



(43) Date de la publication internationale  
28 mai 2015 (28.05.2015)

(51) Classification internationale des brevets :  
G01N 15/06 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/EP2014/075366

(22) Date de dépôt international :  
24 novembre 2014 (24.11.2014)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
1361580 25 novembre 2013 (25.11.2013) FR

(71) Déposants : AREVA [FR/FR]; 1 Place Jean Millier, Tour Areva, F-92400 Courbevoie (FR). CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (C.N.R.S) [FR/FR]; 3 Rue Michel Ange, F-75794 Paris Cedex 16 (FR).

(72) Inventeurs : BAUDOIN, Raphael; 7, Boulevard Davout, F-75020 Paris (FR). ZIMMER, Laurent; 21, Rue Regnard, F-91410 Dourdan (FR).

(74) Mandataire : LEBKIRI, Alexandre; Cabinet Camus Lebkiri, 87 Rue Taitbout, F-75009 Paris (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,

AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))

(54) Title : METHOD AND OPTICAL SYSTEM FOR DETECTING PARTICLES IN A FLOW

(54) Titre : PROCEDE ET SYSTEME OPTIQUE DE DETECTION DE PARTICULES DANS UN ECOULEMENT

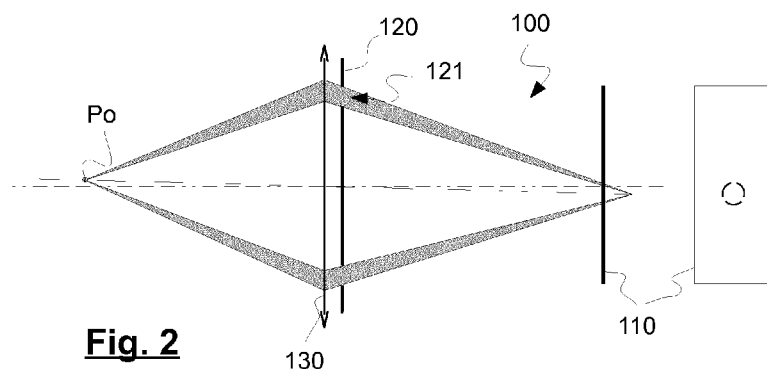


**Fig. 2**

(57) Abstract : The invention relates to an optical system for determining, in three dimensions, the velocity profile and minimum concentration of particles in a flow, the system being characterised in that it comprises a first acquisition chain (100) comprising a first acquisition lens (130), a first photosensitive sensor (110), and a first shutter (120) formed by an opaque disk having at least two openings (121) in an arc, which can allow the transmission of light beams towards said first photosensitive sensor (110), said openings (121) being inscribed in the same circle.

(57) Abrégé : La présente invention concerne un système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement, le système étant caractérisé en ce qu'il comporte une première chaîne d'acquisition (100) comportant une première lentille d'acquisition (130), un premier capteur photosensible (110) et un premier obturateur (120) formé par un disque opaque présentant au moins deux ouvertures (121) en arc de cercle aptes à permettre la transmission de rayons lumineux vers ledit premier capteur photosensible (110), lesdites ouvertures (121) étant inscrites sur un même cercle.



## **PROCEDE ET SYSTEME OPTIQUE DE DETECTION DE PARTICULES DANS UN ECOULEMENT.**

### **5      DOMAINE TECHNIQUE**

Le domaine de l'invention est celui de la détermination en trois dimensions et du suivi en temps réel d'une concentration de particules menant à la détermination de l'évolution du profil de vitesse dans un écoulement fluide.

10      L'invention est particulièrement bien adaptée pour la détermination d'une concentration de particules dans des écoulements au voisinage d'obstacles.

L'invention trouve une application particulièrement intéressante dans le domaine du nucléaire pour la détermination de concentration de particules dans des écoulements au voisinage de gaines combustibles d'un réacteur nucléaire.

### **ETAT DE LA TECHNIQUE**

15      Différentes méthodes pour déterminer la concentration en trois dimensions de particules dans un écoulement sont connues.

Une méthode connue consiste à détecter au moyen de plusieurs caméras des particules visuellement focalisées pour les situer dans l'espace. Cette première méthode, dite de tomographie PIV (pour Particle Image Velocimetry), nécessite de  
20      nombreuses caméras (au minimum quatre) et de grandes ressources pour le traitement des données. Un tel principe de détection est notamment décrit dans le document « Tomographic PIV : principles and practice. 2013, F.Scarano, Measurement Science and Technology 24 :012001 ». Toutefois cette technique possède l'inconvénient de détecter de nombreuses particules fantômes qui ne  
25      peuvent être éliminées qu'au moyen d'un nombre élevé de caméras. De plus ce phénomène s'accroît lorsqu'un obstacle est présent dans l'écoulement. Citons à titre d'illustration, le système "V3V" de TSI composé de 3 caméras légèrement désaxées afin de réaliser une triangulation de positions de particules focalisées. Ceci permet de procéder à des mesures de champs de vitesse en trois dimensions  
30      et trois composantes mais pas autour d'obstacles.

D'autres types de techniques sont, elles, basées sur le principe de défocalisation. En effet ce dernier spécifie que la taille apparente de la particule sur

l'image peut être linéairement reliée à sa position par rapport au plan focal du système optique. Cette information de taille apparente fournit alors la troisième composante nécessaire à un positionnement en trois dimensions de la particule dans l'espace, ceci menant à une détermination d'une concentration en trois dimensions de particules dans un volume. Ce principe ne peut s'appliquer qu'à des petites particules. En effet, au-delà d'une taille critique, la taille apparente n'est plus fonction que de la position par rapport au plan focal, mais aussi de la taille réelle de la particule. Cette taille critique dépend du système optique complet. Cette approche permet donc de réaliser un suivi de particules en trois dimensions avec une seule caméra et est décrite dans les documents : " Particle depth measurement based on depth-from-defocus. 1999, S.Murata. and M.Kawamura., . Optics & Laser Technology, 31(1), pp.95–102 ". et. " Three-dimensional fluorescent particle tracking at micron-scale using a single camera. 2005, M.Wu, J.W.Roberts and M.Buckley., Experiments in Fluids, 38(4), pp.461–465 ".

Toutefois la taille apparente des particules défocalisées étant nettement supérieure à celle de particules focalisées, ces techniques ne permettent pas de mesurer des niveaux élevés de concentration de particules à cause du phénomène du chevauchement. Pour limiter cet effet, les techniques suivantes ont été développées.

La première, consultable au travers du document « Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows, 2000, M.Maeda, T.Kawaguchi and K.Hishida, Measurement. Science and. Technology 11 L13-L18 » décrit une méthode de détection de particules et de suivi de l'évolution du profil de vitesse basée sur le principe de compression optique au moyen d'un système optique comportant une ouverture rectangulaire, un objectif, une paire de lentilles cylindriques et une caméra d'acquisition. La paire de lentilles est positionnée entre l'objectif et la caméra de manière à générer une image floue sur le plan de focale. L'ouverture rectangulaire est positionnée en amont de l'objectif de manière à ajuster l'angle d'incidence et à améliorer la profondeur de champ. La détermination de la vitesse d'écoulement du fluide est obtenue par une combinaison des techniques PIV (Particle Image Velocimetry) et PTV (Particle Tracking Velocimetry) connues.

Il est également connue une deuxième méthode décrite dans le document « Three-dimensional particle imaging by defocusing method with an annular aperture , 2008, D. Lin, Optics Letters 33(9) :905-7 ". Toujours basée sur le principe de

défocalisation optique, cette technique permet de déterminer le nombre de particules dans un volume donné au moyen d'un système optique composé d'un disque opaque, d'un d'objectif et d'une caméra, le disque opaque étant positionné en amont de l'objectif et présentant une ouverture annulaire. Cette méthode de visualisation permet d'augmenter la quantité de particules détectables et sa combinaison avec les méthodes de détection décrite dans le précité document est particulièrement adaptée pour des écoulements microscopiques très simples, peu rapide et peu turbulent, de type sédimentation.

Toutefois, cette méthode ne permet pas de déterminer de manière précise la concentration des particules et ne permet pas de détecter des densités importantes de particules, notamment dans un écoulement plus rapide ou plus turbulent qu'un écoulement de particules de type sédimentation.

Par conséquent, de par leur incapacité à filtrer des particules fantômes au travers d'obstacles ou de par leur faible niveau de détection aucune des méthodes de détection connues et précitées n'est satisfaisante pour la détection précise en trois dimensions d'une grande densité de particules dans un écoulement autour d'obstacles.

## EXPOSE DE L'INVENTION

Dans ce contexte, l'invention vise à proposer un procédé et un système basés sur le principe de la défocalisation optique permettant d'améliorer la précision de détection, en évitant la détection de particules dites fantômes, ainsi que la densité de particules détectables par rapport aux méthodes connues.

A cette fin, l'invention a pour objet un système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement, le système étant caractérisé en ce qu'il comporte une première chaîne d'acquisition comportant une première lentille d'acquisition, un premier capteur photosensible et un premier obturateur formé par un disque opaque présentant au moins deux ouvertures en arc de cercle aptes à permettre la transmission de rayons lumineux vers ledit premier capteur photosensible, lesdites ouvertures étant inscrites sur un même cercle.

L'invention est particulièrement adaptée pour déterminer les champs de vitesses autour d'obstacles permettant l'obtention des champs de pression autour de ces derniers.

Le système de défocalisation selon l'invention permet d'améliorer la précision de détection des particules superposées, notamment par rapport au système optique décrit dans le document « Three-dimensional particle imaging by defocusing method with an annular aperture », 2008, D. Lin, Optics Letters 33(9) :905-7 ». Ainsi, grâce à l'implémentation de discontinuités dans le contour de l'obturateur, les simulations numériques d'imagerie montrent une augmentation de l'ordre de 50% de la précision sur la mesure de la taille de la particule et une diminution de l'ordre de 50% des erreurs de détection par rapport à un obturateur présentant une ouverture annulaire à sa périphérie, de manière identique au système optique décrit dans le document mentionné ci-dessus.

Cette augmentation significative de la précision de mesure sur la taille des particules et la diminution d'erreur de détection permettent ainsi d'augmenter le taux de détection de particules dans un écoulement et permet donc de pouvoir utiliser un tel dispositif pour la détection dans un écoulement plus rapide ou turbulent qu'un déplacement de particules de type sédimentation.

Le système optique selon l'invention peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous prises individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

- l'obturateur est positionné entre la lentille d'acquisition et le capteur photosensible ;
- l'obturateur est positionné au centre de la lentille d'acquisition ;
- le système comporte une deuxième chaîne d'acquisition comportant une deuxième lentille d'acquisition, un deuxième capteur photosensible et un deuxième obturateur formé par un disque opaque présentant au moins deux ouvertures en arc de cercle aptes à permettre la transmission de rayons lumineux vers ledit deuxième capteur photosensible, lesdites ouvertures étant inscrites sur un même cercle ; la première chaîne d'acquisition et la deuxième chaîne d'acquisition étant positionnées selon deux angles de mesure distincts par rapport à l'écoulement ;
- le système comporte une chaîne de post-traitement des images acquises par la ou les chaînes d'acquisition ;
- la chaîne de post-traitement comporte au moins : une unité de stockage, un calculateur et un afficheur.

L'invention a également pour objet un procédé de détermination en trois dimensions de la concentration minimum de particules dans un écoulement au

moyen d'un système optique selon l'invention comportant au moins une chaîne d'acquisition et une chaîne de post-traitement, le procédé comportant :

- une étape d'acquisition d'images au moyen de ladite au moins une chaîne d'acquisition ;
- 5        - une étape de corrélation de chaque image avec des canevas virtuels stockés dans l'unité de stockage de la chaîne de post-traitement, de manière à déterminer la position et la taille apparente des particules dans l'écoulement.

Avantageusement, le procédé de détermination en trois dimensions de la  
10 concentration de particules dans un écoulement comporte en outre une étape de d'affichage de la distribution volumique des particules dans l'écoulement sur des moyens d'affichage.

L'invention a également pour objet un procédé de détermination du profil de  
vitesse de particules dans un écoulement au moyen d'un système optique selon  
15 l'invention comportant au moins une chaîne d'acquisition et une chaîne de post-traitement, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte :

- une étape d'acquisition d'images au moyen de ladite au moins une chaîne d'acquisition ;
- une étape de corrélation de chaque image avec des canevas virtuels  
20 stockés dans l'unité de stockage de la chaîne de post-traitement, de manière à mesurer la taille apparente et en déterminer la position en trois dimensions dans l'écoulement ;
- une étape d'association spatio-temporelle des positions des particules à l'instant  $t$  et à l'instant  $t + dt$  sur deux images consécutives ;
- 25        - une étape de détermination au moyen d'un calculateur des champs de déplacements instantanés des particules par détermination du déplacement des centres des particules entre les deux images consécutives à l'instant  $t$  et à l'instant  $t + dt$  par corrélation croisée des images respectives des particules sous les deux instants.

## 30        **BREVES DESCRIPTION DES FIGURES**

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront plus clairement de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures suivantes :

La figure 1 illustre schématiquement une chaîne d'acquisition du système optique selon l'invention.

La figure 2 illustre schématiquement le principe de défocalisation optique sur la chaîne d'acquisition illustrée à la figure 1.

5 La figure 3 est une vue de face d'un obturateur de la chaîne d'acquisition illustrée à la figure 1.

La figure 4 est une image capturée par le système optique selon l'invention illustrant l'ensemble des particules présentes dans un écoulement.

10 Les figures 5a et 5b illustrent deux images capturées par le système optique selon l'invention d'une particule positionnée en amont du plan focale de la lentille d'acquisition et d'une particule positionnée en aval du plan focale de la lentille d'acquisition.

### **DESCRIPTION DETAILLEE D'AU MOINS UN MODE DE REALISATION**

15 La figure 1 illustre schématiquement une chaîne d'acquisition du système optique selon l'invention. La figure 2 illustre schématiquement le principe de défocalisation optique obtenu grâce à la chaîne d'acquisition du système optique selon l'invention.

La chaîne d'acquisition 100 du système optique selon l'invention comporte :

- 20 - une lentille d'acquisition 130 ;
- un capteur photosensible 110 ;
- un obturateur 120 positionné entre la lentille d'acquisition 130 et le capteur photosensible 110 de la chaîne d'acquisition 100.

La forme spécifique de l'obturateur 120 est illustrée de manière plus précise en référence à la figure 3.

25 L'obturateur 120 est formé par un disque opaque présentant à sa périphérie au moins deux ouvertures 121 en forme d'arc de cercle. Les ouvertures 121 permettent le passage des rayons lumineux vers le capteur photosensible comme illustré sur le schéma de principe de la figure 2. Avantageusement, les ouvertures 121 sont inscrites sur un même cercle et sont au nombre de trois comme  
30 représenté à titre d'exemple à la figure 3.

L'obturateur 120 en forme de disque est positionné au centre de la lentille d'acquisition 130. Grâce au système optique et notamment à la chaîne d'acquisition 100 décrite précédemment ainsi qu'au positionnement de l'obturateur, une particule P0 se trouvant dans l'écoulement à caractériser apparaît au niveau du capteur

photosensible 110 sous la forme d'un anneau discontinu et dont sa partie centrale est transparente.

La représentation sous la forme d'anneau discontinu permet avantageusement de détecter un plus grand nombre de particules dans un volume, les particules se superposant étant désormais visibles comme représenté sur le détail de la figure 4. Ainsi, dans le cas où plusieurs tailles de particules sont présentes simultanément, il est désormais possible grâce à l'invention de détecter une plus petite particule qui serait « cachée » derrière une particule plus grosse, ou différentes particules se superposant.

L'obturateur 120 est positionné et maintenu au centre de la lentille d'acquisition 130 par trois supports (non représentés) de manière à permettre le positionnement de l'obturateur précisément au milieu de la lentille 130. La précision de positionnement au centre de la lentille 130 permet également d'améliorer la précision de mesure.

Ainsi, les ouvertures 121 discontinues de l'obturateur 120 permettent d'améliorer davantage la précision de détection des particules superposées par rapport à la méthode décrite dans le document « three-dimensional particle imaging by defocusing method with an annular aperture », 2008, D. Lin, Optics Letters 33(9) :905-7Letters. Grâce à l'implémentation de discontinuités dans le contour de l'obturateur 120, on augmente de l'ordre de 50% la précision sur la mesure de la taille de la particule et on diminue de l'ordre de 50% des erreurs de détection par rapport à un obturateur présentant une ouverture annulaire à sa périphérie, comme décrit dans le document cité ci-dessus.

La précision de détection est également augmentée par la présence d'une deuxième chaîne d'acquisition (non représentée) similaire à la première chaîne d'acquisition 100 décrite précédemment. Avantageusement, les deux chaînes d'acquisition positionnées à 90° l'une de l'autre sont positionnées selon deux angles de mesure différents. Les deux chaînes d'acquisition permettent ainsi d'augmenter la densité de particules détectable, la précision de mesure par corrélation croisée des images des deux chaînes d'acquisition.

Les chaînes d'acquisition 100 sont reliées à une chaîne de traitement des données. La chaîne de traitement des données comporte :

- une unité de stockage pour stocker des images provenant des chaînes d'acquisition 100 ;

- un calculateur permettant :
  - d'associer à chaque image enregistrée par les chaînes d'acquisition 100 des canevas virtuels stockés dans l'unité de stockage de la chaîne de traitement des données de manière à déterminer la position et la taille des particules dans l'écoulement par rapport aux références des canevas ;
  - d'associer des positions spatio-temporelles aux particules à un instant  $t$  et à un instant  $t + dt$  sur plusieurs images consécutives ;
  - de déterminer des champs de déplacements instantanés des particules dans l'écoulement par détermination du déplacement des centres des particules entre les deux images consécutives à l'instant  $t$  et à l'instant  $t + dt$ .
  - un moyen d'affichage, notamment pour afficher la distribution volumique des particules détectées dans l'écoulement ainsi que des champs de déplacement instantanés des particules dans l'écoulement permettant de déterminer l'évolution du profil de vitesse des particules dans l'écoulement.

Le système optique selon l'invention est donc adapté pour déterminer la concentration des particules dans un écoulement mais également pour déterminer la vitesse instantanée des particules dans cet écoulement.

Enfin, par rapport à la méthode de compression optique, le dispositif selon l'invention a pour avantage d'améliorer la précision de mesure de la taille des particules par la mesure selon deux directions grâce aux deux chaînes d'acquisition. Grâce à l'invention, le bruit de fond lié à la superposition des particules est fortement diminué et la densification du bruit dans le cadre de la compression optique est évitée.

Les ouvertures 121 discontinues de l'obturateur 120 ont également pour avantage de permettre l'acquisition d'images de particules situées de part et d'autre du plan focal objet de la lentille d'acquisition 130. En effet, grâce à la présence des ouvertures discontinues 121 sur le pourtour de l'obturateur 120, les particules apparaissent au niveau du capteur photosensible 110 sous la forme d'un anneau lumineux discontinu. Ainsi, la position des particules de part et d'autre du plan focal objet de la lentille d'acquisition est détectable grâce à la position des discontinues. En effet, grâce au dispositif selon l'invention, il apparaît que les positions des discontinuités sont symétriques par rapport au plan focal. Ainsi deux particules

situées à égale distance du plan focal seront détectés par le dispositif avec la même taille apparente mais avec une position des discontinuités différentes, comme représenté aux figures 5a et 5b, où l'image capturée illustrée à la figure 5a correspond par exemple à une particule située en amont du plan focal objet de la lentille d'acquisition 130 et l'image capturée illustrée à la figure 5b correspond à une particule située en aval du plan focal objet de la lentille d'acquisition 130.

La lentille d'acquisition 110, ou objectif d'acquisition pouvant comporter une pluralité de lentilles d'acquisition, est choisie préférentiellement de manière à obtenir des images de qualité identique de particules situées de part et d'autre du plan focal objet de la lentille.

Grâce à cette propriété particulièrement avantageuse du dispositif selon l'invention :

- l'intervalle de taille des particules détectées est minimisé à volume étudié équivalent ; ce qui permet de détecter une plus grande quantité de particules de manière homogène dans le volume, les performances de l'algorithme de détection diminuant avec l'augmentation de la taille apparente des particules ;
- la chaîne d'acquisition est avantageusement focalisée au milieu du volume à étudier ce qui limite les phénomènes de distorsion optique et la perte de lumière liée au principe de défocalisation ;
- le temps de détection est diminué ;

L'invention a également pour avantage :

- de permettre la réalisation d'un montage simple et robuste (c'est à dire répétable) ne nécessitant que deux chaînes d'acquisition ;
- de permettre la réalisation d'un montage peu coûteux avec une grande précision de mesure ;
- d'améliorer la détection des particules superposées par rapport aux méthodes connues ;
- de permettre la mesure de la taille apparente des particules en deux dimensions afin d'améliorer le positionnement en trois dimensions de la particule ;
- de mesurer le déplacement des particules autour d'obstacles là où des techniques de type tomographique échouent à cause de la présence de particules fantômes.

**REVENDICATIONS**

1. Système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement, le système étant caractérisé en ce qu'il comporte une première chaîne d'acquisition (100) comportant une première lentille d'acquisition (130), un premier capteur photosensible (110) et un premier obturateur (120) formé par un disque opaque présentant au moins deux ouvertures (121) en arc de cercle aptes à permettre la transmission de rayons lumineux vers ledit premier capteur photosensible (110), lesdites ouvertures (121) étant inscrites sur un même cercle.
2. Système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement selon la revendication précédente caractérisé en ce que l'obturateur (120) est positionné entre la lentille d'acquisition (130) et le capteur photosensible (110).
3. Système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement selon l'une des revendications précédente caractérisé en ce que l'obturateur (120) est positionné au centre de la lentille d'acquisition.
4. Système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement selon l'une des revendications précédente caractérisé en ce qu'il comporte une deuxième chaîne d'acquisition (100) comportant une deuxième lentille d'acquisition (130), un deuxième capteur photosensible (110) et un deuxième obturateur (120) formé par un disque opaque présentant au moins deux ouvertures (121) en arc de cercle aptes à permettre la transmission de rayons lumineux vers ledit deuxième capteur photosensible (110), lesdites ouvertures (121) étant inscrites sur un même cercle ; la première chaîne d'acquisition (100) et la deuxième chaîne d'acquisition (100) étant positionnées selon deux angles de mesure distincts par rapport à l'écoulement.

5. Système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement selon l'une des revendications précédente caractérisé en ce qu'il comporte une chaîne de post-traitement des images acquises par la ou les chaînes d'acquisition (100).
6. Système optique pour la détermination en trois dimensions du profil de vitesse et de la concentration minimum de particules dans un écoulement selon la revendication précédente caractérisé en ce que la chaîne de post-traitement comporte au moins : une unité de stockage, un calculateur et un afficheur.
7. Procédé de détermination en trois dimensions de la concentration minimum de particules dans un écoulement au moyen d'un système optique selon l'une des revendications 1 à 6 comportant au moins une chaîne d'acquisition et une chaîne de post-traitement, le procédé comportant :
- une étape d'acquisition d'images au moyen de ladite au moins une chaîne d'acquisition ;
  - une étape de corrélation de chaque image avec des canevas virtuels stockés dans l'unité de stockage de la chaîne de post-traitement, de manière à déterminer la position et la taille apparente des particules dans l'écoulement.
8. Procédé de détermination en trois dimensions de la concentration minimum de particules dans un écoulement selon la revendication 7 caractérisé en ce qu'il comporte une étape de d'affichage de la distribution volumique des particules dans l'écoulement sur des moyens d'affichage.
9. Procédé de détermination du profil de vitesse de particules dans un écoulement au moyen d'un système optique selon l'une des revendications 1 à 6 comportant au moins une chaîne d'acquisition et une chaîne de post-traitement, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte :
- une étape d'acquisition d'images au moyen de ladite au moins une chaîne d'acquisition ;
  - une étape de corrélation de chaque image avec des canevas virtuels stockés dans l'unité de stockage de la chaîne de post-traitement, de

manière à déterminer la position et la taille apparente des particules dans l'écoulement ;

- une étape d'association spatio-temporelle des positions des particules à l'instant  $t$  et à l'instant  $t + dt$  sur deux images consécutives ;
- 5      - une étape de détermination au moyen d'un calculateur des champs de déplacements instantanés des particules par détermination du déplacement des centres des particules entre les deux images consécutives à l'instant  $t$  et à l'instant  $t + dt$ .

1/2

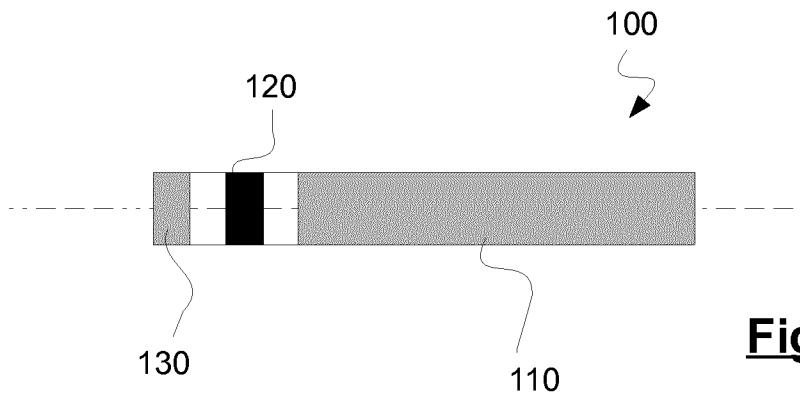


**Fig. 1**

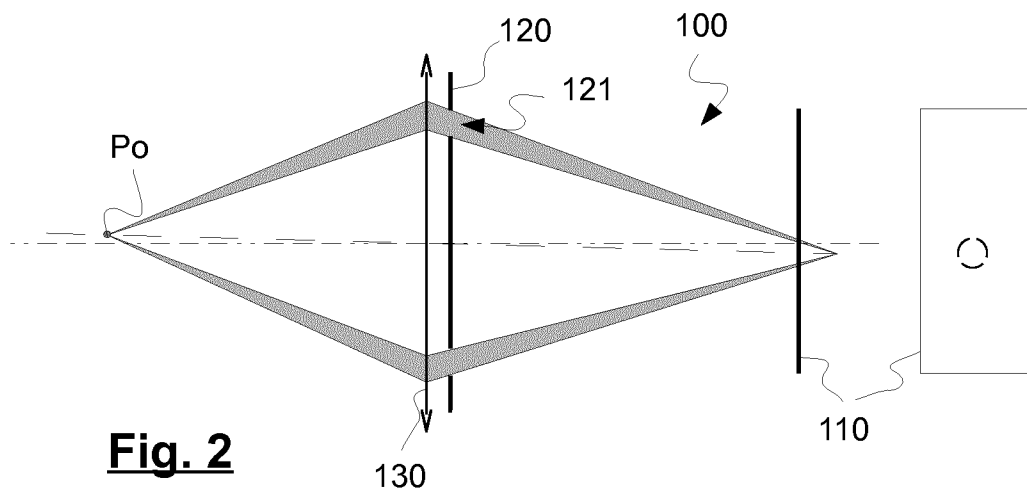


**Fig. 2**

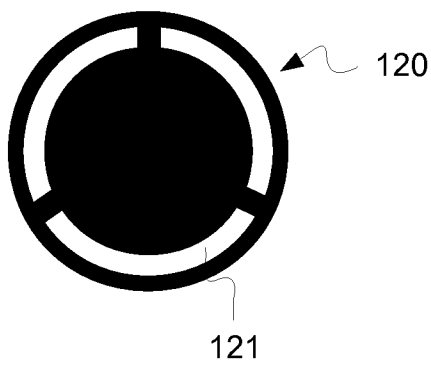


**Fig. 3**

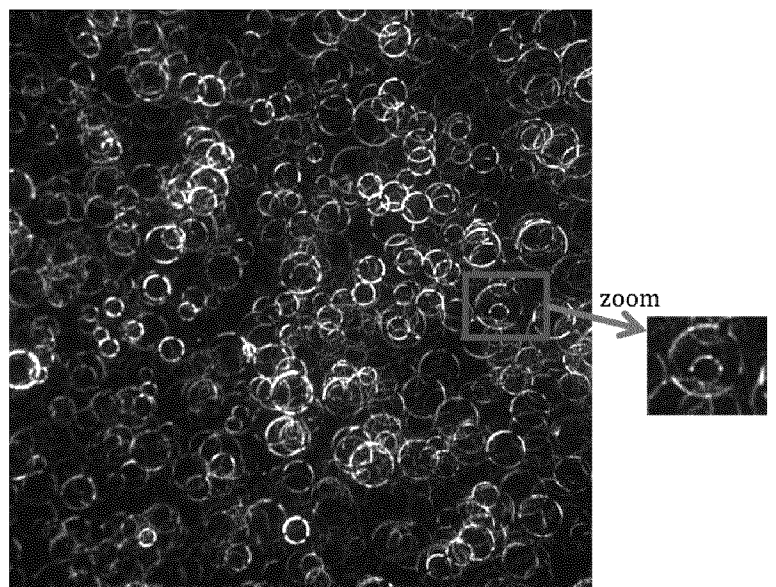


**Fig. 4**

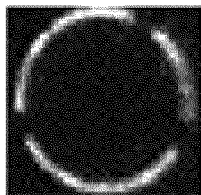


**Fig. 5a**

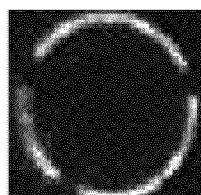


**Fig. 5b**

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2014/075366A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
INV. G01N15/06  
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                                                 | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X         | DEJIAO LIN ET AL: "Three-dimensional particle imaging by defocusing method with an annular aperture", OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US, vol. 33, no. 9, 1 May 2008 (2008-05-01), pages 905-907, XP001522552, ISSN: 0146-9592, DOI: 10.1364/OL.33.000905 cited in the application the whole document<br>-----<br>-/-- | 1-9                   |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&amp;" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

6 March 2015

Date of mailing of the international search report

17/03/2015

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Mauritz, Jakob

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2014/075366

| C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                       |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Category*                                            | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Relevant to claim No. |
| A                                                    | <p>MASANOBU MAEDA ET AL: "RAPID COMMUNICATION; Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows; Size and velocity distributions of spherical particles", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, vol. 11, no. 12, 1 December 2000 (2000-12-01), pages L13-L18, XP020063097, ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/101 cited in the application the whole document</p> <p>-----</p> | 1-9                   |

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2014/075366

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE</b><br>INV. G01N15/06<br>ADD.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| <b>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</b><br>Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)<br>G01N                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)<br>EPO-Internal                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| <b>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| Catégorie*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | no. des revendications visées                |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | DEJIAO LIN ET AL: "Three-dimensional particle imaging by defocusing method with an annular aperture", OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US, vol. 33, no. 9, 1 mai 2008 (2008-05-01), pages 905-907, XP001522552, ISSN: 0146-9592, DOI: 10.1364/OL.33.000905 cité dans la demande le document en entier<br><div style="text-align: center; margin-top: 10px;">             -----<br/>             -/--           </div> | 1-9                                          |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents         </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe         </div> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>* Catégories spéciales de documents cités:</p> <p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément</p> <p>"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier</p> <p>"&amp;" document qui fait partie de la même famille de brevets</p> </div> </div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |
| Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                              |
| 6 mars 2015                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 17/03/2015                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                              |
| Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale<br>Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL - 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31-70) 340-2040,<br>Fax: (+31-70) 340-3016                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Fonctionnaire autorisé<br><br>Mauritz, Jakob |

| C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                               |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Catégorie*                                      | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | no. des revendications visées |
| A                                               | <p>MASANOBU MAEDA ET AL: "RAPID COMMUNICATION; Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows; Size and velocity distributions of spherical particles", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, vol. 11, no. 12, 1 décembre 2000 (2000-12-01), pages L13-L18, XP020063097, ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/101 cité dans la demande le document en entier</p> <p>-----</p> | 1-9                           |