

Anémométrie Phase Doppler en milieux multiphasiques : vers de nouvelles possibilités

par Gérard Gréhan, Fabien Onofri et Gérard Gouesbet

de l'INSA, Rouen

I ■ INTRODUCTION

Pour connaître et donc maîtriser, les écoulements transportant une phase dispersée, la mesure de l'évolution des caractéristiques physiques significatives (vitesse et taille des particules) est nécessaire. Actuellement, la granulométrie phase-Doppler est la technique la plus performante pour mesurer ces quantités. Introduite par le Professeur F. Durst en 1975 [1], cette extension de la vélocimétrie laser-Doppler ne connut un réel développement qu'à partir de 1984 [2, 3].

II ■ LA TECHNIQUE PHASE-DOPPLER

Son principe est le suivant (voir *fig. 1a*) : deux faisceaux laser se propagent dans le plan xOz et se croisent au point O avec le demi-angle α . La direction principale de l'écoulement des particules étudiées est parallèle à Ox . Une tête de détection est composée de plusieurs détecteurs élémentaires, habituellement 2 ou 3. La position d'un détecteur élémentaire est définie par deux rotations par rapport à Oz : ϕ dans le plan yOz , appelé angle hors-axe, et l'angle d'élévation ψ .

Une introduction à la technique phase-Doppler est donnée dans [4]. Son principe est maintenant brièvement rappelé. Lorsqu'une particule traverse le volume de mesure, les signaux sur les détecteurs élémentaires D_1 et D_2 sont essentiellement identiques en des temps décalés t_1 et t_2 respectivement. Pour chaque détecteur, le signal collecté est un signal d'Anémométrie laser-Doppler (ADL), modulé à la fréquence f (période T). Cette fréquence est reliée à la vitesse v de la particule par $f = 2v \sin \alpha / \lambda$, où λ est la longueur d'onde des faisceaux incidents.

Les techniques de traitement du signal utilisées ne permettent pas de mesurer $\Delta t = t_2 - t_1$, mais $\delta \cdot t = \Delta \cdot t - n \cdot T$, où n est un entier. A la période T correspond 2π , à δt correspond l'angle $(2\pi \cdot \delta t) / T$, appelé phase.

Lorsque la lumière collectée est issue d'un seul procédé de diffusion (réflexion, réfraction, réfraction avec une réflexion interne, ...), la phase peut être reliée aux caractéristiques de la particule diffusante (diamètre d et indice réel m). Cette mesure est indépendante de l'intensité lumineuse incidente sur la particule.

Ainsi, dans les configurations classiques, l'angle hors-axe ϕ est choisi pour qu'un processus de diffusion soit prédominant : pour des gouttes d'eau ($m = 1.33$), ϕ est souvent choisi aux alentours de 30° .

To master two or multi-phase flows it is necessary to have a close dialogue between theory, numerical simulation and experiments. Optical techniques are often used because they give the possibility of local, in situ and on line measurements. For example a phase Doppler anemometer measures the size and the velocity of individual particles in flows. Nevertheless, classical phase Doppler geometries are limited by the finite size of the optical probe created by two focused laser beams, leading to so-called "Gaussian beam effects". New geometries, free of Gaussian beam effects, are introduced. With these geometries the quality of flux measurements is improved and the phase Doppler technique can be extended to the measurement of the refractive index of the particles.

LA HOUILLE BLANCHE/N° 1/2-1996

gamme étendue sans erreur significative. Les mesures de corrélations taille/vitesse ainsi que celles des flux massiques sont nettement améliorées [14].

IV ■ EXTENSION À LA MESURE D'INDICE

La mesure de la taille et de la vitesse des particules étant assurée, une information supplémentaire peut être recherchée : l'indice de la particule diffusante. Cette information sur l'indice permet de connaître le matériau constituant la particule ou de déterminer si celle-ci a subi une évolution. L'indice est en effet une fonction de la température et/ou de la concentration de constituants dont la proportion peut varier sous l'effet d'une évaporation ou d'une coalescence.

Différentes approches sont possibles pour obtenir cette information. Nous imposons comme contrainte supplémentaire de travailler avec une seule unité de détection, contrairement à d'autres auteurs [15]. Cette contrainte présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul accès optique. Cependant, elle limite la précision de la mesure à la deuxième décimale sur l'indice alors que les approches combinées phase-Doppler/arc-en-ciel permettent, en principe, d'atteindre la 4ème décimale sur l'indice [15].

Pour mesurer l'indice à partir d'un signal phase-Doppler, deux approches ont été développées :

- Effectuer des rapports entre des données provenant de deux unités de détection phase-Doppler.
- Utiliser l'ambiguïté de trajectoire pour obtenir deux signaux pour chaque particule : un dominé par la réfraction et l'autre par la réflexion.

Ces deux approches sont maintenant approfondies.

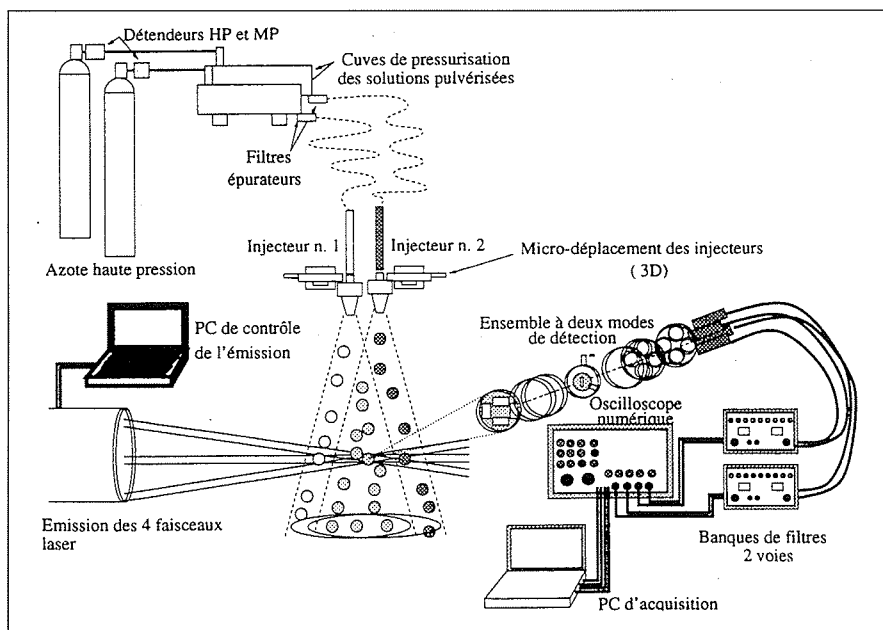
4.1 Dual mode

La figure 1b présente une géométrie à deux modes. Elle se compose d'une sonde ADL classique deux couleurs et d'une unité de détection à 4 détecteurs élémentaires. Les détecteurs V_1 et V_2 , sensibles uniquement à la lumière bleue ($\lambda = 488 \text{ nm}$), réalisent une sonde type plan, tandis que les détecteurs U_1 et U_2 , sensibles uniquement à la lumière verte ($\lambda = 514 \text{ nm}$), réalisent une sonde type standard modifiée. V_1 , V_2 , U_1 et U_2 désigneront ci-dessous également les phases associées aux détecteurs correspondants.

On peut alors montrer que le rapport des différences de phase $R = (U_2 - U_1)/(V_2 - V_1)$ est une fonction biunivoque du diamètre [16].

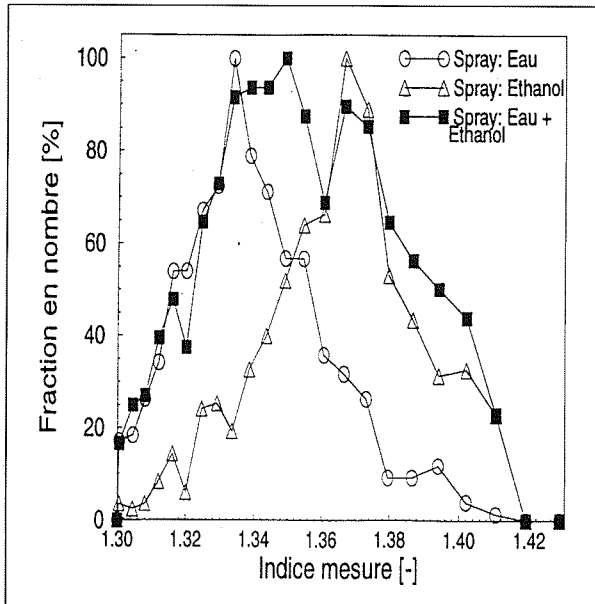
Ainsi, de la fréquence des signaux collectés par U_1 et V_1 , les composantes des vitesses longitudinale et transversale sont obtenues pour chaque particule. Des différences de phase des signaux collectés ($V_1 - V_2$) et ($U_1 - U_2$), le diamètre de la particule est extrait, et, du rapport de phase R , l'indice de la particule est mesuré.

Cette technique a été appliquée pour mesurer le taux de coalescence d'un spray d'eau et d'un spray d'alcool. La figure 3 présente le schéma de l'expérience. Les deux injecteurs médicaux utilisés produisent chacun un spray de large distribution granulométrique. Un des injecteurs est alimenté en eau ($m = 1.33$), l'autre en alcool ($m = 1.36$). La figure 4 est un exemple des résultats obtenus. Sur cette figure, trois courbes sont présentes. La première correspond à la mesure d'indice effectuée avec l'injecteur alimenté en eau fonctionnant seul. La valeur la plus probable correspond bien à celle de l'eau. Soulignons que l'élargissement observé vient principalement du fait que toutes les classes de diamètre sont présentes. De même, la seconde courbe correspond à l'injecteur alimenté en alcool fonctionnant seul. La troisième courbe corres-



3. Schéma de l'expérience de mesure du taux de mélange et de coalescence d'un jet d'eau et d'alcool.

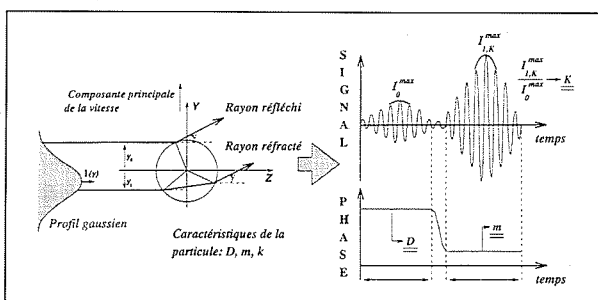
pond au cas où les deux injecteurs sont alimentés. La valeur la plus probable de l'indice mesuré correspond au cas où une goutte d'eau et une goutte d'alcool ont coalescé. Les gouttes d'alcool forment un pic bien distinct, correspondant à la même valeur que le spray d'alcool seul, tandis que le pic d'indice correspondant à l'eau pur est transformé en un plateau continu entre 1.33 et 1.36.



4. Histogramme en un point pour le jet d'eau, le jet d'alcool, le jet double.

4.2 Double Bouffée ou « Dual Burst »

Le principe de la technique de la double bouffée est décrit figure 5. Il s'agit d'une géométrie standard modifiée dans laquelle le diamètre des faisceaux laser créant la sonde optique est de l'ordre de ou plus petit que celui des particules étudiées. Ainsi lorsque particule traverse une telle sonde, l'effet d'ambiguïté de trajectoire est amplifié. Chaque détecteur collecte deux signaux pour cette particule : un signal composé principalement de lumière réfléchie puis un signal composé principalement de lumière réfractée. Ainsi l'évolution de la phase de chaque couple de signaux fera apparaître deux plateaux : le premier, créé

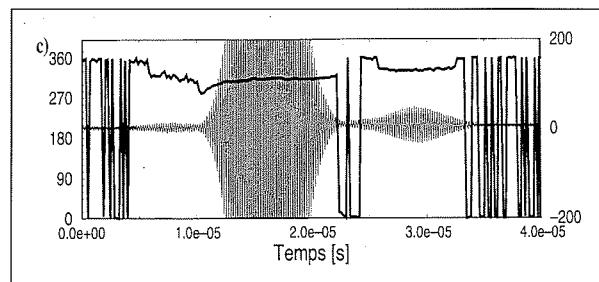
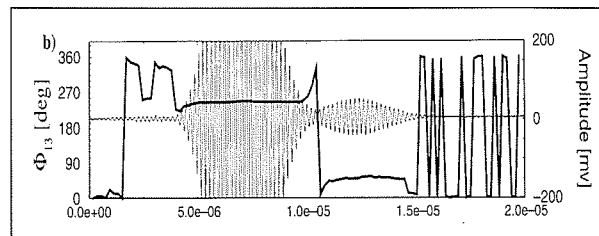
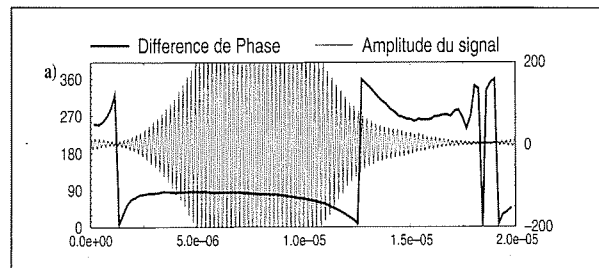


5. Schéma de principe d'un phase-Doppler Double Bouffée ou Dual Burst.

par la lumière réfléchie, ne dépend que du diamètre de la particule diffusante tandis que le deuxième, créé par la lumière réfractée, dépend du diamètre et de la *composante réelle de l'indice de réfraction* de la particule. En outre, le rapport entre l'intensité du signal réfléchi et celle du signal réfracté dépend du diamètre de la particule et de la *composante imaginaire de l'indice de réfraction* de la particule, c'est-à-dire de l'absorption du matériau composant la particule.

4.2.1 Mesure de la composante réelle de l'indice de réfraction

La figure 6 présente trois signaux expérimentaux collectés par un détecteur élémentaire ainsi que la différence de phase entre deux détecteurs élémentaires. Ils ont été produits lors de la traversée d'une sonde de 54 μm de diamètre par une goutte : a) d'éthanol de 25 μm de diamètre, b) d'éthanol de 75 μm de diamètre, c) d'eau de 95 μm de diamètre. Ces gouttes ont été produites par un générateur de gouttes monodispersées TSI 3050. La détection était réalisée par une unité INVENT, située à $\phi = 30^\circ$. Pour les plus grosses particules (cas b et c), le diagramme de phase possède deux plateaux, séparés par une zone de transition correspondant à un saut de phase. A ces plateaux correspondent deux maxima d'intensité des signaux : la bouffée réfractée et la bouffée réfléchie (avec l'amplitude la plus

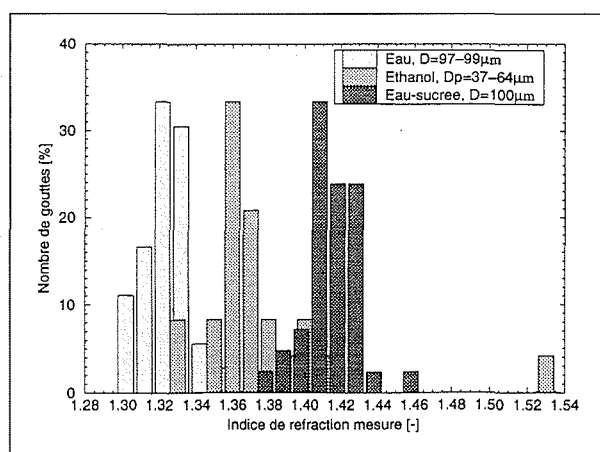


6. Exemple de signaux expérimentaux issus d'un phase-Doppler Double Bouffée optimisé pour la mesure de la composante réelle de l'indice de réfraction.

faible). En mesurant la différence de phase aux alentours de ces maxima, la taille et l'indice des gouttes diffusantes sont mesurés à $74.2 \mu\text{m}/1.354$ et $93.8 \mu\text{m}/1.316$, en accord avec notre attente.

Figure 6a, les deux processus de diffusion ne sont pas distincts dans le signal collecté. Cependant un saut de phase est mesuré bien que le plateau dans la zone dominée par la réflexion soit réduit. Dans ce cas, le diamètre de la goutte est trop petit par rapport au diamètre des faisceaux lasers pour que les deux processus de diffusion soient discernables par leur intensité. A partir de ce signal, la taille et l'indice de la goutte sont néanmoins estimés à $25 \mu\text{m}/1.358$.

La figure 7 présente un ensemble d'histogrammes d'une série de mesures d'indice sur des gouttes monodispersées d'eau, d'éthanol et d'une solution d'eau sucrée, montrant que les différents liquides sont séparés selon leur indice.



7. Exemple d'histogrammes d'indice de réfraction obtenus avec un phase-Doppler Double bouffée optimisé pour la mesure de la composante réelle de l'indice de réfraction.

4.2.2 Mesure de la composante imaginaire de l'indice de réfraction

Figure 8, une série de signaux simulés par GLMT est présentée. Les figures de gauche correspondent à l'évolution de l'intensité du signal collecté par une unité située à $\phi = 60^\circ$, tandis que les figures de droite correspondent à l'évolution de la phase du signal. De haut en bas, les particules ont un diamètre de 54, 108 et 216 μm . Le diamètre de la sonde optique est, comme pour la section précédente, de 54 μm . Pour chaque courbe, le paramètre est la composante imaginaire de l'indice de réfraction (entre 0 et $2.49 \cdot 10^{-3}$). Cette évolution de la composante imaginaire correspond à des gouttes d'eau pure ($k = 0$), ou avec concentrations en masse de 2, 4, 7, 12, 25 % d'encre de chine. L'absorption est reliée à la composante imaginaire de l'indice de réfraction par $K = k \cdot \lambda / 4 \pi$.

De cette série de simulations on note les points clefs suivants :

1. L'amplitude maximale du pic de lumière réfléchie, I_0 , est indépendante de la concentration en encre dans la particule.
2. L'amplitude maximale du pic de lumière réfractée, $I_{1,K}$, est fortement dépendante de la concentration en encre dans la particule.
3. Le coefficient d'absorption, K , est relié à I_0 et à $I_{1,K}$ par $K = (-) 1/(A \cdot D) (\ln(I_{1,K}/I_0) - B)$ où les coefficients A et B ont pour valeur $A = 0.6898$ et $B = 0.8289$, pour cette géométrie.

Un test expérimental a été effectué sur un jet de gouttes monodispersées de 87 μm . Les ronds vides de la figure 9 représentent l'absorption, mesurée sur des gouttes en vol, en même temps que leur vitesse et leur taille, en fonction de la concentration en encre. Sur cette même figure, les carrés pleins représentent les valeurs mesurées par photométrie en cuve sur des mélanges eau/encre. Ces mesures ne sont possibles que pour des concentrations en encre inférieures à 4 %, aussi la ligne continue représente l'extrapolation de ces mesures jusqu'à des concentrations de 25 % en encre tandis que la ligne en pointillés correspond à la régression linéaire sur les mesures par Double Bouffée.

Ces premiers résultats expérimentaux sont très encourageants : la technique dans son état actuel permet la distinction des différentes solutions d'encre.

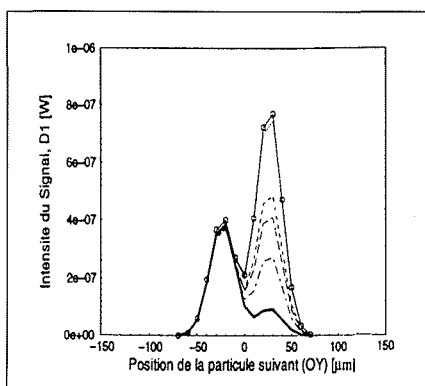
V ■ CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La technique phase-Doppler est devenue un outil incontournable dans l'étude des milieux di- et multiphasiques, car elle permet la mesure de la taille et de la vitesse de particules individuelles *in situ*, donnant accès aux distributions temporelles et spatiales de la phase dispersée. La prise en compte des propriétés dues à l'utilisation de faisceaux laser focalisés pour réaliser une sonde optique permet :

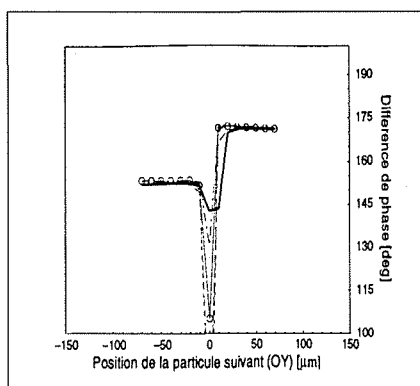
1. De supprimer les erreurs de mesure dues à la trajectoire des particules dans la sonde optique,
2. D'étendre la technique à la mesure de l'indice complexe de réfraction des particules détectées.

Ces développements ouvrent la voie à de nouveaux domaines d'étude : marquage d'écoulements, mesures de taux de mélange, de taux de coalescence, de température, étude de l'évaporation, de réactions chimiques, ...

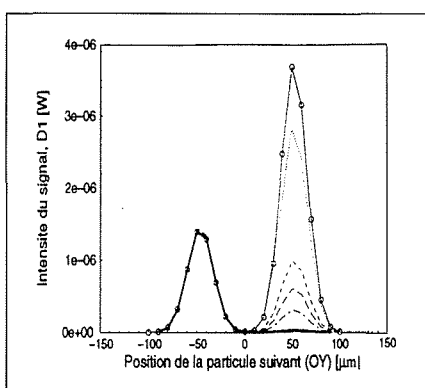
En outre, les outils introduits pour étendre la technique phase-Doppler à la mesure d'indice s'appliquent également à la reconnaissance des particules irrégulières [17], la mesure du diamètre de cylindres ou de fibres [18, 19], ou au diagnostic de particules à cœur et/ou multicouche [18]. De plus d'autres techniques optiques, comme l'imagerie, peuvent bénéficier d'une simulation complète par GLMT pour maîtriser le rôle des effets de défauts de mise au point, d'éclairage non uniforme, de lumière de cohérence limitée [20].



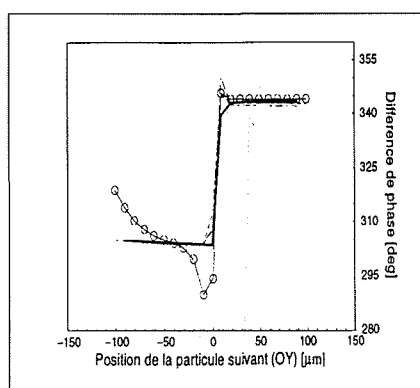
(a) Evolution de l'intensité: $d = 54 \mu m$



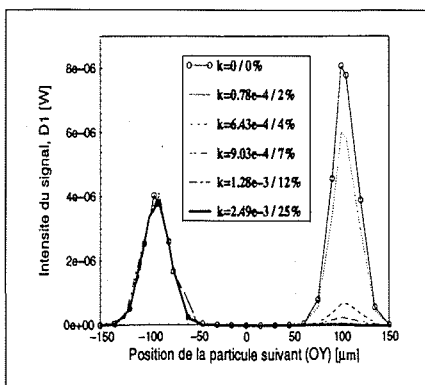
(b) Evolution de la phase: $d = 54 \mu m$



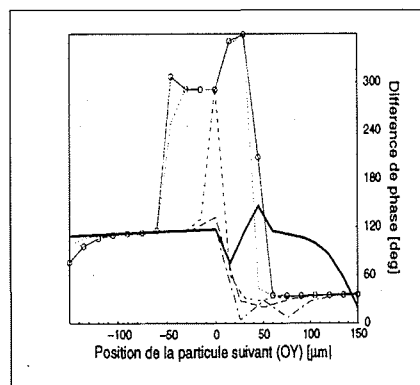
(c) Evolution de l'intensité: $d = 108 \mu m$



(d) Evolution de la phase: $d = 108 \mu m$

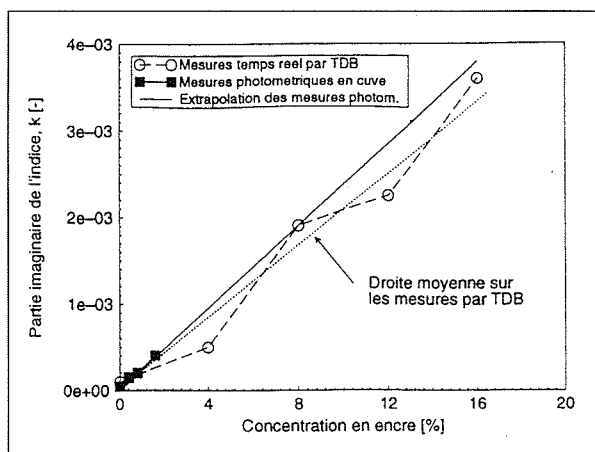


(e) Evolution de l'intensité: $d = 216 \mu m$



(f) Evolution de la phase: $d = 216 \mu m$

8. Evolution de l'intensité et de la phase pour trois taille de particule traversant une sonde phase Doppler Double Bouffée. Le paramètre est l'absorption de la particule.



9. Exemple de mesure d'absorption avec un phase-Doppler Double Bouffée optimisé pour la mesure de la composante imaginaire de l'indice de réfraction.

Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par le GREDIC, ainsi que par une aide PROCOPE pour les échanges avec le LSTM du Professeur F. Durst à Erlangen (Allemagne).

Références

- [1] DURST F. and ZARÉ M. (1975). — Laser Doppler measurements in two phase flows, In *Proceedings of LDA-Symposium, Copenhagen*, pp. 403-429.
- [2] BACHALO W.D. and HOUSER M.J. (1984). — Phase Doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distributions. *Optical Engineering*, 23, pp. 583-590.
- [3] SAFFMAN M., BUCHHAVE P. and TANGER H. (1984). — Simultaneous measurement of size, concentration and velocity of spherical particles by a laser Doppler method. In *Laser Anemometry in Fluid Mechanics-II* (Ed : Adrian, Durst, Mishina & Whitelaw) LADOAN-Lisbon, pp. 85-104.
- [4] BACHALO W.D., BENA DE LA ROSA A. and SANKAR S.V. (1991). — Diagnostics for fuel spray characterization, in *Combustion Measurements*, edited by N. Chigier, Hemisphere Publishing Corporation, Chapter 7, pp. 229-278.
- [5] BACHALO W.D. and SANKAR S.V. (1988). — Analysis of the light scattering interferometry for spheres larger than the light wavelength. In *Proceedings of the 4th Intl. Symposium on Applications of laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon*, pp. 1-8.
- [6] GRÉHAN G., GOUESBET G., NAQWI A. and DURST F. (1994). — Trajectory ambiguities in Phase Doppler systems : study of a near forward and a near backward geometry, *Part. Part. Syst. Charact.*, 11, pp. 133-144.
- [7] GOUESBET G., MAHEU B. and GRÉHAN G. (1988). — Light scattering from a sphere arbitrarily located in a Gaussian beam, using a Bromwich formulation, *J.O.S.A. A*, 5, 9, pp. 1427-1443.
- [8] GOUESBET G., GRÉHAN G. and MAHEU B. (1990). — A localized interpretation to compute all the coefficients g^m_n in the generalized Lorenz-Mie theory, *J.O.S.A. A*, 7, 6, pp. 998-1007.
- [9] AIZU Y., DURST F., GRÉHAN G., ONOFRI F. and XU T.H. (1993). — A PDA system without Gaussian beam defects, In *3rd Int. Conf. on Optical Particle Sizing, Yokohama (Japan)*, à être publié par l'ASME Journal, pp. 461-470.
- [10] DURST F., AIZU Y., XU T.H., GRÉHAN G., GOUESBET G. and ONOFRI F. — Laser-Doppler-gerät sowie verfahren zum betreiben eines solchen gerates, Brevet Allemand, Pat 2153/3-93, 1993, Brevet Européen, n° 94112579.1, 1994.
- [11] XU T.H. and TROPÉA C. (1994). — Improving the performance of two-component phase-Doppler anemometry, *Meas. Sci. Technol.*, 5, pp. 969-975.
- [12] TROPÉA C., XU T.H., ONOFRI F., GRÉHAN G. and HAUGEN P. — Dual-Mode phase Doppler anemometry, in *7th Int. Symposium on Applications of Laser techniques to Fluid mechanics, Lisbon*, July 11-14 p. 18.
- [13] TROPÉA C., XU T.H., ONOFRI F., GRÉHAN G. and HAUGEN P. (1995). — Dual-mode phase Doppler anemometer, In *4th Optical particle sizing conference PARTEC95* (Nüremberg), pp. 287-296.
- [14] DURST F., TROPÉA C. and XU T.H. (1994). — The slit effect in phase-Doppler anemometry. In *2nd Int. Conf. on fluid Dyn. Meas. and its Appl.*, Oct. 19-22, Pékin (Chine).
- [15] SANKAR S.V., IBRAHIM K.M., BUERMANN D.H., FIDRICH M.J. and BACHALO W.D. (1993). — An integrated phase Doppler/rainbow refractometer system for simultaneous measurement of droplet size, velocity, and refractive index, In *3rd Int. Cong. on Optical Particle sizing, Yokohama (Japan)*, pp. 275-284.
- [16] ONOFRI F. — Prise en compte des effets des dimensions finies des faisceaux d'éclairage en granulométrie optique : Anémométrie phase-Doppler. Applications aux diagnostics des milieux diphasiques. Thèse de l'Université de Rouen, Novembre 1995.
- [17] MIGNON H., ONOFRI F., GOUESBET G., GRÉHAN G. et TROPÉA C. (1995). — Mesure de particules non sphériques par phase-Doppler : cas des cylindres et des particules irrégulières. *4ème congrès francophone de vélocimétrie laser*, 26-29 septembre, papier 1-4.
- [18] ONOFRI F., MIGNON H., GOUESBET G. and GRÉHAN G. (1995). — On the extension of Phase-Doppler Anemometry to the sizing of spherical multilayered particles and cylindrical particles, In *4th Optical particle sizing conference PARTEC95* (Nüremberg), pp. 275-284.
- [19] GOUESBET G. and GRÉHAN G. (1994). — Interaction between shaped beams and an infinite cylinder, including a discussion of Gaussian beams, *Part. Part. Syst. Charact.*, 11, pp. 299-308.
- [20] REN K.F., LEBRUN D., ÖZKUL C., KLEITZ A., GOUESBET G. and GRÉHAN G. (1995). — On the measurement of particles by imaging methods : theoretical and experimental aspects. In *4th Optical particle sizing conference PARTEC95* (Nüremberg), pp. 97-106.