Université - CNRS - Université et INSA de Rouen

Campus Universitaire du Madrillet 76800 Saint Etienne du Rouvray, France

*Correspondant: kamel.lounnaci@coria.fr

Résumé : Afin de mesurer la vitesse d'un jet Diesel haute pression en champ proche, un système d'imagerie rapide est utilisé, basée sur une source laser femtoseconde double impulsion et une caméra double exposition. En utilisant une technique de corrélation d'images, la cartographie des vitesses de l'écoulement est alors calculée. Par ailleurs, après binarisation, les images sont segmentées, permettant d'obtenir le champ de vitesse des éléments dispersés d'une part, et la vitesse de la phase continue (cœur liquide) d'autre part.

1 Introduction

1.1 Contexte général

L'industrie automobile est confrontée à de nombreuses contraintes, économiques et écologiques. Le développement des moteurs automobiles doit répondre à une volonté de réduction de la consommation de carburant et à des normes de plus en plus restrictives en ce qui concerne l'émission de produits polluants. Afin d'atteindre cet objectif, la combustion doit être optimisée, en particulier par un contrôle très fin de l'atomisation et de la pénétration du carburant dans la chambre de combustion. En effet, la distribution de taille des gouttes, au même titre que la morphologie des structures constituant le spray, influence fortement le processus d'évaporation et le mélange du carburant avec l'air.

La forme et la distribution des structures liquides dans le spray sont les résultats d'un ensemble de processus complexes couplés (instabilité hydrodynamique, cavitation, conditions de pression variable à l'intérieur de l'injecteur, turbulence, etc.) [1]. Afin de prédire le spray final, des efforts importants sont faits pour développer une modélisation du phénomène et des codes de simulation numérique. La validation de ces codes demande des données expérimentales précises, en particulier dans la zone proche de l'injecteur, là où se développent les instabilités qui vont amener à l'atomisation du jet.

L'objectif de ce travail est de réaliser des mesures sur un jet Diesel issu d'un injecteur mono trou. Pour ce faire, une technique d'imagerie ombroscopique ultra-rapide a été utilisée pour enregistrer des images haute résolution en champ proche. Afin d'apporter une description complète de l'injection, outre la forme du jet liquide, il est essentiel que la caractérisation de la pulvérisation apporte des informations sur la vitesse instantanée des structures liquides. Ainsi, le suivi de la cinématique de la formation des gouttelettes révélant la création et la

croissance des petites instabilités qui pilotent le processus d'atomisation pourra être mis en évidence. Les mesures de vitesse des structures liquides dans un jet Diesel reste néanmoins très compliquées à effectuer. Les petites échelles caractérisant ce type d'écoulement, liées à l'extrême rapidité du phénomène, expliquent ces difficultés. De plus, en proche sortie d'injection, l'écoulement est facilement perturbable, ce qui exclut l'utilisation de méthodes de mesure intrusives. Bien qu'un certain nombre de techniques optiques soient couramment utilisées pour l'étude des mouvements de fluide de petites échelles et à haute vitesse, la plupart ne conviennent pas pour l'étude de l'injection Diesel qui produit un écoulement optiquement très dense. Cette inaptitude des techniques optiques classiques est due en grande partie aux nombreuses interactions entre la lumière et les différents éléments liquides constituant l'écoulement qui perturbent de façon importante le signal optique et brouille l'information utile.

La technique qui est présentée ici consiste à utiliser une source laser femtoseconde double impulsion et à enregistrer des paires d'images. La durée extrêmement courte des flashes laser permet de figer parfaitement le mouvement. Une analyse des paires d'images par corrélation permet d'extraire la vitesse des éléments liquides.

1.2 Etat de l'art des méthodes de mesure de vitesse

Les techniques locales, comme la Vélocimétrie Laser Doppler (VLD) et autres approches connexes [2], peuvent fournir des informations ponctuelles de vitesse d'un écoulement en phase d'atomisation. Néanmoins, l'utilisation de ces méthodes nécessite de tenir compte des erreurs liés aux effets de diffusion qui ne peuvent être négligées dans certaines applications, en particulier lorsque la longueur du milieu à traverser est importante. En pratique, on ne peut pas appliquer ces diagnostics dans des régions denses de l'écoulement. En effet, plusieurs particules peuvent être présentes dans le volume de mesure, ce qui invalide le signal enregistré. De plus, le principe

de la VDL nécessite que les gouttelettes soient sphériques, ce qui est loin d'être le cas dans les régions d'atomisation primaire (proche de l'injecteur) d'un jet à haute pression.

La Vélocimétrie Laser par Corrélation (VLC) est une technique locale de mesure de vitesse qui s'est révélée applicable à des écoulements à forte épaisseur optique [3]. Toutefois, l'interprétation de l'information VLC nécessite la prise en compte de différents paramètres (distance parcourue, temps de vol, taille de la fenêtre temporelle...) qui rend la mesure compliquée. Cette technique s'est révélée plutôt efficace sur des écoulements Diesel en proche sortie d'injection, mais sous certaines conditions d'injection [4]. La technique est également adaptée pour évaluer le rendement de pulvérisation, mais reste difficilement applicable pour une caractérisation complète de l'atomisation [5].

La Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) est la technique d'imagerie la plus utilisée pour la mesure de vitesse. Cette technique nécessite que la région d'intérêt soitensemencée avec des particules [6]. Une analyse par corrélation est utilisée pour extraire des informations de vitesse à partir de paires d'images enregistrant la lumière diffusée par les particules d'ensemencement. Cette technique a été utilisée avec succès pour mesurer la vitesse de l'écoulement gazeux autour du spray, mais est difficilement utilisable sur le jet lui-même.

Cependant, les méthodes de corrélation appliquées dans la PIV peuvent être adaptées pour calculer la vitesse à partir d'images d'écoulements nonensemencés et utilisent alors la diffusion de la lumière par les éléments liquides constituant le spray [7, 8]. Cette approche, généralement appelée Vélocimétrie par Corrélation d'Images (VCI), utilise des algorithmes d'appariement pour le calcul de la vitesse, soit par le marquage de l'écoulement avec des caractéristiques faciles à suivre [9], soit par la détection du mouvement des structures liquides constituant le jet [10], ou soit par prédiction de la morphologie et validation du champ scalaire [11]. Des résultats de haute qualité peuvent être obtenus avec les méthodes VCI. Il convient toutefois de valider les résultats de vitesse obtenus par la corrélation, car les erreurs d'appariement sont plus fréquentes que sur un écoulementensemencé [12]. C'est une technique similaire que nous avons utilisée en l'adaptant aux conditions difficiles d'un jet haute pression en proche sortie d'injecteur.

2 Montage expérimental

Les injecteurs Diesel modernes fonctionnent à haute pression (40 - 200 MPa) et le carburant est propulsé à travers des trous de faibles diamètres de sortie (~100 μm), ce qui implique des vitesses de structures liquides en sortie d'injection élevées (>300 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et des écoulements à petite échelle. De plus, en proche sortie d'injecteur, le spray qui en résulte est

optiquement très dense, ce qui complique la visualisation du phénomène. Pour ne rien arranger, la courte durée d'injection nécessite un système d'acquisition rapide.

Afin de réaliser des images haute résolution dans ces conditions difficiles, nous avons opté pour un système d'imagerie ombroscopique ultra-rapide [13, 14]. Le système utilise une source laser femtoseconde double impulsion (Figure 1). Celle-ci se compose de deux amplificateurs régénératifs Titane-Saphir (Coherent Libra, 1 kHz) et d'un oscillateur (Coherent Vitesse, 80 MHz). L'impulsion femtoseconde générée par l'oscillateur est étirée et séparée en deux faisceaux, qui sont amplifiés dans la cavité de chaque amplificateur. Après compression, les deux faisceaux sont combinés afin d'obtenir une paire d'impulsions. Le délai entre les deux impulsions peut être ajusté de 12.5 ns à 500 μs par pas de 12.5 ns, le pas d'ajustement correspondant à la période de l'oscillateur. La durée de chaque impulsion est de 120 fs, ce qui est largement suffisant pour figer l'écoulement durant la mesure. Le système laser a été soigneusement aligné afin que les caractéristiques des faisceaux soient similaires, en termes de durée, d'amplitude, d'alignement optique, de polarisation et de profil spatial. Le diamètre du faisceau est d'environ 10 mm, avec une faible divergence, une longueur d'onde de 800 nm et une énergie par impulsion de l'ordre de 3.7 mJ.

Le faisceau composé des deux impulsions est dirigé vers une chambre de confinement abritant l'injecteur afin d'éclairer le système de pulvérisation. La chambre est maintenue dans des conditions ambiantes. Un accès optique à travers de minces fenêtres en silice permet d'éviter la contamination des composants optiques par le carburant. La lumière transmise est recueillie par une camera CCD double exposition (LaVision imager pro X 4M, 2048 \times 2048 pixels) avec un temps inter-trame minimum de 110 ns, ce qui permet une utilisation pour visualiser des objets de vitesse élevée. Le système d'imagerie est équipé d'un microscope longue distance permettant un grossissement d'environ $\times 7$ des images du spray. La résolution spatiale des images résultantes est de 1040 pixels/mm et la résolution optique de l'ensemble du système est d'environ 5 μm .

Le fluide utilisé dans nos mesures est un liquide d'étalonnage (Shell NormaFluid, ISO 4113) avec des propriétés rigoureusement contrôlés, qui sont semblables au Diesel (voir le Tableau 1) en termes de viscosité, densité, tension de surface, etc. [15].

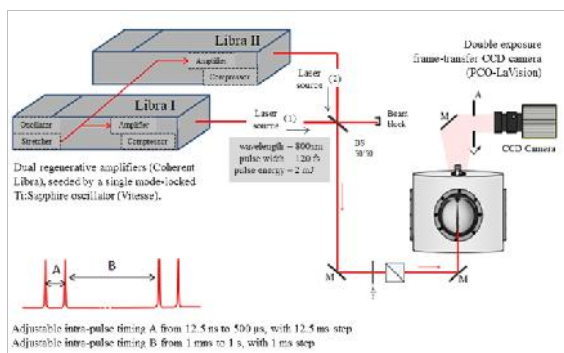


Figure 1 Dispositif expérimental double impulsion.

Densité	Viscosité	Tension surfacique
821 kg.m ⁻³	0.0032 kg.m ⁻¹ .s ⁻¹	0.02547 N.m ⁻¹

Tableau 1 Propriétés physique du NormaFluid ISO 4113.

Un système Common Rail alimenté par une pompe haute pression est utilisé pour gérer l'injection (Figure 2). La pression d'injection peut alors être réglée finement entre 30 et 120 MPa. Le début et la durée de chaque injection sont contrôlés en ajustant la levée de l'aiguille de l'injecteur. Ainsi, l'injection est commandée par un courant crête et un courant de maintien d'une durée chacun de 400 μs. La fréquence des injections est de 1 Hz. L'horloge de référence pour l'ensemble de l'expérience est donnée par l'oscillateur femtoseconde (80 MHz). Un échangeur placé sur le circuit de retour, permet de maintenir le carburant à une température constante.

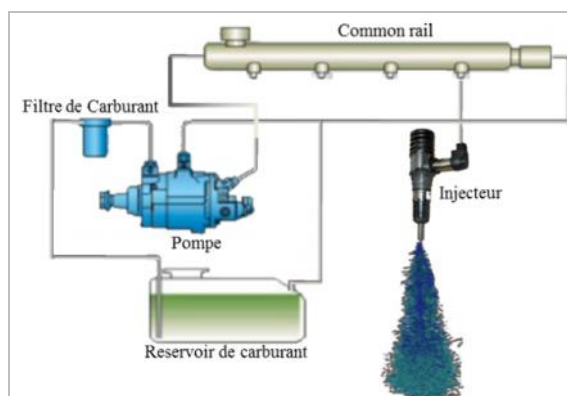


Figure 2 Système d'injection Common Rail.

Un injecteur mono-trou produisant un écoulement dissymétrique a été utilisé au cours de ce travail : il permet, pour exactement les mêmes paramètres d'injection, d'observer des comportements différents sur chaque côté du jet. Les caractéristiques de la buse d'injection sont présentées dans le Tableau 2.

Injecteur
D = 113 μm
C _d = 0.84
L/D = 5.66

Tableau 2 Caractéristiques de la buse d'injection, coefficient de décharge et rapport longueur/diamètre de buse.

3 Détermination du champ de vitesses

L'objectif du travail présenté ici est de générer le champ de vitesses des structures liquides au cours d'une injection Diesel haute pression. Les résultats présentés ici sont issus de l'injecteur illustré par la Figure 3 fonctionnant à une pression d'injection de 60 MPa dans les conditions atmosphériques ambiantes.

3.1 La normalisation

La première étape de l'analyse d'images est une normalisation. Elle permet de s'affranchir du bruit de fond dû aux conditions de prise de vue (intensité lumineuse inhomogène, poussières...). Cette étape nécessite d'enregistrer deux images particulières :

- L'image porteuse I_p , qui est obtenue en capturant le fond sans objet, éclairé par la source lumineuse. Une moyenne de plusieurs images est faite afin d'améliorer la normalisation.
- L'obscurité I_o , qui est obtenue en capturant le fond sans objet, mais sans source lumineuse. Cette image permettra d'éliminer les bruits lumineux d'autres sources polluantes de lumière.

Le calcul de l'image normalisée I_n est donné par l'équation suivante :

$$I_n(x, y) = \frac{I(x, y) - I_o(x, y)}{I_p(x, y) - I_o(x, y)} \quad (1)$$

où I correspond à l'image brute et x et y correspondent aux coordonnées de l'image.

L'opération de normalisation est illustrée sur la Figure 3.

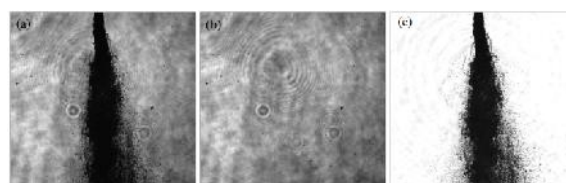


Figure 3 Illustration de la normalisation : (a) image brute I , (b) image porteuse I_p , (c) image normalisée I_n .

L'image ainsi obtenue sera beaucoup plus facile à analyser.

3.2 La corrélation d'images

Un code d'analyse d'images utilisant des routines de traitement d'images OpenCV [16] permet de calculer les vitesses à partir des paires d'images. Il consiste à définir une région dans la première image et à reconnaître les structures liquides la composant dans la seconde image.

Le délai entre deux impulsions femtoseconde, et donc entre deux prises de vue, est ajusté de façon à ce que le déplacement des structures liquides soit perceptible. Celui-ci ne doit pas être trop grand car les structures liquides seraient alors trop déformées d'une image à l'autre et ne pourront être reconnues. Compte tenu de l'extrême rapidité du phénomène, le temps inter-image doit également être suffisamment faible pour pouvoir capter les déplacements. La Figure 4 montre un exemple d'appariement obtenue par imagerie ombroscopique ultra-rapide avec un temps inter-image de 284 ns. Un zoom sur une toute petite partie de l'image permet de voir le déplacement des structures liquides.

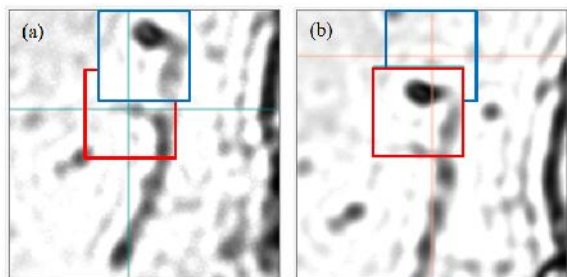


Figure 4 Paire de région d'images. Le délai entre (a) et (b) est de 284 ns.

La méthode d'appariement consiste à définir une région d'intérêt T (zone d'intérêt) sur la première image et une région d'intérêt S (zone de recherche) sur la seconde image, décalée de (u_x, u_y) . On calcule alors la fonction de corrélation croisée :

$$R(u_x, u_y) = \frac{1}{n-1} \sum_{x,y} \frac{[S(x+u_x, y+u_y) - \bar{S}] \cdot [T(x, y) - \bar{T}]}{\uparrow_S \uparrow_T} \quad (2)$$

où $S(x, y)$ correspond à la valeur du pixel localisé en (x, y) dans la zone de recherche sur la seconde image et $T(x, y)$ correspond à la valeur du pixel dans la zone d'intérêt de la première image. \bar{S} et \bar{T} sont respectivement le niveau moyen de la zone de recherche et de la zone d'intérêt, alors que \uparrow_S et \uparrow_T sont les écarts-types.

La fonction de corrélation croisée a la propriété de valoir +1 lorsque les deux champs (de recherche et modèle) sont identiques, de tendre vers -1 quand les deux champs sont inversés (niveaux de gris inversés) et de valoir 0 lorsque les deux zones sont sans aucune similitude. Pour mesurer le déplacement relatif entre deux images, l'algorithme recherche les

valeurs des déplacements (u_x, u_y) telles que $S(x+u_x, y+u_y)$ maximise $R(u_x, u_y)$. Les valeurs correspondantes sont retenues comme les meilleures estimations du déplacement de l'image S par rapport à l'image T lié au mouvement des structures liquides présentes dans la zone d'intérêt. Cette procédure est appliquée sur toute l'image, ce qui donne une carte de vecteurs de mouvement décrivant le déplacement de l'écoulement. Pour améliorer la précision de la procédure d'appariement et éliminer les erreurs systématiques de corrélation, des critères de validation sont imposés sur les résultats de corrélation. En autres, les facteurs de corrélation ayant des valeurs inférieures à un seuil approprié sont rejetés. La Figure 5 montre une image d'injection avec des vecteurs déplacements validés.

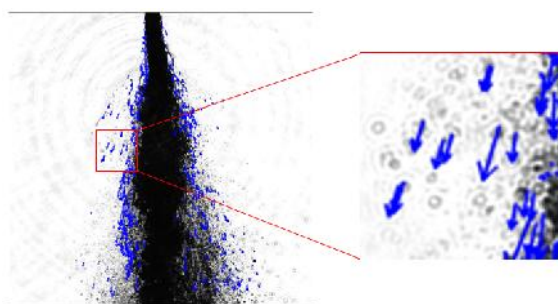


Figure 5 Image d'injection avec vecteurs déplacements estimés à partir de la corrélation d'image.

Compte tenu de l'extrême variabilité du phénomène d'atomisation à haute pression, il est difficile de tirer des conclusions générales à partir d'images individuelles. Une étude statistique est donc appropriée afin d'obtenir une cartographie donnant des valeurs de vitesses moyennes représentatives du déplacement des structures liquides. 200 paires d'images ont ainsi été enregistrées et les vecteurs vitesses correspondant à chaque paire sont calculés. L'image de 2048×2048 pixels est ensuite divisée en petites cellules carrées de 20×20 pixels. Pour chaque cellule, les vecteurs vitesses sont moyennés. Afin de s'assurer que la moyenne est statistiquement valable, les cellules contenant moins de 20 vecteurs vitesses sont rejetées. Finalement, cette procédure donne des profils statistiques de la vitesse des structures liquides. Un exemple de cartographie de champ de vitesse est représenté sur la Figure 6. Ici, la dissymétrie de l'injection, déjà visible sur la forme du jet (voir Figure 3) est également clairement apparente sur le champ de vitesse.

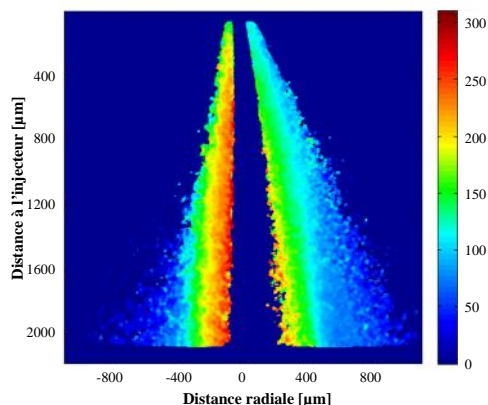


Figure 6 Cartographie du champ de vitesse en $m.s^{-1}$

4 Séparation de la phase dispersée et continue

Il est raisonnable d'émettre l'hypothèse que l'atomisation et la formation de gouttelettes sont liées à la complexité de l'interface liquide/gaz et à sa vitesse [17]. Ainsi, afin d'avoir une information de vitesses la plus détaillée possible, il convient de segmenter les images en deux classes, l'une contenant uniquement la phase dispersée et l'autre le coeur liquide en cours d'atomisation. Pour sélectionner les pixels de chaque classe, il est nécessaire de binariser les images. Toutefois, la conversion des données en images binaires implique inévitablement une perte d'informations. L'importance de cet effet est liée à la méthode de binarisation et à son aptitude à extraire la forme et les échelles des structures visibles dans l'image en niveaux de gris.

4.1 La binarisation

Une étude préliminaire comparant différents algorithmes de binarisation a été menée afin de trouver la méthode de binarisation optimale pour nos images de spray Diesel utilisées dans ce travail.

4.1.1 Etat de l'art

Dans la méthode dite de binarisation globale, un seuil unique est calculé à partir d'une mesure globale sur toute l'image. Il nous permet de décider l'appartenance d'un pixel à l'objet ou au fond.

Chacun de ces auteurs utilise une stratégie un peu différente dans ce but. Par exemple, la méthode décrite par Otsu [19] consiste à maximiser la variance entre deux classes, tandis que d'autres méthodes (Kapur et al [20], Pun [21], Li et Lee [22], Cheng et Chen [23]) se basent sur la théorie du maximum d'entropie, du minimum d'entropie ou d'entropie floue.

Dans la méthode de binarisation locale, la classification d'un pixel dépend non seulement du pixel en question, mais aussi des pixels voisins. Chez Cheng [24], c'est la moyenne des pixels du voisinage qui est prise en compte lorsqu'on construit l'histogramme. Sachant l'importance des informations du voisinage pour la classification, Wu et Amin [25] proposent une méthode de seuillage en deux étapes. Après l'étape de seuillage global sur l'image entière, le seuillage sur des sous-images qui contiennent des composants connectés est effectué. La méthode donne d'assez bons résultats pour le traitement d'image de documents.

La méthode de Trier et Taxt [26] et celle de Gadi et Benslimane [27] peuvent être considérées comme deux exemples de techniques de seuillage local adaptatif. Trier et Taxt, étiquètent l'image en trois niveaux : '+', '-', '0'. Le pixel étiqueté '0' sera classé dans la classe à laquelle la majorité de ses 8 pixels voisins appartiennent. Cette méthode nécessite différents paramètres ajustables et on peut obtenir des résultats satisfaisants en ajustant ces paramètres. Cependant, c'est la difficulté réside justement dans la manipulation de ces nombreux paramètres. Pour Gadi et Benslimane [27], la classification d'un pixel dépend de ses degrés d'appartenance calculés dans des régions locales qui sont créées par le découpage de l'image originale. En principe, cette méthode fournira un résultat intéressant sur l'image s'il n'y a pas de problème de sur-découpage.

Après de nombreuses années passées à rechercher la méthode optimale, il semble que le consensus soit que, finalement, le seuillage idéal n'existe pas. La méthode de binarisation à utiliser dépendra du type d'images à traiter. En effet, le problème de la segmentation est le plus souvent un problème mal posé : étant donnée une image, il existe toujours plusieurs binarisations possibles. Une bonne méthode de binarisation sera donc celle qui permettra d'arriver à la meilleure interprétation possible.

4.1.2 Application aux images d'injection Diesel

Comme les informations spatiales et les informations concernant le voisinage des points ne sont pas prises en considération, l'approche globale possède l'avantage d'être rapide en temps d'exécution, mais elle n'est appropriée qu'à des images simples. Pour des images plus complexes, les approches locales sont préférées, au prix d'une complexité algorithmique supérieure. Dans notre cas, sur les images d'injection, le temps d'exécution est primordial si on veut réaliser des statistiques sur un grand nombre d'images. Ainsi, seules les méthodes de binarisation globale ont été testées. Les résultats de la comparaison entre quelques algorithmes (Otsu [19]; Ridler et Calverd [28]; Kapur et al [20]; Li et Lee [22]; Cheng et Chen [23]; Kittler et Illingworth [29]) sont présentés sur la Figure 7.

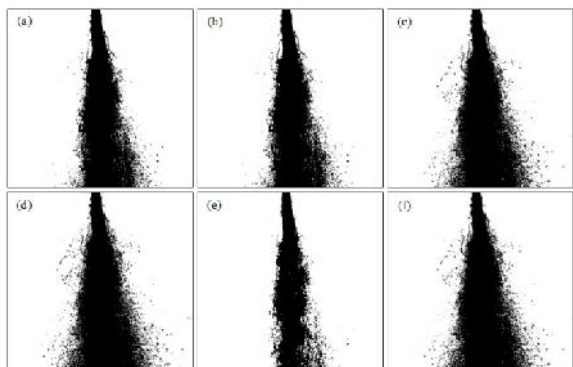


Figure 7 Exemples de méthodes de binarisation globale : (a) Otsu, (b) IsoData, (c) Kapur et al, (d) Cheng et Chen, (e) Li et Lee, (f) MinError.

Cette étude met en lumière le fait qu’aucune méthode de binarisation globale n’est adaptée pour traiter correctement nos images. En effet, la perte d’informations sur les caractéristiques morphologiques des structures liquides est jugée trop importante. De plus, la différence de niveaux de gris entre le noyau liquide et les éléments dispersés lié à un fond lumineux bruité ne permet pas de trouver un seul critère de seuillage afin de détecter l’ensemble des éléments liquides constituant l’écoulement. On remarque néanmoins que la méthode de Li et Lee (Figure 7e) détecte correctement la forme du jet qui est un élément bien contrasté dans l’image. La méthode de seuillage proposée par Li et Lee regroupe les niveaux de gris en deux classes basée sur la minimisation de l’entropie croisée. Néanmoins, lorsque les objets sont peu contrastés, notamment les gouttes en défaut de mise au point, ce seuillage ne suffit pas. En effet, pour ces objets, le niveau de gris maximal rencontré est en général inférieur au niveau de seuil. Ces objets ne seront donc pas détectés par le seuillage classique.

Ainsi, l’utilisation d’une seule technique de binarisation, aussi efficace qu’elle soit, ne peut être suffisante pour traiter nos images de sprays. Une autre approche de segmentation, basée sur la transformée en ondelettes [30] permet de détecter la pente des variations du niveau de gris des gouttelettes et détecte ainsi les objets peu contrastés dans l’image (voir Figure 8). La solution choisie est donc une combinaison de la binarisation de Li et Lee et de la méthode par ondelettes. Les deux images obtenues sont additionnées au sens arithmétique du terme. Le résultat est une image binaire gardant l’information contenue dans l’image originale (voir Figure 9).

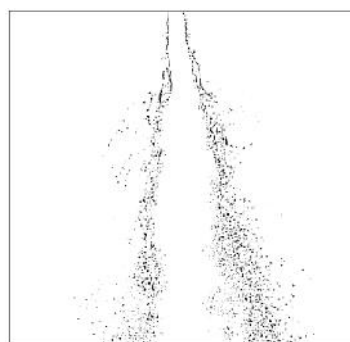


Figure 8 Image produite par le seuillage basé sur la transformée en ondelettes

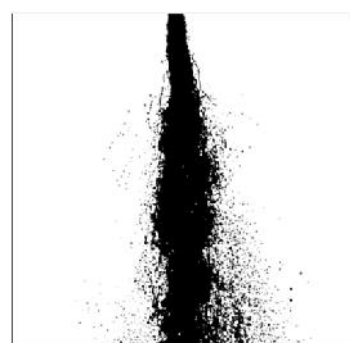


Figure 9 Image binaire résultant de la combinaison des méthodes de seuillage transformée en ondelettes et Li et Lee.

Si la méthode est correcte, l’estimation du champ de vitesse à partir des images binaires doit être identique aux résultats obtenus avec les images en niveaux de gris (voir Figure 6). La Figure 10 montre la cartographie du champ de vitesses obtenue à partir d’images binaires.

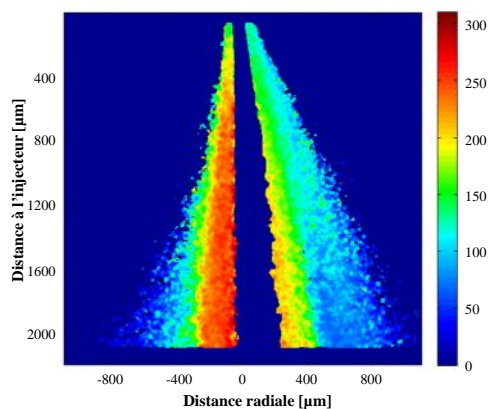


Figure 10 Cartographie du champ de vitesse en $m.s^{-1}$ obtenue à partir d’images binaires.

L’écart entre les deux approches peut être visualisé par la comparaison des profils de vitesse le long de l’axe horizontal. La Figure 11 montre des profils à différentes distances de l’injecteur. Il est évident qu’il existe des différences entre l’évaluation des vitesses à partir des images binaires et des données en niveaux de gris. Cependant, les profils horizontaux présentent des formes similaires et suivent la même évolution.

Les différences sont inférieures aux erreurs faites sur l'estimation des vitesses sur chacun des types d'images.

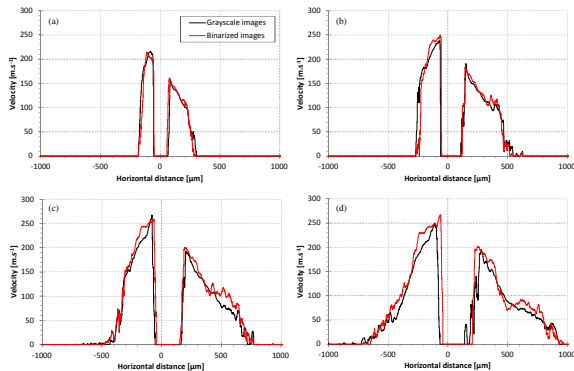


Figure 11 Profil de vitesse à 400 µm de l'injecteur (a), 800 µm (b), 1200 µm (c) et 1600 µm (d).

4.1.3 Segmentation des images

La binarisation appropriée des images permet donc une séparation efficace des éléments dispersés de l'écoulement continu, comme illustré sur la Figure 12. Ceci permet le calcul précis des champs de vitesse des gouttelettes dispersées d'une part et de l'interface liquide/gaz d'autre part. Les cartographies obtenues à partir des données spatiales séparées sont illustrées dans la Figure 13, où le champ de vitesse de l'interface du jet est représenté par la Figure 13a et la vitesse du nuage de gouttelettes par la Figure 13b.

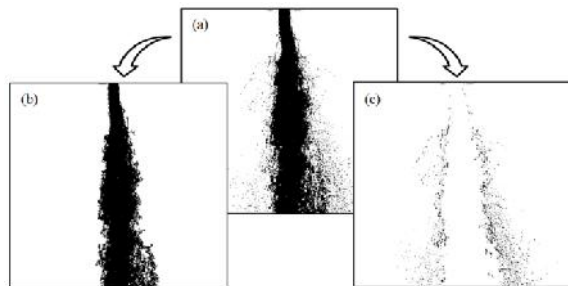


Figure 12 (a) image de l'écoulement, (b) jet principal, (c) éléments dispersés.

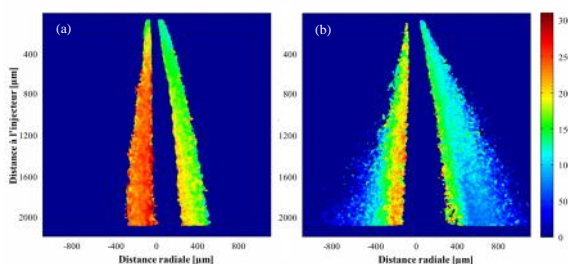


Figure 13 Cartographies du champ de vitesse en $m.s^{-1}$, (a) de l'interface liquide/gaz, (b) des éléments dispersés.

Nous disposons ainsi d'informations pertinentes permettant de caractériser efficacement l'écoulement. Ces informations de vitesse peuvent être mises en relation avec d'autres caractéristiques de

l'écoulement et peuvent également servir à valider les simulations numériques des processus d'atomisation.

5 Conclusions

L'imagerie ombroscopique ultra-rapide a été utilisée pour enregistrer des images haute résolution des zones d'atomisation. Des séries d'images d'injection Diesel sont capturées au moyen d'un laser à double impulsion femtoseconde dans des conditions atmosphériques ambiantes synchronisé avec une caméra à double exposition. On obtient ainsi des paires d'images résolues en espace et en temps contenant des informations adaptées pour une analyse par corrélation. Un code de corrélation d'images a été utilisé afin d'extraire des informations de vitesse des structures liquides de l'écoulement. Une étude statistique sur un grand nombre d'images permet d'obtenir le champ de vitesse moyen des structures liquides du jet haute vitesse. Une étude comparant différents algorithmes de binarisation des images a été menée. La procédure de binarisation choisie permet de séparer les éléments liquides dispersés et le cœur du jet. On peut alors mesurer la vitesse de chacune de ces deux classes d'objets. L'application à un injecteur Diesel dissymétrique montre que la différence de morphologie entre les deux bords du jet correspond également à une différence de vitesse.

6 Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme NADIA-Bio, fondé par le gouvernement français, la Région Haute-Normandie, dans le cadre du pôle Movéo.

7 References

- [1] Dumouchel, C., On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams. *Exp Fluids*, 45:371-422 (2008)
- [2] W. D. Bachalo. Experimental methods in multiphase flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 20(0):261 - 295, 1994.
- [3] H. Chaves, C. Kirmse, and F. Obermeier. Velocity measurements of dense diesel fuel sprays in dense air. *Atomization and Sprays*, 14(6), 2004.
- [4] P. Leick, G. Bittlinger, C. Tropea. Velocity measurements in the near nozzle region of common-rail Diesel sprays at elevated back-pressures, 19th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS-Europe '04, Nottingham, 2004.
- [5] C. Hespel, J.-B. Blaisot, M. Gazon, and G. Godard. Laser correlation velocimetry performance in diesel applications: spatial selectivity and velocity sensitivity. *Experiments in Fluids*, pages 1-20, 2012.
- [6] M. Raffel, C. E. Willert, S. T. Wereley, and J. Kompenhans. Particle image velocimetry: a practical guide. Springer, New York, 2 edition, 2007. ISBN 9783540723073.
- [7] P. T. Tokumar and P. E. Dimotakis. Image correlation velocimetry. *Experiments in Fluids*, 19:1-15, 1995.
- [8] A. Masataka. Physics behind Diesel Sprays. 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS, Heidelberg, Germany, September 2-6, 2012

- [9] S. Krüger and G. Grünefeld. Stereoscopic flow-tagging velocimetry. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 69(5):509–512, 1999.
- [10] D. Sedarsky, M. E. Paciaroni, M. A. Linne, J. R. Gord, and T. R. Meyer. Velocity imaging for the liquid-gas interface in the near field of an atomizing spray: proof of concept. *Opt. Lett.*, 31(7):906–8, 2006.
- [11] T. K. Marks, J. R. Hershey, and J. R. Movellan. Tracking motion, deformation, and texture using conditionally gaussian processes. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions on, 32(2):348–363, feb. 2010.
- [12] J. Fielding, M. B. Long, G. Fielding, and M. Komiyama. Systematic errors in optical-flow velocimetry for turbulent flows and flames. *Applied Optics*, 40(6):757–764, Feb. 2001.
- [13] D. Sedarsky, S. Idlahcen, C. Rozé and J. B. Blaisot. Planar velocity analysis of diesel spray shadow images, arXiv:1203.5347 [physics.flu-dyn], 2012.
- [14] D. Sedarsky, S. Idlahcen, C. Rozé and J. B. Blaisot. Velocity measurements in the near field of a diesel fuel injector by ultrafast imagery. *Experiments in Fluids*, Vol. 54:2, 1-12, 2013.
- [15] Boudy F and Seers P. Impact of physical properties of biodiesel on the injection process in a common-rail direct injection system. *Energy Conversion and Management*. Vol. 50, Issue 12, Pages 2905-2912, 2009.
- [16] Bradski, G and Kaehler, A., *Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly Media, 1st edition, ISBN 978-0-596-51613-0. (2008)
- [17] Shavit, U. and Chigier, N., Fractal dimensions of liquid jet interface under break-up. *Atom. and Sprays*, 5, 525-543 (1995)
- [18] R. Horaud, O. Monga, 1993, *Vision par ordinateur – outils fondamentaux*, Editions Hermès.
- [19] N. Otsu, 1978, A threshold selection method from grey-level histograms, *IEEETrans. Syst. Man. Cybern.*, vol.SMC-8.
- [20] J.N. Kapur, P.K. Sahoo, A.K.C. Wong, 1985, A New method for gray-level picture threshold using the entropy of the histogram, *Graphical Models and Image Processing*, 29.
- [21] T. Pun, 1980, A New method for gray-level picture threshold using the entropy of the histogram, *Signal processing*, vol.2, n°3.
- [22] C.H. Li, C.K. Lee, 1993, Minimum Cross Entropy Thresholding, *Pattern Recognition*, 26(4), p. 616-626.
- [23] H.D. Cheng, J.R. Chen, J. Li, 1998, Threshold selection based on fuzzy c-partition entropy approach, *Pattern Recognition*, vol. 31, No 7, pp. 857-870.
- [24] H.D. Cheng, Y.H. Chen, 1999, Fuzzy partition of two - dimensional histogram and its application to thresholding, *Pattern Recognition*, vol.32, pp.825-843.
- [25] S. Wu, A. Amin, 2003, Automatic thresholding of grey-level using multi-stage approach, 7th International Conference on Document Analysis and Recognition, vol.1.
- [26] D. Trier, T. Taxt, 1995, Improvement of Intergrated Function Algorithm for binarization of document images, *Pattern Recognition Lettres*, vol. 16, n° 3.
- [27] T.Gadi, R. Benslimane, Fuzzy hierarchical segmentation, *Traitement du signal*, vol.7, n°1, 2000.
- [28] Ridler, TW & Calvard, S, 1978, Picture thresholding using an iterative selection method, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 8: 630-632.
- [29] Kittler, J & Illingworth, J, 1986, Minimum error thresholding, *Pattern Recognition* 19: 41-47.
- [30] J. Yon, 2003, *Jet diesel haute pression en champ proche et lointain : étude par imagerie*, Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 2003.