

# Segmentation 3D d'hologrammes numériques de particules par palpement morphologique : application à l'analyse d'un jet diesel haute-pression

J. SENESCHAL<sup>1</sup>, C. FOURNIER<sup>1</sup>, C. BARAT<sup>1</sup>, T. FOURNEL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LTSI UMR5516, 23 rue du docteur Paul Michelon, 42023 Saint-Etienne Cedex 02

jerome.seneschal@univ-st-etienne.fr

corinne.fournier@univ-st-etienne.fr

cecile.barat@univ-st-etienne.fr

fournel@univ-st-etienne.fr

**Résumé** – Dans cet article, nous nous intéressons à l'holographie numérique pour l'étude d'un champ volumique de particules. L'holographie numérique offre de nouvelles possibilités par rapport à l'holographie sur plaque photosensible, notamment du point de vue de sa facilité de mise en œuvre. L'hologramme d'un champ de particules enregistré sur un capteur matriciel, est restitué numériquement plan par plan afin de pouvoir localiser les particules dans le volume d'étude. Nous introduisons pour cela une méthode de détection des particules par palpement morphologique. Nous avons appliqué cette technique à l'obtention d'un champ tridimensionnel de particules en volume, et nous présentons les résultats pour un jet issu d'un injecteur diesel haute-pression.

**Abstract** – In this paper, we are concerned with the study of a 3D particle field using a digital holography method. Digital holography offers new possibilities compared to classical holography, particularly because of its ease of use. In a first step, we record the hologram of the particles field on the CCD sensor. Then, the hologram is reconstructed plan by plan in order to obtain the studied volume. For the 3D reconstruction of the 3D particle cloud, a tool allowing to locate the particles on every plans is required. For this purpose, we use a morphological transform, called MOMP, based on a probing approach. The key idea of this method is to analyze both shape and intensity of the diffraction patterns of the particles to find their depth position. We apply the whole method to analyze a border volume of a high pressure diesel spray and to obtain the 3D field of droplet.

## 1. Introduction

L'holographie est une méthode de diagnostic optique qui permet d'enregistrer l'information 3D d'un objet instantanément. Elle est peu utilisée dans l'industrie pour des raisons pratiques. En effet, l'enregistrement et le développement de la plaque holographique sont des opérations délicates et l'étape de restitution nécessite un montage de déplacement mécanique de l'hologramme. Par contre, l'holographie numérique offre de nouvelles possibilités. Elle consiste à enregistrer directement un hologramme sur un capteur CCD et à restituer celui-ci numériquement, ce qui simplifie la mise en œuvre expérimentale. Cependant la faible résolution des capteurs numériques (50 fois plus petite que les plaques holographiques) reste un inconvénient majeur pour cette technique. Les techniques de traitement d'images doivent être optimales pour permettre de compenser en partie cette faible résolution.

Dans cet article, nous nous intéressons à l'holographie numérique pour l'étude d'un champ de particules en volume. Ce type d'acquisition est important pour l'étude de phénomènes physiques tels que la pulvérisation ou la diffusion [1].

Nous présentons dans la section 2 les étapes d'enregistrement et de restitution d'un tel hologramme. Cette

dernière étape permet de « scanner » le volume en effectuant une reconstruction plan par plan. La reconstruction du nuage 3D de particules nécessite ensuite de pouvoir localiser les particules dans chacun de ces plans. Pour cela, nous proposons en section 3 une méthode de détection par palpement morphologique. Enfin, section 4, nous appliquons cette technique à l'analyse de gouttelettes issues d'un jet diesel haute pression.

## 2. Enregistrement et restitution 3D de particules par holographie numérique

Le montage holographique utilisé est un montage en ligne. Il consiste à illuminer le volume d'étude avec un faisceau laser collimaté. Les interférences entre ce faisceau (onde plane de référence) et l'onde diffractée par les particules, sont enregistrées par une caméra numérique placée perpendiculairement au faisceau laser.

Dans le cas d'une particule positionnée transversalement en  $(x_0, y_0)$  et à une distance  $z_0$  du capteur, l'intensité enregistrée à un instant donné par le capteur est proportionnelle à (cf [2]):

$$H_N(x, y) = \left[ 1 - 2\mathbf{J} * \mathbf{d}_{x_0, y_0} * \Re\left(h_{z_0}\right) \right](x, y) \quad (1)$$

Où  $\mathbf{J}(x, y)$  est la fonction d'ouverture binaire de la particule (typiquement un cercle),  $\mathbf{d}_{x_0, y_0}$  représente la

distribution de Dirac en  $(x_0, y_0)$  et  $h_{z_0}(x, y)$  la fonction de Fresnel :

$$\underline{h}_{z_0}(x, y) = \frac{1}{jI z_0} e^{jP(x^2+y^2)/I z_0} \quad (2)$$

Ainsi la figure d'interférence enregistré se présente sous la forme d'anneaux concentriques dont la position du centre renseigne sur les coordonnées transverses  $(x_0, y_0)$  de la particule. L'information de positionnement longitudinal  $z_0$  de la particule est contenue dans la modulation de fréquence des oscillations de la fonction de Fresnel.

A partir de l'hologramme numérique  $H_N$ , on peut reconstruire chaque plan du volume hologrammé. La restitution numérique consiste à simuler la diffraction d'une onde plane par l'hologramme. Pour un plan restitué à une distance  $Z_R$  donnée et dans l'approximation de Fresnel, ceci revient à convoluer l'hologramme par la fonction de Fresnel de paramètre  $Z_R$  correspondant à la distance de restitution :

$$\underline{A}_{Z_R}(X, Y) = H_N * \underline{h}_{Z_R}(X, Y) \quad (3)$$

Numériquement cette restitution est réalisée par Transformée de Fourier Rapide. La distance  $Z_R$  peut être assimilée à une échelle et la reconstruction en différents plans (figure 1) à une transformée en ondelette de l'hologramme à différentes échelles ([2]). Les particules de position  $Z_0 \approx Z_R$  apparaissent nettes. Les autres présentent des figures d'anneaux concentriques.

La segmentation 3D d'un hologramme consiste à positionner toutes les particules du nuage, par analyse d'une série de plans restitués à partir d'un hologramme. Classiquement [1], le positionnement 3D des particules se fait particule par particule en déterminant d'abord les coordonnées  $(x_i, y_i)$  transversalement, puis la position  $Z_i$ . On obtient cette dernière en cherchant le maximum du profil de l'amplitude restituée  $A_{Z_R}(x_i, y_i)$  en fonction de  $Z_R$ . La localisation en  $(x_i, y_i)$  utilise généralement uniquement un critère d'intensité ce qui peut engendrer des problèmes du fait du faible rapport signal sur bruit. Nous proposons une nouvelle méthode de localisation des particules basée sur le palpement morphologique, qui tient compte non seulement de l'intensité mais aussi de la forme de la particule dans un plan restitué.

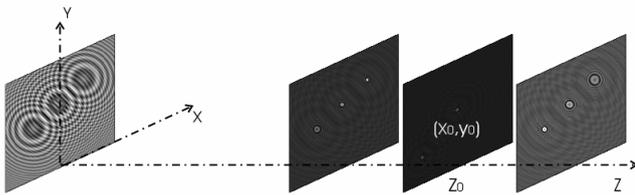


FIG. 1 : principe de restitution d'un hologramme

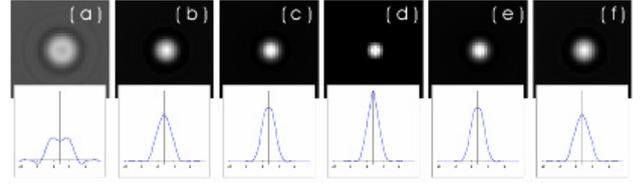


FIG. 2 : images et profils de restitution d'un hologramme d'une particule située à 60 mm du capteur dans différents plans de cotes : (a) 58 mm, (b) 59 mm, (c) 59.5 mm, (d) 60 mm, (e) 60.5 mm, (f) 61 mm

### 3. Détection des particules par palpement morphologique

#### 3.1 Transformée MOMP

Dans les plans proches de la mise au point d'une particule, la forme de son profil varie plus significativement que son intensité (figure 2). On constate que dans le plan de l'image de cette particule, le profil est le plus contrasté et le plus étroit. C'est ce profil que l'on choisit de détecter. La méthode que nous appliquons joue sur les deux paramètres de forme et d'intensité. Il s'agit d'une transformée de mise en correspondance de formes, basée sur le principe du palpement de surface mécanique et capable de localiser simultanément des objets à niveaux de gris de formes variables. Cette transformée, appelée transformée MOMP (Multiple Objects Matching using Probing), utilise deux fonctions de référence distinctes, notées  $t_{inf}$  et  $t_{sup}$ , définies à partir de la théorie des ensembles en combinant les fonctions représentatives  $t_i$  de tous les objets à localiser. Ces fonctions de référence forment un gabarit dans lequel doivent tenir les graphes des  $t_i$  à détecter. L'écart  $A$  entre  $t_{inf}$  et  $t_{sup}$  à la position de centrage sert de critère de décision (figure 3a).

Les fonctions  $t_{inf}$  et  $t_{sup}$  sont utilisées comme des palpeurs de surface. Elles sont amenées au contact de la surface image simultanément par dessous et par dessus, ce qui correspond mathématiquement aux opérations morphologiques d'érosion et de dilatation fonctionnelles de  $f$  par les deux palpeurs [3]. Notant  $\mathbf{e}$  et  $\mathbf{d}$  les opérateurs d'érosion et de dilatation, la définition de la transformée MOMP s'écrit :

$$MOMP_{(t_{inf}, t_{sup})}(f) = \mathbf{d}_{-t_{sup}}(f) - \mathbf{e}_{t_{inf}}(f) \quad (4)$$

Elle fournit l'écart entre les palpeurs en chaque point de centrage. On montre qu'un objet est détecté lorsque ce résultat est inférieur à  $A$ . Par exemple, sur la figure 3, deux objets sont détectés aux positions  $x_1$  et  $x_2$ . (figure 3b).

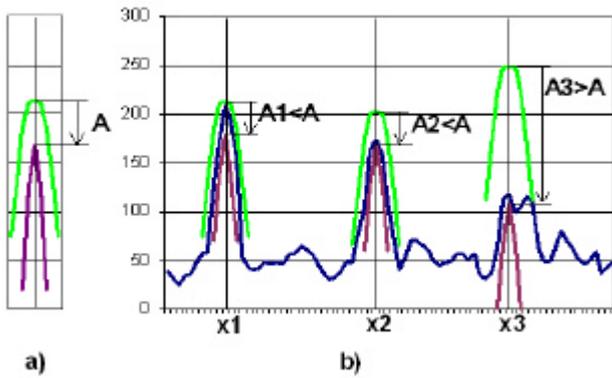


FIG. 3 : principe de la transformée MOMP

### 3.2 Application à la sélection de particules

Dans notre application, pour détecter les particules focalisées au moyen de la transformée MOMP, nous utilisons deux éléments structurants cylindriques, qui correspondent à une approximation de  $t_{inf}$  et  $t_{sup}$  lorsque l'on considère une infinité de pics, tous caractérisés par une hauteur minimum A et une largeur comprise dans un intervalle donné (figure 4).

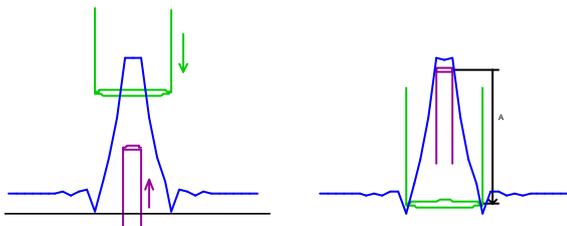


FIG. 4 : palpeurs cylindriques utilisés pour la détection de particules focalisées

Les valeurs des rayons des cylindres permettent donc de ne sélectionner que certaines formes de pics. Plus ces valeurs sont proches, plus le modèle est sélectif. Le paramètre A est relatif à l'intensité. En pratique, en holographie, les valeurs à choisir peuvent être déterminées à partir de simulations.

### 3.3 Implémentation

Les éléments structurants cylindriques présentés précédemment correspondent simplement à des éléments plans circulaires. Le calcul de la transformée MOMP en chaque pixel ne nécessite donc que des opérations de comparaison pour la recherche de minimum et de maximum, et non des multiplications.

Comme le rapport signal sur bruit est relativement faible sur les plans restitués, il est nécessaire d'utiliser du filtrage d'ordres statistiques. Les expressions généralisées des opérations d'érosion et dilatation remplacent alors les expressions classiques dans l'équation 4 [4]. On trouve dans la littérature de nombreux algorithmes pour l'implémentation efficace de ce type d'opérations par des éléments structurants binaires [5].

## 4. Application à un jet diesel haute-pression

### 4.1 Description

La caractérisation des gouttelettes issues d'un jet diesel haute pression est un facteur fondamental pour les constructeurs dans le but de diminuer la pollution et d'améliorer la combustion.

Comparées aux méthodes d'observation classiques, les méthodes d'observation holographiques permettent d'observer une région en volume. L'application des techniques holographiques dans les sprays a été décrite par Jones [6], et plus récemment par Anezaki [7].

Dans le cadre de notre application à l'analyse de jet diesel à l'aide de l'holographie numérique, nous avons utilisé un montage holographique en ligne (figure 5), comme présenté précédemment et comportant une caméra (Flowmaster 3, LaVision). La taille du capteur est de 1024 x 1280 pixels. Un objectif microscope longue distance a été utilisé de manière à pouvoir ajuster le champ.

Le système d'injection est formé d'un système "rampe commune" (common-rail) commercial Bosch de voiture. Une pompe, entraînée par un moteur électrique permet de monter l'huile en pression dans la rampe jusqu'à 135 MPa. La rampe peut alimenter 5 injecteurs. Une électronique de contrôle permet d'asservir l'instant et la durée d'injection, la quantité injectée ainsi que la pression dans le rail. L'injecteur utilisé est un injecteur mono trou de diamètre 0.1 mm. Toutes les expérimentations ont été réalisées avec de l'huile ISO 4113 (huile de test) qui a des caractéristiques de densité et viscosité similaires au gasoil. L'injection se fait dans une chambre transparente à pression atmosphérique. La pression d'injection est de 50 MPa. Une étude précédente [8] a montré que la vitesse du front de jet pour cet injecteur atteignait 300 m/s.

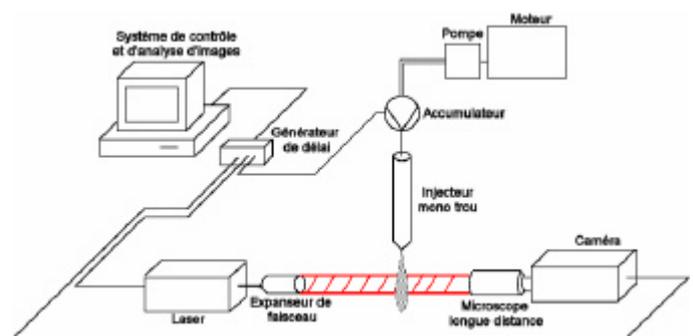


FIG. 5 : montage expérimental

La figure 6 correspond à un hologramme de jet acquis dans les conditions décrites précédemment. La figure 7 représente un plan restitué à partir de cet hologramme. On observe sur cette image les différents motifs de diffraction : les systèmes d'anneaux autour des gouttelettes défocalisées et les images nettes des gouttelettes au point.



FIG. 6 : hologramme

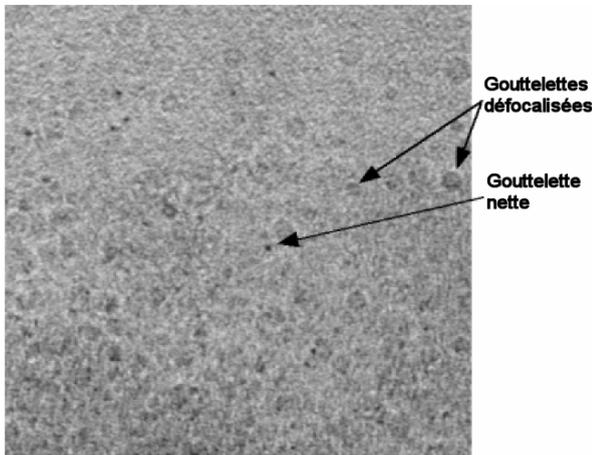


FIG. 7 : extraction d'une fenêtre d'un plan restitué à la distance  $Z=37$  mm

## 4.2 Analyse des images

Pour reconstruire le jet diesel en 3D à partir de l'hologramme de la figure 6, nous avons restitué 100 plans, espacés de 100  $\mu\text{m}$ , à des distances de 30 mm à 40 mm du capteur.

Comme nous l'avons décrit section 3, sur chaque plan restitué, on choisit de détecter les gouttelettes nettes au moyen de la transformée MOMP. Les rayons des cylindres sont de 2 et 5 pixels. (figure 4). L'incertitude sur la position en  $Z$  a été évaluée à  $\pm 100 \mu\text{m}$ .

Le résultat obtenu est présenté figure 8. Elle montre la répartition en 3 dimensions des gouttes en périphérie de jet. Le champ observé est de 2,5 mm de long sur 1,5 mm et pour une profondeur d'étude de 1 mm.

## 5. Conclusion

L'holographie numérique est une méthode très prometteuse pour l'étude de champ de particules. Cependant la faible résolution des capteurs est toujours un point critique qui peut être compensé grâce aux techniques de traitement d'images.

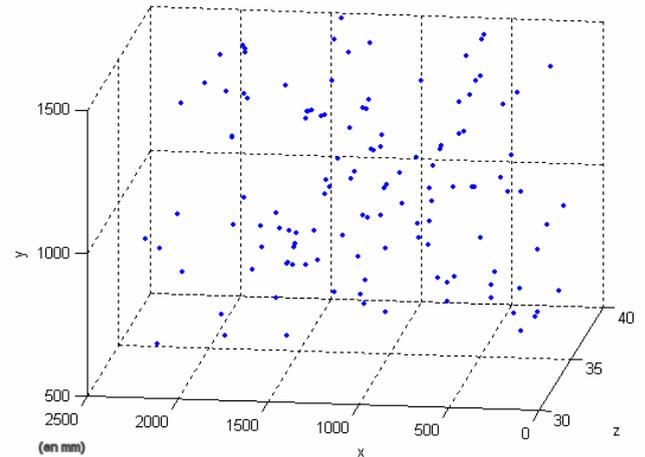


FIG. 8 : champ 3D reconstruit de particules situées en bordure du jet haute-pression

Les plans restitués ont souvent un faible rapport signal sur bruit. Des nouveaux outils adaptés doivent être développés pour l'étude de ce type d'images. Nous avons proposé notamment une nouvelle méthode de segmentation de particules. Basée sur des opérateurs morphologiques, elle permet de localiser des particules nettes ou floues. L'application sur un jet diesel haute-pression est très encourageante. Nous parvenons à situer les particules en trois dimensions. Le travail futur va consister à pouvoir associer la granulométrie des gouttelettes à leurs positions dans l'espace.

## Références

- [1] S. Murata, N. Yasuda, *Potential of digital holography in particle measurement*, Optics & Laser Technology, Vol. 32, 567-574, 2000.
- [2] C. Burraga-Lefebvre, S. Coëtmellec, D. Lebrun, C. Ozkul, *Application of Wavelet Transform to Hologram Analysis : Three-Dimensional Location of Particles*, Optics & Lasers in Engineering, Vol. 33, pp 409-421, 2000.
- [3] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, New York Academic, 1982.
- [4] G. Agam and I. Dinstein, *Generalized Morphological Operators Applied to Map-Analysis*, SSPR-96, Leipzig, Germany, 1996.
- [5] M. Van Droogenbroeck, H. Talbot, *Fast Computation of Morphological operations with arbitrary structuring elements*, Pattern Recognition Letters, Vol 17, pp 1451-1460, 1996.
- [6] A. R. Jones, *A Review of Drop Size Measurement -- The Application of Techniques to Dense Fuel Sprays*, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 3, 19, pp. 225-234.
- [7] Y. Anezaki, N. Shirabe, K. Kanehara, T. Sato, *3D Spray Measurement System for High Density Fields Using Laser Holography*, SAE 2002-01-039
- [8] J. Seneschal, C. Ducottet, N. Bochard, P. Gucher, J.C. Champoussin, *Visualization of High Pressure Diesel Sprays from Single and Multi-Hole Injectors*, FISITA 2002, Helsinki, FINLAND, June 2002.