

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication : **3 086 758**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **18 58952**

⑤1 Int Cl⁸ : **G 01 N 15/14 (2018.01), G 03 H 1/08**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 PROCÉDE ET DISPOSITIF D'OBSERVATION D'UN ECHANTILLON SOUS LUMIERE AMBIANTE.

②2 Date de dépôt : 28.09.18.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 03.04.20 Bulletin 20/14.

④5 Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 02.10.20 Bulletin 20/40.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public — FR.

⑦2 Inventeur(s) : BORDY THOMAS.

⑦3 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public.

⑦4 Mandataire(s) : INNOVATION COMPETENCE GROUP.

FR 3 086 758 - B1



Procédé et dispositif d'observation d'un échantillon sous lumière ambiante

Description

DOMAINE TECHNIQUE

- 5 Le domaine technique de l'invention est lié à l'observation d'un échantillon, en particulier un échantillon biologique, par un dispositif d'imagerie fonctionnant à la lumière ambiante.

ART ANTERIEUR

L'observation d'échantillons, et en particulier des échantillons biologiques, par imagerie sans
10 lentille, connaît un développement important depuis ces dix dernières années. Cette technique permet d'observer un échantillon en le disposant entre une source de lumière et un capteur d'image, sans disposer de lentille de formation d'image entre l'échantillon et le capteur d'image. Ainsi, le capteur d'image collecte une image d'une onde lumineuse transmise par l'échantillon, sans conjugaison entre le capteur d'image et l'échantillon.

15 Le document WO2008090330 décrit par exemple un dispositif permettant l'observation de particules biologiques, par imagerie sans lentille. Les particules biologiques sont par exemple des cellules. Le dispositif permet d'associer, à chaque cellule, une figure d'interférence dont la morphologie permet d'identifier le type de cellule. L'imagerie sans lentille apparaît alors comme une alternative simple, et peu onéreuse, à un microscope classique. De plus, elle confère un
20 champ d'observation nettement plus important que ne peut l'être celui d'un microscope.

Dans le domaine visible, l'imagerie sans lentille a été appliquée pour examiner des échantillons comportant des particules, en particulier des particules biologiques ou des cellules, à des fins de caractérisation. On trouvera des exemples dans WO2017178723, WO2016151248, ou
25 WO2016151249. Le recours à l'imagerie sans lentille à des fins de comptage de particule est décrit dans WO2018115734 ou dans WO2015166009, ou dans WO2018060589.

Les documents WO2016189257 ou EP3199941 décrivent l'utilisation de l'imagerie sans lentille pour la caractérisation de lames de tissus, de type lames d'anatomo-pathologie.

Dans ces documents précédemment cités, l'imagerie sans lentille est mise en œuvre dans des longueurs d'onde visible. Afin de se prémunir de la lumière ambiante, les dispositifs sont tels
30 que les principaux composants (source de lumière, capteur d'image), ainsi que l'échantillon, sont confinés dans une enceinte étanche à la lumière.

Les inventeurs proposent un dispositif simple à mettre en œuvre, et permettant de relâcher la contrainte d'isolement du capteur à l'égard de la lumière ambiante. Il en résulte une plus grande facilité d'utilisation.

5 **EXPOSE DE L'INVENTION**

Un premier objet de l'invention est un procédé d'observation d'un échantillon, l'échantillon étant disposé entre une source de lumière et un capteur d'image, comportant de préférence au moins 10000 pixels, la source de lumière émettant un faisceau d'illumination, se propageant jusqu'à l'échantillon, le faisceau d'illumination étant émis selon une bande spectrale
10 d'illumination s'étendant en dessus de 800 nm, le procédé comportant les étapes suivantes :

- a) illumination de l'échantillon par la source de lumière ;
- b) acquisition d'une image de l'échantillon par le capteur d'image;
- c) le capteur d'image étant configuré de telle sorte qu'il présente une bande spectrale de
15 détection, bloquant les longueurs d'onde dans une bande spectrale visible, s'étendant au moins entre 400 nm et 750 nm, ou au moins entre 400 nm et 780 nm.

Ainsi, l'acquisition d'image peut être effectuée en lumière ambiante, le capteur d'image étant exposé à un éclairage dans la bande spectrale visible.

Selon un mode de réalisation, aucune optique de formation d'image n'est disposée entre l'échantillon et le capteur d'image. Selon un autre mode de réalisation, le dispositif comporte
20 un système optique, disposé entre l'échantillon et le capteur d'image, le système optique présentant un plan focal objet et un plan focal image. Le dispositif est alors tel que :

- le plan focal objet est décalé par rapport à un plan selon lequel s'étend l'échantillon, d'une distance de focalisation, de préférence comprise entre 10 μm et 2 mm ;
- et/ou le plan focal image est décalé par rapport au plan de détection, selon une distance
25 de focalisation, de préférence comprise entre 10 μm et 2 mm.

Quel que soit le mode de réalisation, le procédé peut comprendre l'une quelconque des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon les combinaisons techniquement réalisables :

- la bande spectrale de détection est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm
30 et 1000 nm ;
- la bande spectrale d'illumination est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm et 1000 nm ;

- la bande spectrale d'illumination s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm ;
- la bande spectrale de détection s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm ;
- 5 - la bande spectrale de détection est définie par un filtre de détection passe-haut ou passe-bande, disposé sur le capteur d'image, le filtre de détection étant configuré pour bloquer les longueurs d'onde dans la bande spectrale visible ; le filtre de détection peut notamment être disposé entre le capteur d'image et l'échantillon ;
- la bande spectrale d'illumination est définie par un filtre d'illumination, couplé à la
10 source de lumière ; le filtre d'illumination peut notamment être disposé entre la source de lumière et l'échantillon ;
- lors de l'étape b), le capteur d'image est exposé à une onde lumineuse d'exposition ; le procédé peut alors comporter une application d'un opérateur de reconstruction holographique à l'image acquise lors de l'étape b), de façon à obtenir une image
15 représentative d'une expression complexe de l'onde lumineuse d'exposition. L'expression complexe peut être définie selon une surface de reconstruction, par exemple un plan de reconstruction, s'étendant face au capteur d'image, à une distance de reconstruction non nulle de ce dernier. La surface de reconstruction est de préférence un plan selon lequel s'étend l'échantillon. L'application de l'opérateur de
20 reconstruction holographique peut être réalisée en mettant en œuvre un algorithme itératif de reconstruction holographique, de façon à déterminer une phase de l'onde lumineuse d'exposition dans le plan de l'échantillon ou dans un plan de détection selon lequel s'étend le capteur d'image.

Un deuxième objet de l'invention est un dispositif d'observation d'un échantillon, comportant :

- 25 - une source de lumière, configurée pour émettre un faisceau d'illumination se propageant vers l'échantillon, selon une bande spectrale d'illumination ;
- un capteur d'image pixellisé, comportant de préférence au moins 10000 pixels, et configuré pour acquérir une image dans une bande spectrale de détection ;
- un support, agencé pour maintenir l'échantillon entre la source de lumière et le capteur
30 d'image ;

le dispositif étant configuré de telle sorte qu'aucune optique de formation d'image n'est disposé entre le capteur d'image et l'échantillon lorsque l'échantillon est maintenu sur le support ;

le dispositif étant caractérisé en ce que :

- la bande spectrale de détection s'étend au-delà de 800 nm ;
- la bande spectrale de détection bloque les longueurs d'onde dans une bande spectrale visible, s'étendant au moins entre 400 nm et 750 nm, ou au moins entre 400 nm et 780 nm.

5 Selon un mode de réalisation, aucune optique de formation d'image n'est disposée entre l'échantillon et le capteur d'image. Selon un autre mode de réalisation, le dispositif comporte un système optique, disposé entre l'échantillon et le capteur d'image, le système optique présentant un plan focal objet et un plan focal image. Le dispositif est alors tel que :

- le plan focal objet est décalé par rapport à un plan selon lequel s'étend l'échantillon, d'une distance de focalisation, de préférence comprise entre 10 μm et 2 mm ;
- et/ou le plan focal est décalé par rapport au plan de détection, selon une distance de focalisation, de préférence comprise entre 10 μm et 2 mm.

Quel que soit le mode de réalisation, le procédé peut comprendre l'une quelconque des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon les combinaisons techniquement réalisables.

- la bande spectrale de détection est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm et 1000 nm;
- le capteur d'image est couplé à un filtre de détection, définissant la bande spectrale de détection;
- la bande spectrale d'illumination est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm et 1000 nm;
- la bande spectrale d'illumination s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm ;
- la bande spectrale de détection s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm;
- la source de lumière est une source de lumière laser ;
- la source de lumière est une diode électroluminescente ;
- la source de lumière est couplée à un filtre d'illumination, le filtre d'illumination définissant la bande spectrale d'illumination.
- le dispositif comporte une unité de traitement configurée pour appliquer un opérateur de reconstruction holographique à l'image acquise par le capteur d'image, de façon à obtenir une image complexe d'une onde lumineuse d'exposition à laquelle est exposé le capteur d'image lors de l'acquisition de l'image.

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, et représentés sur les figures listées ci-dessous.

FIGURES

5 Les figures 1A et 1B sont des exemples de dispositif selon l'invention.

La figure 2 montre les bandes spectrales de transmission d'un filtre de Bayer.

Les figures 3A et 3B sont des exemples d'images respectivement acquises en utilisant un dispositif de référence selon l'art antérieur et selon l'invention. Les figures 3C et 3D sont des détails de régions d'intérêt respectivement délimitées sur les figures 3A et 3B. Les figures 3E et
10 3F sont des profils respectivement obtenus à partir des figures 3C et 3D, le long de lignes respectivement tracées sur ces dernières.

La figure 4 montre un autre mode de réalisation d'un dispositif.

EXPOSE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

La figure 1A représente un exemple de dispositif 1 permettant une mise en œuvre de l'invention.

15 Une source de lumière 11 est configurée pour émettre un faisceau lumineux 12, dit faisceau d'illumination, se propageant en direction d'un échantillon 10. Le faisceau d'illumination atteint l'échantillon en se propageant selon un axe de propagation Z.

Le faisceau d'illumination est émis selon une bande spectrale d'illumination $\Delta\lambda_{12}$. La bande spectrale d'illumination $\Delta\lambda_{12}$ s'étend de préférence en dehors de la bande spectrale visible. Par
20 bande spectrale visible, on entend une bande spectrale comprise entre 400 nm et 750 nm, ou entre 400 et 780 nm. De préférence, la bande spectrale d'illumination $\Delta\lambda_{12}$ s'étend de entre 750 nm ou 780 nm et 10 μm , et de préférence entre 800 nm et 10 μm , et de préférence entre 750 nm voire 800 nm et 5 μm , et encore de préférence entre 750 nm voire 800 nm et 2 μm , ou entre 750 nm voire 800 nm et 1200 nm, ou entre 750 nm voire 800 nm et 1000 nm.

25 Par s'étendre entre m et n , m et n représentant des valeurs de longueur d'onde, il est entendu que plus de 80% de l'intensité de la lumière émise, voire plus de 90% ou 95% de l'intensité émise, est comprise entre m et n . Le terme s'étendre entre m et n ne signifie pas forcément s'étendre de m jusqu'à n .

L'échantillon 10 est un échantillon que l'on souhaite caractériser. Il comprend notamment un
30 milieu 10_m dans lequel baignent des particules 10_p . Le milieu 10_m peut être un milieu liquide. Il peut comprendre un liquide corporel, obtenu par exemple à partir de sang ou d'urine ou de

lymphe ou de liquide céphalorachidien. Il peut également s'agir d'un milieu de culture, comportant des nutriments permettant le développement de microorganismes ou de cellules.

Par particule, on entend notamment, et de façon non exhaustive :

- 5 - une cellule, qu'il s'agisse d'une cellule de culture ou une cellule corporelle, par exemple une cellule sanguine ;
- un microorganisme, par exemple une bactérie ou une levure ou une microalgue ;
- une particule solide, par exemple une microbille, la microbille pouvant être fonctionnalisée, de façon à favoriser un greffage avec un analyte ;
- 10 - une particule formant une émulsion dans le milieu 10_m , en particulier une particule insoluble dans le milieu 10_m , un exemple étant une gouttelette lipidique dans un milieu aqueux.

Une particule 10_p peut être solide ou liquide.

L'échantillon 10 peut être une fine lame de tissu biologique, telle d'une lame d'anatomopathologie. L'épaisseur d'une telle lame est de l'ordre de quelques dizaines de microns.

- 15 L'échantillon 10 est, dans cet exemple, contenu dans une chambre fluidique 15. La chambre fluidique 15 est par exemple une chambre fluidique de type Gene Frame® d'épaisseur $e=250 \mu\text{m}$. L'épaisseur e de l'échantillon 10, selon l'axe de propagation, varie typiquement entre $10 \mu\text{m}$ et 1cm , et est de préférence comprise entre $20 \mu\text{m}$ et $500 \mu\text{m}$. L'échantillon s'étend selon un plan P_{10} , dit plan de l'échantillon. Le plan de l'échantillon P_{10} est de préférence
- 20 perpendiculaire à l'axe de propagation Z , ou sensiblement perpendiculaire à ce dernier. Par sensiblement perpendiculaire, on entend perpendiculaire à une tolérance angulaire près, par exemple à $\pm 10\%$ ou $\pm 20\%$ près. Le plan de l'échantillon est défini par les axes X et Y représentés sur les figures 1A et 1B. L'échantillon est maintenu sur un support 10_s à une distance d d'un capteur d'image 20.

- 25 La distance D entre la source de lumière 11 et la chambre fluidique 15 est de préférence supérieure à 1cm . Elle est de préférence comprise entre 2 et 30cm . Avantagusement, la source de lumière 11, vue par l'échantillon, est considérée comme ponctuelle. Cela signifie que son diamètre (ou sa diagonale) est préférentiellement inférieur au dixième, mieux au centième de la distance entre la chambre fluidique 15 et la source de lumière. Sur la figure 1A, la source de
- 30 lumière est une diode électroluminescente. Elle est généralement associée à diaphragme 18, ou filtre spatial. L'ouverture du diaphragme est typiquement comprise entre $5 \mu\text{m}$ et 1mm , de préférence entre $50 \mu\text{m}$ et $500 \mu\text{m}$.

Le diaphragme peut être remplacé par une fibre optique, dont une première extrémité est placée face à la source de lumière 11 et dont une deuxième extrémité est placée en regard de l'échantillon 10. Le dispositif représenté sur la figure 1A comporte également un diffuseur 17, disposé entre la source de lumière 11 et le diaphragme 18. L'usage d'un tel diffuseur permet de
 5 s'affranchir de contraintes de centrage de la source de lumière 11 par rapport à l'ouverture du diaphragme 18, comme décrit dans EP3221688.

Alternativement, la source de lumière peut être une source laser, telle une diode laser, comme représenté sur la figure 1B. Dans ce cas, il n'est pas utile de lui associer un filtre spatial ou un diffuseur.

10 De préférence, la bande spectrale d'illumination $\Delta\lambda_{12}$ s'étend selon une largeur de bande inférieure à 100 nm. Par largeur de bande spectrale, on entend une largeur à mi-hauteur de ladite bande spectrale. De préférence, la largeur de la bande spectrale d'illumination $\Delta\lambda_{12}$ est inférieure à 50 nm, voire inférieure ou égale à 20 nm.

L'échantillon 10 est disposé entre la source de lumière 11 et le capteur d'image 20. Le capteur
 15 d'image 20 définit un plan de détection P_0 , s'étendant de préférence parallèlement, ou sensiblement parallèlement au plan P_{10} selon lequel s'étend l'échantillon. Le terme sensiblement parallèlement signifie que les deux éléments peuvent ne pas être rigoureusement parallèles, une tolérance angulaire de quelques degrés, de l'ordre de $\pm 20^\circ$ ou $\pm 10^\circ$ étant admise.

Le capteur d'image 20 est apte à former une image I_0 de l'échantillon 10 selon le plan de
 20 détection P_0 . Dans l'exemple représenté, il s'agit d'un capteur d'image 20 comportant une matrice de pixels, de type CCD ou un CMOS. Le capteur d'image comporte un nombre de pixels de préférence supérieur à 10000, et de préférence supérieur à 100000. Le plan de détection P_0 s'étend de préférence perpendiculairement à l'axe de propagation Z. La distance d entre l'échantillon 10 et la matrice de pixels du capteur d'image 20 est préférentiellement comprise
 25 entre 50 μm et 2 cm, de préférence comprise entre 100 μm et 2 mm.

On remarque, dans ce mode de réalisation, l'absence d'optique de grossissement ou de formation d'image entre le capteur d'image 20 et l'échantillon 10. Cela n'empêche pas la présence éventuelle de microlentilles de focalisation au niveau de chaque pixel du capteur d'image 20, ces dernières n'ayant pas de fonction de grandissement de l'image acquise par le
 30 capteur d'image, leur fonction étant d'optimiser l'efficacité de détection.

Le capteur d'image 20 est configuré pour former une image dans une bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{20}$. Avantageusement, la bande spectrale de détection ne s'étend pas dans la bande spectrale visible, ou de façon négligeable. Elle s'étend de préférence entre 750 nm ou 780 nm et 10 μm , et de préférence entre 800 nm et 10 μm , et de préférence entre 750 nm voire 800 nm et 5 μm , et encore de préférence entre 750 nm voire 800 nm et 2 μm , ou entre 750 nm voire 800 nm et 1200 nm, ou entre 750 nm voire 800 nm et 1000 nm. Parce qu'elle s'étend en dehors dans la bande spectrale visible, la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{20}$ permet une acquisition de l'image lorsque le dispositif 1, et notamment le capteur d'image 20, est exposé à un éclairage ambiant, dans la bande spectrale visible. La bande spectrale de détection est configurée de telle sorte que l'image acquise par le capteur d'image 20 n'est pas affectée, ou de façon négligeable, par l'éclairage ambiant. Ainsi, le dispositif 1 peut être utilisé sans qu'il soit nécessaire de le disposer dans une enceinte étanche à la lumière. Il peut être utilisé à la lumière ambiante. Le niveau de lumière ambiante auquel le dispositif peut fonctionner dépend de la fraction de la bande spectrale visible détectée par le capteur d'image.

De préférence, la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{20}$ s'étend selon une largeur de bande inférieure à 100 nm. Par largeur de bande spectrale, on entend une largeur à mi-hauteur de ladite bande spectrale. De préférence, la largeur de la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{20}$ est inférieure à 50 nm, voire inférieure ou égale à 20 nm.

On comprend que la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{20}$ et la bande spectrale d'illumination $\Delta\lambda_{12}$ se recouvrent, au moins partiellement.

La bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{20}$ peut être définie par les propriétés intrinsèques des pixels. Le capteur d'image comporte alors des pixels aptes à détecter des photons uniquement dans la bande spectrale de détection. De façon plus simple, la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{20}$ peut être définie par filtre de détection 29, de type passe-haut ou passe-bande, disposé entre le capteur d'image 20 et l'échantillon 10. De façon analogue, la bande spectrale d'illumination $\Delta\lambda_{12}$ peut être définie par les propriétés intrinsèques de la source de lumière 11. Ceci est notamment le cas lorsque la source de lumière est un laser, comme représenté sur la figure 1B. La bande spectrale d'illumination peut être définie par un filtre d'illumination 19, disposé entre la source de lumière et l'échantillon. Le recours à un filtre d'illumination 19 est usuel lorsque la source de lumière 11 est une source de lumière blanche ou une diode électroluminescente.

Le capteur d'image 20 peut être un capteur CMOS de type "RGB", comportant des pixels dont la bande spectrale de détection est définie par un filtre de Bayer. Ainsi, les pixels du capteur

d'image sont respectivement sensibles dans des bandes spectrales correspondant aux couleurs rouge, verte et bleu de la bande spectrale visible. La figure 2 représente les bandes passantes de détection définies par le filtre de Bayer. L'axe des abscisses correspond à la longueur d'onde, exprimée en nm, tandis que l'axe des ordonnées correspond à la transmission, c'est-à-dire au pourcentage de flux lumineux transmis. Les courbes en pointillés, tirets et traits pleins correspondent respectivement aux bandes passantes dans le bleu, le vert et le rouge. Ce type de courbe est usuel dans le domaine des capteurs d'image RGB standard. On observe qu'au-delà de 850 nm, la transmission est équivalente dans chaque bande spectrale. Au-delà de 1000 nm, la transmission diminue. Aussi, lorsque le capteur d'image est un capteur RGB standard, il est préférable que la bande spectrale de détection soit comprise dans l'intervalle [750 nm – 1100 nm], et de préférence [850 nm – 1000 nm]. Il en est de même de la bande spectrale d'illumination. On dispose alors de pixels dont la transmission est uniforme, tout en étant suffisante pour former des images exploitables. Le capteur d'image 20 se comporte alors comme un capteur monochrome. Avec ce type de capteur d'image, comportant un filtre de Bayer, la bande spectrale de détection est définie par un filtre de détection 29 de type passe-bande, ou passe-haut, délimitant la bande passante de détection.

Comme évoqué dans les demandes citées dans l'art antérieur, sous l'effet de l'onde lumineuse incidente 12, les particules 10_p présentes dans l'échantillon peuvent engendrer une onde diffractée 13, susceptible de produire, au niveau du plan de détection P_0 , des interférences, en particulier avec une partie 12' de l'onde lumineuse incidente 12 transmise par l'échantillon. Par ailleurs, l'échantillon 10 peut absorber une partie de l'onde lumineuse incidente 12. Ainsi, l'onde lumineuse 14, transmise par l'échantillon, et à laquelle est exposé le capteur d'image 20, désignée par le terme "onde lumineuse d'exposition". L'onde lumineuse d'exposition 14 peut comprendre :

- une composante 13 résultant de la diffraction de l'onde lumineuse incidente 12 par chaque particule de l'échantillon ;
- une composante 12' résultant de la transmission de l'onde lumineuse incidente 12 par l'échantillon, une partie de cette dernière pouvant être absorbée dans l'échantillon.

Ces composantes forment des interférences dans le plan de détection. Aussi, l'image I_0 acquise par le capteur d'image comporte des figures d'interférences (ou figures de diffraction), chaque figure d'interférence pouvant être associée à une particule 10_p de l'échantillon.

Une unité de traitement 21, par exemple un microprocesseur, est apte à traiter chaque image I_0 acquise par le capteur d'image 20. En particulier, l'unité de traitement 21 est un

microprocesseur relié à une mémoire programmable 22 dans laquelle est stockée une séquence d'instructions pour effectuer les opérations de traitement d'images et de calculs décrites dans cette description. L'unité de traitement peut être couplée à un écran 24 permettant l'affichage d'images acquises par le capteur d'image 20 ou calculées par le processeur 21.

- 5 Une image I_0 acquise par le capteur d'image 20, également appelée hologramme, peut faire l'objet d'une reconstruction, dite reconstruction holographique. Comme décrit en lien avec l'art antérieur, on peut appliquer, à l'image acquise I_0 par le capteur d'image 20, un opérateur de propagation holographique h , de façon à calculer une amplitude complexe $A(x, y, z)$ représentative de l'onde lumineuse d'exposition 14, et cela en tout point de coordonnées
- 10 (x, y, z) de l'espace, et plus particulièrement entre le capteur d'image 20 et l'échantillon 10. Les coordonnées (x, y) désignent des coordonnées, dites coordonnées radiales, parallèlement au plan de détection P_0 . La coordonnée z est une coordonnée selon l'axe de propagation Z , traduisant une distance entre l'échantillon 10 et le capteur d'image 20.

L'amplitude complexe peut être obtenue par une des expressions suivantes :

- 15 $A(x, y, z) = I_0(x, y, z) * h$ * désignant l'opérateur produit de convolution, ou, et de préférence, $A(x, y, z) = \sqrt{I_0(x, y, z)} * h$, ou encore :
- $$A(x, y, z) = \frac{\sqrt{I_0(x, y, z)}}{\bar{I}_0} * h, \bar{I}_0 \text{ étant une moyenne de l'image acquise.}$$

- L'opérateur de propagation h a pour fonction de décrire la propagation de la lumière entre le capteur d'image 20 et un point de coordonnées (x, y, z) , situé à une distance $|z|$ du capteur
- 20 d'image. L'opérateur de propagation est par exemple la fonction de Fresnel-Helmholtz, telle que :

$$h(x, y, z) = \frac{1}{j\lambda z} e^{j2\pi\frac{z}{\lambda}} \exp(j\pi \frac{x^2+y^2}{\lambda z}).$$

Il est alors possible de déterminer une propriété de l'onde lumineuse d'exposition 14, par exemple le module $M(x, y, z)$ et/ou la phase $\varphi(x, y, z)$, à la distance $|z|$ avec :

- 25 - $M(x, y, z) = \text{abs} [A(x, y, z)]$;
 - $\varphi(x, y, z) = \text{arg} [A(x, y, z)]$;

Les opérateurs abs et arg désignent respectivement le module et l'argument.

La distance $|z|$ est une distance de reconstruction.

- L'expression complexe $A(x, y, z)$ de l'onde lumineuse 14, en tout point de coordonnées
- 30 (x, y, z) de l'espace, est telle que : $A(x, y, z) = M(x, y, z)e^{j\varphi(x, y, z)}$.

L'expression complexe A est une grandeur complexe dont l'argument et le module sont respectivement représentatifs de la phase et de l'intensité de l'onde lumineuse d'exposition 14.

En mettant en œuvre des algorithmes de reconstruction holographique, il est possible de déterminer l'expression complexe A selon un plan de reconstruction. Le plan de reconstruction est de préférence parallèle au plan de détection P_0 et/ou au plan de l'échantillon P_{10} . On obtient alors une image complexe A_z de l'onde lumineuse d'exposition 14 dans le plan de reconstruction.

- 5 Avantageusement, le plan de reconstruction est le plan P_{10} selon lequel s'étend l'échantillon 10. Afin d'obtenir une reconstruction holographique de bonne qualité, l'image acquise par le capteur d'image peut faire l'objet d'un algorithme de reconstruction itératif. Des algorithmes de reconstruction itératifs sont par exemple décrits dans WO2016189257 ou dans WO2017162985.

10 Il est possible de former des images M_z et φ_z représentant respectivement le module ou la phase d'une image complexe complexe A_z dans un plan P_z situé à une distance $|z|$ du plan de détection P_0 , avec $M_z = \text{mod}(A_z)$ et $\varphi_z = \text{arg}(A_z)$. Lorsque le plan de reconstruction P_z correspond à un plan selon lequel s'étend l'échantillon, les images M_z et φ_z permettent une observation de l'échantillon 10 avec une résolution spatiale correcte.

Essais

- 15 Un essai a été effectué en utilisant un dispositif de référence et un dispositif selon l'invention. Chaque dispositif comporte :

- une source de lumière LED infrarouge, émettant autour d'une longueur d'onde centrale égale à 980 nm, de largeur de bande 20nm (± 10 nm de part et d'autre de la longueur d'onde centrale);
- 20 - un capteur d'image CMOS 8 bits IDS UI-1492LE-M composé de 3884 x 2764 pixels carrés de côté 1.67 μm ;
- un diaphragme définissant une ouverture de 150 μm disposé au niveau de la source de lumière.

25 Le dispositif de référence est placé dans une chambre noire, formant une enceinte étanche à la lumière. Le dispositif selon l'invention comporte un filtre de détection 29 placé directement sur le capteur d'image, définissant une bande spectrale de détection centrée sur 980 nm et de largeur spectrale égale à 10 nm. Ainsi, la bande spectrale de détection s'étend entre 975 nm et 985 nm. Dans cet exemple, le dispositif selon l'invention est utilisé à la lumière du jour.

30 Un échantillon, comportant des particules micrométriques en solution aqueuse, a été disposé à une distance de 1.5 mm du capteur d'image. Les figures 3A et 3B sont respectivement des images acquises par le capteur d'image, respectivement avec le dispositif de référence, et avec le dispositif selon l'invention. Sur ces figures, on a délimité des zones d'intérêt par des cadres en

pointillés. Les figures 3C et 3D correspondent à des zooms pratiqués sur les régions d'intérêt. Les figures 3E et 3F montrent des profils d'intensité pratiqués à partir de chaque figure, le long d'une ligne en pointillés. Ces profils montrent que la qualité de l'image est équivalente avec les deux dispositifs.

- 5 Selon un autre mode de réalisation, schématisé sur la figure 4, un système optique 16 de formation d'image est disposé entre l'échantillon et le capteur d'image, le capteur d'image étant localisé selon une configuration dite défocalisée. L'optique de formation d'image 16 peut comporter une lentille ou un objectif. L'optique de formation d'image 16 définit un plan focal objet P_{obj} et un plan focal image P_{im} . Selon la configuration défocalisée :
- 10 - le plan focal objet P_{obj} est décalé du plan selon lequel s'étend l'échantillon selon une distance dite de défocalisation ;
- et/ou le plan focal image P_{im} est décalé du plan détection selon une distance dite de défocalisation ;

La distance de défocalisation peut être comprise entre 5 μm et 5 mm, et de préférence entre 10 μm et 2 mm. De la même manière qu'en configuration sans lentille, une telle configuration permet l'obtention d'une image dans laquelle des éléments diffractants de l'échantillon, par exemple des particules, apparaissent sous la forme de figures de diffraction, des interférences se produisant entre l'onde lumineuse émise par la source de lumière et se propageant jusqu'au capteur d'image et une onde de diffraction générée par chaque élément diffractant de l'échantillon. Dans l'exemple de la figure 4, le plan objet P_{obj} est confondu avec le plan de l'échantillon P_{10} . Le plan image P_{im} est décalé par rapport au plan de détection P_0 . Les caractéristiques décrites en lien avec le mode de réalisation représenté sur les figures 1A et 1B peuvent s'appliquer à la configuration défocalisée.

15

20

Toutefois, une configuration en imagerie sans lentille est préférée, par le plus grand champ d'observation qu'elle procure.

25

L'invention pourra être mise en œuvre pour l'observation d'échantillons dans le domaine de la biologie ou de la santé, ou dans d'autres domaines industriels, par exemple l'agroalimentaire, le contrôle de l'environnement.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'observation d'un échantillon (10), l'échantillon étant disposé entre une source de lumière (11) et un capteur d'image (20), comportant au moins 10000 pixels, la source de lumière émettant un faisceau d'illumination (12), se propageant jusqu'à l'échantillon, le faisceau lumineux d'illumination étant émis selon une bande spectrale d'illumination ($\Delta\lambda_{12}$) s'étendant en dessus de 800 nm, le procédé comportant les étapes suivantes :
- a) illumination de l'échantillon (10) par la source de lumière ;
 - b) acquisition d'une image de l'échantillon (I_0) par le capteur d'image (20), aucune optique de formation d'image n'étant disposée entre l'échantillon et le capteur d'image;
 - c) le capteur d'image étant configuré de telle sorte qu'il présente une bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$), bloquant les longueurs d'onde dans une bande spectrale visible, s'étendant au moins entre 400 nm et 750 nm, de telle sorte que l'acquisition d'image peut être effectuée en lumière ambiante.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$) est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm et 1000 nm.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la bande spectrale d'illumination ($\Delta\lambda_{12}$) est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm et 1000 nm.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :
- la bande spectrale d'illumination s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm ;
 - et/ou la bande spectrale de détection s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$) est définie par un filtre de détection (29) passe-haut ou passe-bande, disposé sur le capteur d'image, le filtre de détection étant configuré pour bloquer les longueurs d'onde dans la bande spectrale visible.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la bande spectrale d'illumination ($\Delta\lambda_{12}$) est définie par un filtre d'illumination (19), couplé à la source de lumière (11).

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lors de l'étape b), le capteur d'image est exposé à une onde lumineuse d'exposition (14), le procédé comportant une application d'un opérateur de reconstruction holographique (h) à l'image (I_0) acquise lors de l'étape b), de façon à obtenir une image (A_z) représentative d'une expression complexe de l'onde lumineuse d'exposition.

8. Dispositif (1) d'observation d'un échantillon (10), comportant :

- une source de lumière (11), configurée pour émettre un faisceau d'illumination se propageant vers l'échantillon, selon une bande spectrale d'illumination ($\Delta\lambda_{12}$);
- un capteur d'image pixellisé (20), comportant au moins 10000 pixels, et configuré pour acquérir une image (I_0) dans une bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$);
- un support (10s), agencé pour maintenir l'échantillon entre la source de lumière et le capteur d'image ;

le dispositif étant configuré de telle sorte qu'aucune optique de formation d'image n'est disposé entre le capteur d'image et l'échantillon lorsque l'échantillon est maintenu sur le support ;

15 le dispositif étant caractérisé en ce que :

- la bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$) s'étend au-delà de 800 nm ;
- la bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$) bloque les longueurs d'onde dans une bande spectrale visible, s'étendant au moins entre 400 nm et 750 nm.

9. Dispositif selon la revendication 8, dans lequel la bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$) est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm et 1000 nm.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9, dans lequel le capteur d'image est couplé à un filtre de détection (29), définissant la bande spectrale de détection.

11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 8 à 10, dans lequel la bande spectrale d'illumination ($\Delta\lambda_{12}$) est comprise entre 800 nm et 1200 nm ou entre 800 nm et 1000 nm.

25 12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 8 à 11, dans lequel :

- la bande spectrale d'illumination ($\Delta\lambda_{12}$) s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm ;
- et/ou la bande spectrale de détection ($\Delta\lambda_{20}$) s'étend selon une largeur de bande inférieure ou égale à 50 nm, et de préférence inférieure à 20 nm.

30 13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 8 à 12 dans lequel :

- la source de lumière (11) est une source de lumière laser ;

- ou la source de lumière est une diode électroluminescente couplée à un filtre d'illumination (19), le filtre d'illumination définissant la bande spectrale d'illumination.

14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 8 à 13, comportant une unité de traitement (21) configurée pour appliquer un opérateur de reconstruction holographique à l'image acquise par le capteur d'image, de façon à obtenir une image complexe d'une onde lumineuse d'exposition (14) à laquelle est exposé le capteur d'image lors de l'acquisition de l'image.

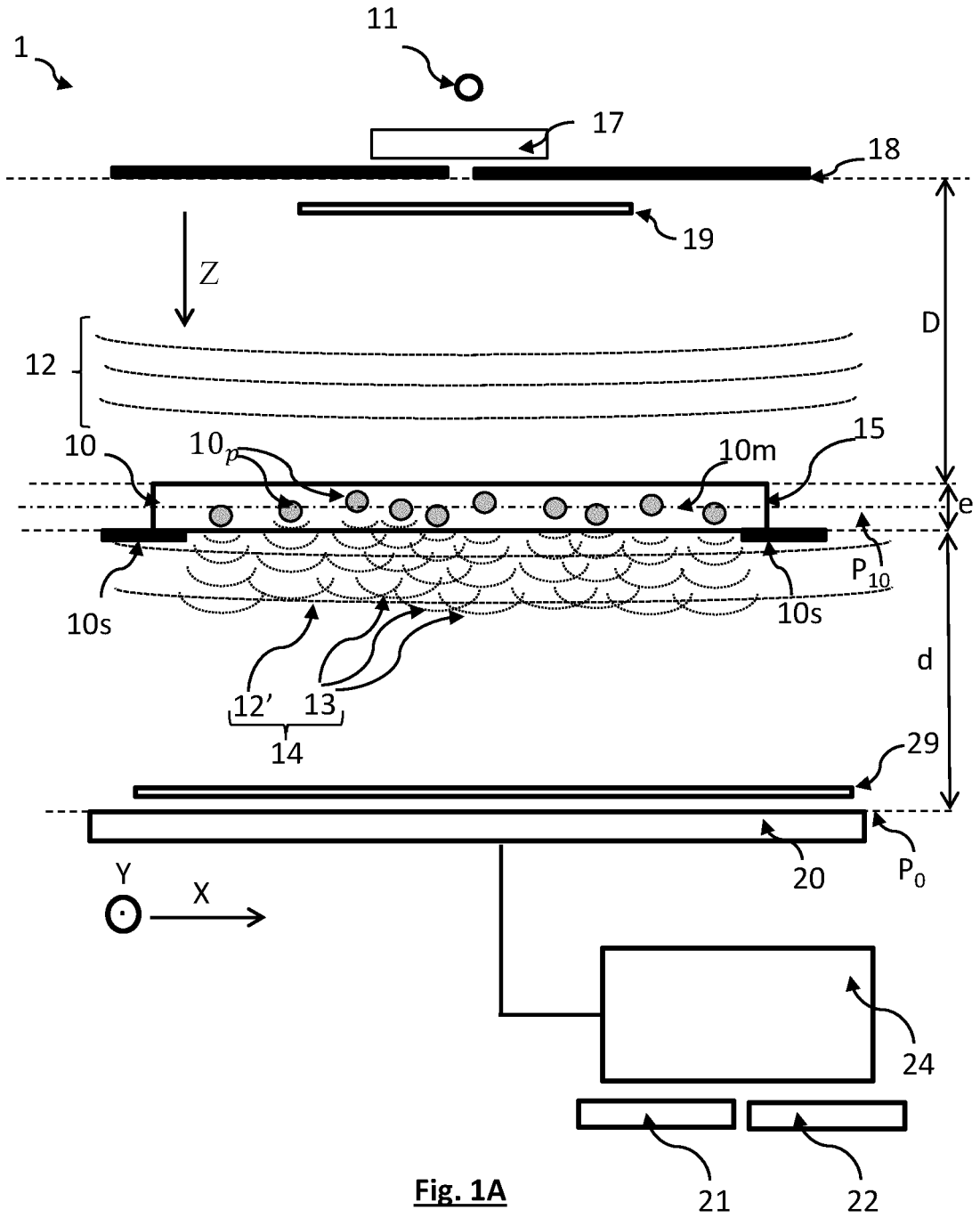


Fig. 1A

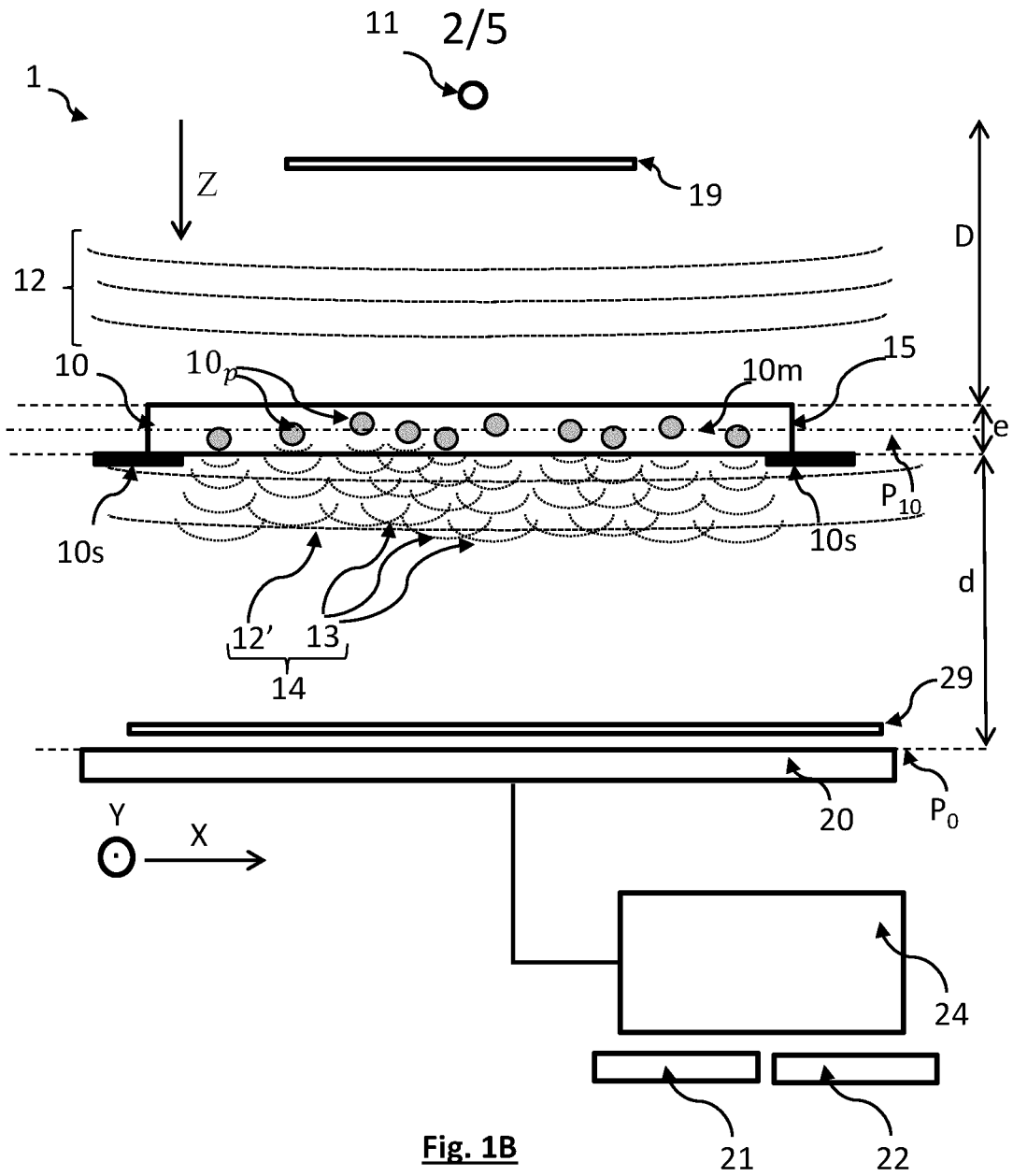


Fig. 1B

3/5

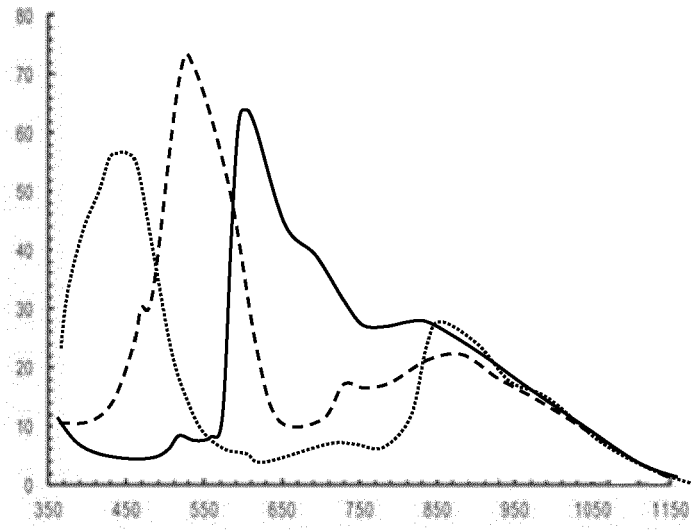


Fig. 2

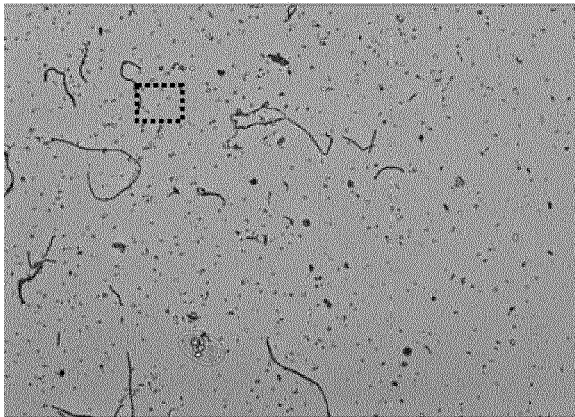


Fig. 3A

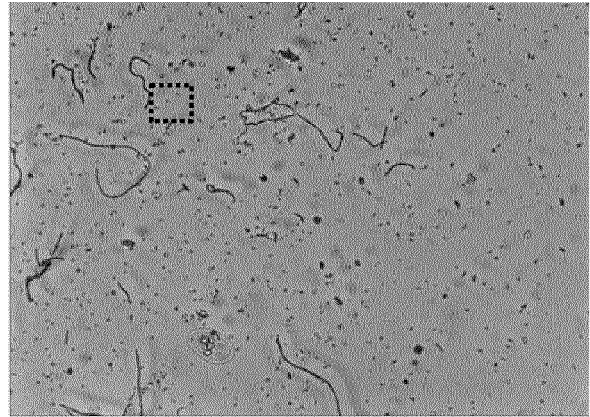


Fig. 3B

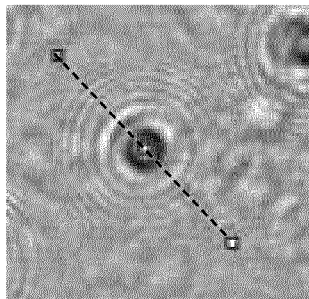


Fig. 3C

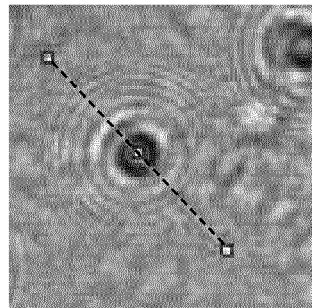


Fig. 3D

4/5

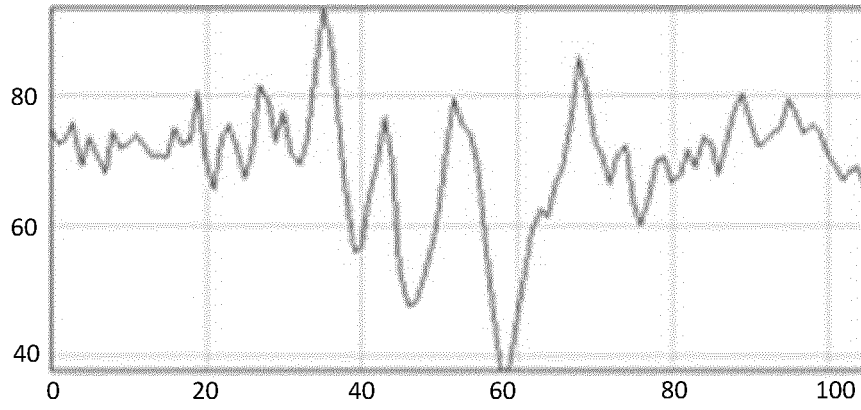


Fig. 3E

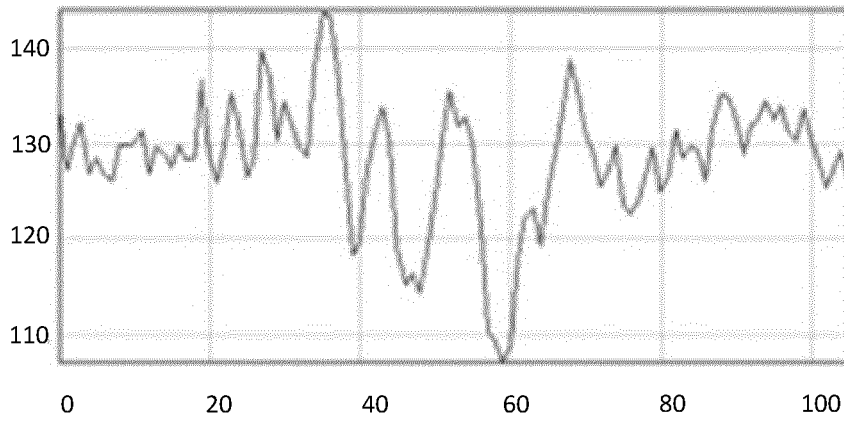


Fig. 3F

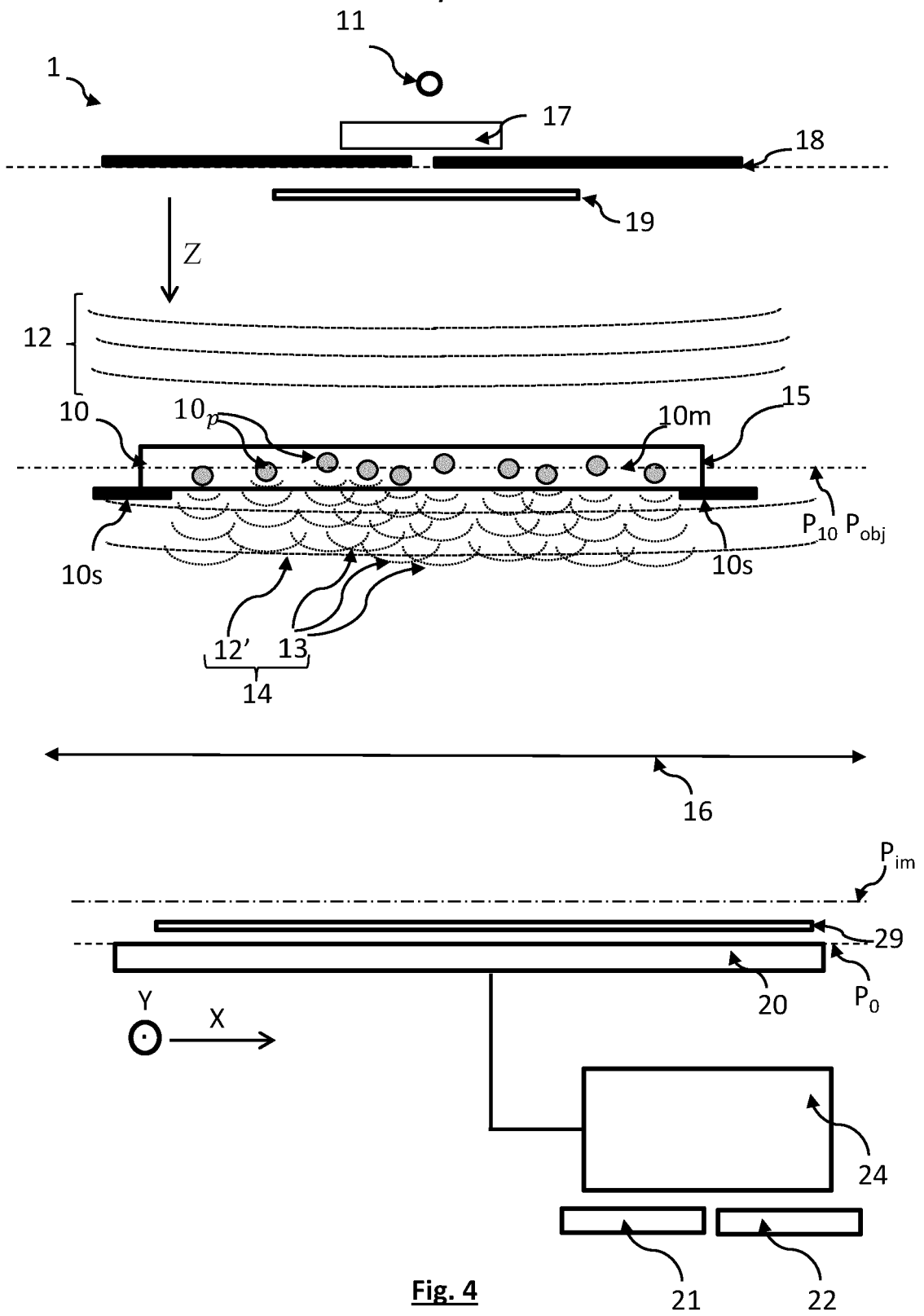


Fig. 4

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN
CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

US 2018/046139 A1 (STAHL RICHARD [BE] ET
AL) 15 février 2018 (2018-02-15)

WO 2016/078946 A1 (COMMISSARIAT À
L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES
ALTERNATIVES [FR])
26 mai 2016 (2016-05-26)

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT