



(51) Classification internationale des brevets :

G01B 9/02 (2006.01) G01B 11/30 (2006.01)

G01B 11/24 (2006.01) G01N 21/88 (2006.01)

G01B 11/25 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2017/051234

(22) Date de dépôt international :

19 mai 2017 (19.05.2017)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

1654500

20 mai 2016 (20.05.2016)

FR

(71) Déposants : UNIVERSITÉ D'AIX MARSEILLE

[FR/FR] ; 58 boulevard Charles Livon, 13284 Marseille Cedex 07 (FR). CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR] ; 3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16 (FR). ECOLE CENTRALE DE MARSEILLE [FR/FR] ; Technopôle de Château-Gombert, 38 rue Frédéric Joliot-Curie, 13013 Marseille (FR).

(72) Inventeurs : ZERRAD, Myriam ; 7 Rue des trois mages,

13013 Marseille (FR). AMRA, Claude ; 146 chemin de Palama, 13013 Marseille (FR). LEQUIME, Michel ; 580 chemin de la Bonde, 13120 Gardanne (FR).

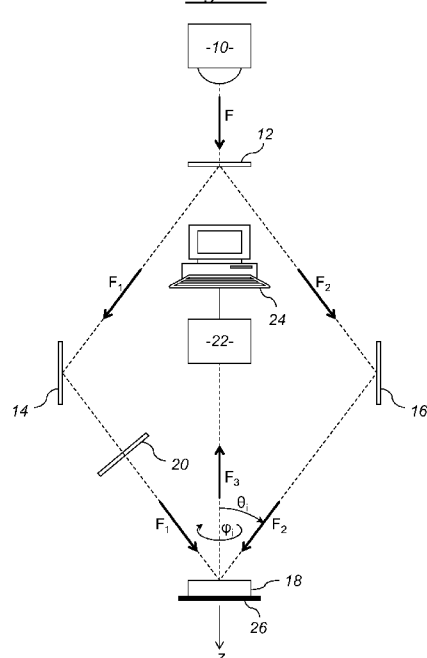
(74) Mandataire : BONNET, Michel ; Boîte n° 10, 93 rue Ré-

aumur, 75002 Paris (FR).

(54) Title: INSTRUMENT AND METHOD FOR MEASURING, VIA SCATTERING IN THE FAR FIELD, A SURFACE OR VOLUME STATE OF AN OBJECT

(54) Titre : INSTALLATION ET PROCEDE DE MESURE D'UN ETAT DE SURFACE OU DE VOLUME D'UN OBJET PAR DIFFUSION EN CHAMP LOINTAIN

Figure 1



(57) Abstract: This instrument comprises an object (18) and an apparatus for measuring a surface or volume finish of this object (18). The apparatus includes a device (10, 12, 4, 16, 20) for exposing the object to at least one beam of waves, a detector (22) for detecting waves scattered in the far field by the object in at least one direction in order to deliver at least one measurement signal, and a unit (24) for processing said at least one measurement signal in order to extract therefrom information on the surface or volume state of the object. The exposing device (10, 12, 14, 16, 20) is designed to generate two beams (F_1 , F_2) of waves, said beams being temporally coherent, related in phase, of non-normal incidence on the object, and symmetric with respect to each other. The detector (22) is placed so as to detect the resulting scattered waves (F_3) after interference in the direction (z) of the normal to the exposed volume or surface and the processing unit (24) is programmed to reconstruct a topography of the surface or of the volume of the exposed object (18) via calculation of an inverse Fourier transform on the basis of the measurement signal.

(57) Abrégé : Cette installation comprend un objet (18) et un appareil de mesure d'un état de surface ou de volume de cet objet (18). L'appareil comporte un dispositif (10, 12, 4, 16, 20) d'exposition de l'objet à au moins un faisceau d'ondes, un détecteur (22) d'ondes diffusées en champ lointain par l'objet dans au moins une direction pour la fourniture d'au moins un signal de mesure, et une unité de traitement (24) dudit au moins un signal de mesure pour en extraire une information sur l'état de surface ou de volume de l'objet. Le dispositif d'exposition (10, 12, 14, 16, 20) est conçu pour engendrer deux faisceaux d'ondes (F_1 , F_2) temporellement cohérents et liés en phase, d'incidences non normales sur l'objet et symétriques l'une de l'autre. Le détecteur (22) est placé de manière à détecter les ondes résultantes diffusées (F_3)

(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, DJ, 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, KH, KN, KP, KR, KW, 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), eurasién (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).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17(iv))*

Publiée:

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

après interférence dans la direction (z) de la normale à la surface ou au volume exposé et l'unité de traitement (24) est programmée pour reconstituer une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé (18) par un calcul de transformée de Fourier inverse à partir du signal de mesure.

INSTALLATION ET PROCEDE DE MESURE D'UN ETAT DE SURFACE OU DE VOLUME D'UN OBJET PAR DIFFUSION EN CHAMP LOINTAIN

La présente invention concerne une installation et un procédé de mesure d'un
5 état de surface ou de volume d'un objet par diffusion d'ondes en champ lointain.

De nombreux appareils et procédés sont connus pour, selon différentes technologies, mesurer un état de surface ou de volume, notamment un paramètre de rugosité, de façon non destructive et si possible non invasive. Ils sont en particulier utilisés pour l'analyse fine d'une rugosité de pièces à surfaces polies. Les ondes
10 employées peuvent s'étendre du domaine électromagnétique, incluant les rayonnements lumineux d'ondes visibles, au domaine des ondes de pression, incluant les ondes acoustiques et mécaniques. Les mesures d'états de surfaces, ou plus rarement d'états de volumes, sont par exemple stratégiques en optique de précision.

L'invention s'applique ainsi avantageusement au contrôle de qualité dans des chaînes de fabrication de pièces mécaniques en série pour lesquelles une qualité élevée de l'état de surface est requise et nécessite une vérification précise, pour détecter par exemple tout défaut de polissage. Elle s'applique également
15 avantageusement à l'étalonnage des procédés de polissage, qui sont eux aussi indispensables pour limiter les pertes par diffusion lumineuse dans les composants optiques (multicouches, réseaux, cristaux photoniques, ...). Par ailleurs, au vu de l'importance croissante de l'optronique dans l'industrie, notamment pour les télécommunications, les procédés de mesures ou la construction d'ordinateurs à base de composants optroniques, on comprend qu'il est nécessaire de disposer d'un
20 appareil fiable permettant la mesure rapide d'un état de surface ou de volume d'un objet.

D'une façon plus générale, un caractère stratégique similaire apparaît dans des domaines industriels aussi variés que les textiles, le biomédical (par exemple pour une analyse de la peau), le papier, la sécurité, la microélectronique, la
30 micromécanique, l'observation satellitaire, etc.

Les différentes technologies employées pour un contrôle rapide des états de surfaces ou de volumes comportent, de façon non exhaustive :

- la microscopie électronique, qui présente l'inconvénient d'être invasive,
- la microscopie optique,

- la microscopie de champ proche,
- la profilométrie laser ou mécanique,
- la mesure par diffusion d'ondes en champ lointain.

Par rapport à une source émettrice d'ondes de longueur d'onde λ , la plus grande dimension de cette source étant notée d , la zone de champ proche est communément considérée comme située en deçà de la distance $2d^2/\lambda$, alors que la zone de champ lointain est située au-delà de cette distance $2d^2/\lambda$. En champ lointain notamment, il peut être considéré que les ondes émises sont localement planes.

Les techniques de diffusion en champ lointain, notamment les techniques de diffusion lumineuse, sont très prisées en optique de précision parce qu'elles sont non invasives et permettent d'exploiter les conséquences des phénomènes de diffusion relevant des théories ondulatoires pour retrouver, de manière quasiment instantanée, une image dérivée de la surface de l'objet examiné faisant ressortir des irrégularités telles que des rugosités qui seraient totalement invisibles à l'œil nu. De nombreux appareils de mesure ont été développés selon ces techniques.

L'invention s'applique plus particulièrement à une installation comprenant un appareil de mesure d'un état de surface ou de volume d'un objet de ce type, comportant ainsi :

- un dispositif d'exposition de l'objet à au moins un faisceau d'ondes,
- un détecteur d'ondes diffusées en champ lointain par l'objet dans au moins une direction pour la fourniture d'au moins un signal de mesure, et
- une unité de traitement dudit au moins un signal de mesure pour en extraire une information sur l'état de surface ou de volume de l'objet.

Mais un tel appareil de mesure ne permet pas de reconstituer une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé, ou en tout cas pas de façon simple. Il ne donne généralement accès qu'à un spectre de rugosité qui est proportionnel au carré du module de la transformée de Fourier de la topographie ou à une fonction d'autocorrélation qui est la transformée de Fourier inverse de ce spectre. Un autre paramètre de rugosité, représentant l'écart-type de la topographie, peut alors être obtenu par intégration du spectre précité sur une bande passante de mesure prédéfinie, mais c'est un paramètre global. Tout cela est dû au fait que la mesure de diffusion fournit des informations sur l'intensité des ondes émises, sans autre information sur leur amplitude complexe ou leur phase. Dans ces conditions, il n'est pas possible de reconstruire la topographie de la surface, et l'on doit se contenter des

moments statistiques précités. Par « topographie », on entend une fonction surfacique ou volumique du relief exposé : par exemple une fonction de type $z = h(x, y)$ en coordonnées cartésiennes ou $z = h(r, \varphi) = h(\mathbf{r})$ en coordonnées cylindriques ($\mathbf{r}$ étant une représentation vectorielle des coordonnées polaires r, φ).

5 Une solution pour retrouver une estimation de la topographie de surface ou de volume est par exemple enseignée dans l'article de Zerrad et al, intitulé « Spatially resolved surface topography retrieved from far-field intensity scattering measurements », publié dans Applied Optics, vol. 53, n° 4, 1^{er} février 2014. Le principe enseigné dans ce document, consistant à subdiviser une région observée en
10 sous-régions constituant des pixels et à détecter la lumière diffusée indépendamment par chaque pixel à l'aide d'une caméra CCD (de l'anglais « Charge-Coupled Device »), permet d'obtenir un paramètre de rugosité par pixel et de remonter ensuite à l'information de topographie. Ce principe reste malgré tout assez complexe et fournit essentiellement des informations sur la stationnarité de la rugosité.

15 Il peut ainsi être souhaité de concevoir un appareil de mesure d'un état de surface ou de volume d'un objet par diffusion d'ondes en champ lointain qui permette de s'affranchir d'au moins une partie des problèmes et contraintes précités.

Il est donc proposé une installation comprenant un objet et un appareil de mesure d'un état de surface ou de volume de cet objet, comportant :

- 20
- un dispositif d'exposition de l'objet à au moins un faisceau d'ondes,
 - un détecteur d'ondes diffusées en champ lointain par l'objet dans au moins une direction pour la fourniture d'au moins un signal de mesure, et
 - une unité de traitement dudit au moins un signal de mesure pour en extraire une information sur l'état de surface ou de volume de l'objet,

25 dans laquelle :

- le dispositif d'exposition est conçu pour engendrer deux faisceaux d'ondes temporellement cohérents et liés en phase de manière à pouvoir interférer en présentant au moins un déphasage prédéterminé entre eux, ces deux faisceaux d'ondes étant d'incidences non normales sur l'objet et
30 symétriques l'une de l'autre par rapport à la normale à la surface ou au volume exposé,
- le détecteur est placé de manière à détecter les ondes résultantes diffusées après interférence dans la direction de la normale à la surface ou au volume exposé, et

- l'unité de traitement est programmée pour reconstituer une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé par un calcul de transformée de Fourier inverse à partir du signal de mesure.

Autrement dit, l'unité de traitement est programmée pour obtenir par calcul
5 une transformée de Fourier d'une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé à partir du signal de mesure et pour ensuite reconstituer cette topographie par un calcul de transformée de Fourier inverse de la transformée de Fourier calculée,

Il a en effet été découvert de façon surprenante qu'en provoquant de telles
10 interférences dans les ondes diffusées orthogonalement à la surface ou au volume exposé, il devient simple d'estimer la transformée de Fourier de la topographie de surface ou volume de l'objet exposé à partir du signal mesuré et de la connaissance du déphasage prédéterminé. Ainsi, il est possible de reconstituer cette topographie de façon très simple, par un calcul de transformée de Fourier inverse exploitant le
15 signal de mesure.

De façon optionnelle, le dispositif d'exposition comporte :

- une source d'ondes conçue pour l'émission d'un faisceau d'ondes de longueur de cohérence suffisante pour permettre une cohérence temporelle par séparation, et
20 - un séparateur du faisceau d'ondes émis par la source, disposé de manière à fournir lesdits deux faisceaux d'ondes temporellement cohérents et liés en phase en assurant une différence de trajet entre eux inférieure à la longueur de cohérence.

De façon optionnelle également, la longueur de cohérence suffisante est
25 obtenue par émission d'un faisceau d'ondes de pureté spectrale inférieure à 1%.

De façon optionnelle également, la source d'ondes est une source accordable à spectre large dont la longueur d'onde moyenne d'émission est réglable par balayage entre une valeur minimale et une valeur maximale.

De façon optionnelle également, un déphaseur accordable utilisé en mode
30 cadencé est placé sur le trajet suivi par l'un des deux faisceaux d'ondes temporellement cohérents et commandé de manière à les lier en phase successivement selon plusieurs déphasages différents. En multipliant les déphasages successifs, on améliore par mesures successives la précision de l'estimation de la transformée de Fourier de la topographie de surface ou volume de

l'objet exposé, de sorte que l'on améliore la précision de la reconstitution de topographie.

De façon optionnelle également, le détecteur est coordonné avec le déphaseur de manière à :

- 5 - lier les deux faisceaux d'ondes en phase successivement selon un déphasage nul et selon un déphasage en opposition de phase, et
- fournir en conséquence un signal de mesure successivement proportionnel au carré de valeurs de champ diffusé prenant la forme $E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = 2 D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Re}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)]$ et $E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = 2 j D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Im}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)]$, où la valeur
- 10 « 0 » indique la valeur d'un paramètre de fréquence spatiale diffusée nulle dans la direction de la normale (z) à la surface ou au volume exposé, le paramètre $\mathbf{v}_0$ désignant la fréquence spatiale incidente variable en fonction de la longueur d'onde moyenne des deux faisceaux d'ondes temporellement cohérents et de leur angle commun d'incidence, D
- 15 désignant un facteur indépendant de la microstructure et de la topographie de l'objet, $\hat{h}$ désignant la transformée de Fourier d'une fonction de topographie de la surface ou du volume de l'objet, Re la partie réelle d'un nombre complexe, Im la partie imaginaire d'un nombre complexe et j le nombre complexe imaginaire pur tel que $j^2 = -1$.

20 Dans ce cas particulier, il est particulièrement simple d'estimer au signe près la transformée de Fourier de la topographie de surface ou volume de l'objet exposé à partir de ses parties réelle et imaginaire.

Ainsi, de façon optionnelle également, l'unité de traitement est programmée pour retrouver la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à partir de ses parties réelle et

25 imaginaire et pour ensuite reconstituer ladite fonction de topographie par un calcul numérique de transformée de Fourier inverse. L'indétermination sur le signe de la transformée de Fourier peut être levée grâce à un algorithme de déroulement de phase.

De façon optionnelle également, un appareil de mesure d'une installation

30 selon l'invention peut en outre comporter un plateau rotatif motorisé destiné à recevoir l'objet et disposé de manière à le faire tourner autour de la normale à la surface ou au volume exposé pour accéder à une anisotropie de surface ou de volume de l'objet. Cette rotation permet en effet de faire tourner la direction de la fréquence spatiale incidente, sans que le détecteur ne soit déplacé.

De façon optionnelle également, le dispositif d'exposition est à émission de rayonnements électromagnétiques, notamment de rayonnements lumineux dans le domaine visible.

Il est également proposé un procédé de mesure d'un état de surface ou de volume d'un objet, comportant les étapes suivantes :

- exposition de l'objet à au moins un faisceau d'ondes,
- détection d'ondes diffusées en champ lointain par l'objet dans au moins une direction pour la fourniture d'au moins un signal de mesure, et
- traitement dudit au moins un signal de mesure pour en extraire une information sur l'état de surface ou de volume de l'objet,

dans lequel :

- l'exposition est conçue pour engendrer deux faisceaux d'ondes temporellement cohérents et liés en phase de manière à pouvoir interférer en présentant au moins un déphasage prédéterminé entre eux, ces deux faisceaux d'ondes étant d'incidences non normales sur l'objet et symétriques l'une de l'autre par rapport à la normale à la surface ou au volume exposé,
- la détection des ondes diffusées après interférence est réalisée dans la direction de la normale à la surface ou au volume exposé, et
- le traitement comporte un calcul de transformée de Fourier inverse à partir du signal de mesure pour reconstituer une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé.

Autrement dit, le traitement comporte l'obtention par calcul d'une transformée de Fourier d'une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé à partir du signal de mesure, puis un calcul de transformée de Fourier inverse de la transformée de Fourier calculée pour reconstituer cette topographie.

L'invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement la structure générale d'un appareil de mesure par diffusion en champ lointain, selon un mode de réalisation de l'invention,
- la figure 2 illustre les étapes successives d'un procédé de mesure mis en œuvre par l'appareil de la figure 1.

L'appareil de mesure illustré schématiquement sur la figure 1 comporte une source d'ondes 10, conçue pour l'émission d'un faisceau d'ondes de longueur de cohérence suffisante pour permettre une cohérence temporelle par séparation. Il s'agit par exemple d'une source de rayonnements lumineux dans le domaine visible.

5 La longueur de cohérence suffisante est notamment obtenue par émission d'un faisceau lumineux cohérent F quasi monochromatique de pureté spectrale inférieure à 1%, la pureté spectrale étant définie comme le rapport entre la largeur de bande spectrale et la fréquence moyenne du faisceau considéré. A cet effet, la source 10 peut être une source laser.

10 L'appareil de mesure comporte en outre un séparateur 12 du faisceau lumineux F émis par la source 10, disposé de manière à fournir deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 temporellement cohérents et liés en phase. Dans l'exemple de la figure 1, ces deux faisceaux sont divergents et émis selon deux directions symétriques par rapport à l'axe normal du séparateur 12.

15 Deux réflecteurs 14 et 16 sont respectivement disposés sur les deux trajets des deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 pour les réorienter de sorte qu'ils convergent de nouveau vers la surface d'un objet 18 dont on souhaite mesurer l'état de surface, avec des incidences non normales sur l'objet 18 et symétriques l'une de l'autre par rapport à la normale à la surface exposée aux deux faisceaux.

20 La source lumineuse 10, le séparateur 12 et les réflecteurs 14, 16 constituent ainsi un dispositif d'exposition de l'objet 18 aux deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 , ce dispositif d'exposition étant plus précisément conçu pour assurer une différence de trajet entre les deux faisceaux lumineux inférieure à leur longueur de cohérence. Dans l'exemple de la figure 1, l'axe normal du séparateur 12 coïncide avec la
25 normale à la surface de l'objet 18 exposée aux deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 et est noté z . La source lumineuse 10, le séparateur 12 et les réflecteurs 14, 16 sont disposés d'une façon symétrique par rapport à cet axe z de sorte que les deux trajets suivis par les deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 sont également symétriques. La différence de trajet et le déphasage entre les deux faisceaux sont donc nuls lorsqu'ils
30 arrivent à la surface de l'objet 18, à défaut d'autres éléments dans le dispositif d'exposition.

De manière générale, conformément à l'invention le dispositif d'exposition peut être conçu selon de nombreux modes de réalisation différents, sachant qu'il doit simplement engendrer deux faisceaux d'ondes temporellement cohérents et liés en

phase de manière à pouvoir interférer en présentant au moins un déphasage prédéterminé entre eux, ces deux faisceaux d'ondes étant d'incidences non normales sur l'objet et symétriques l'une de l'autre par rapport à la normale à la surface ou au volume exposé. En particulier, l'un des deux faisceaux résulte avantageusement d'un
5 dédoublement de l'autre ou est asservi par celui-ci. Il s'agit d'une condition connue en interférométrie.

De façon optionnelle, un déphaseur accordable 20, de type cristal liquide ou autre, est placé sur le trajet suivi par l'un des deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 , par exemple sur le trajet du faisceau F_1 , entre le réflecteur 14 et l'objet 18. Il est
10 avantageusement utilisé en mode cadencé pour améliorer la précision de la mesure. Par ailleurs, comme cela sera vu ultérieurement, il est commandé de manière à lier en phase les deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 selon un seul déphasage prédéterminé arbitrairement choisi ou successivement selon plusieurs déphasages. Selon un protocole de mesure particulier, il peut être commandé de manière à lier en
15 phase les deux faisceaux lumineux successivement selon un déphasage nul (i.e. aucun déphasage engendré par le déphaseur 20 dans l'exemple de disposition de la figure 1) et selon un déphasage en opposition de phase (i.e. un déphasage de π engendré par le déphaseur 20 dans l'exemple de disposition de la figure 1).

Dans un repère à coordonnées sphériques exprimées par rapport à l'axe z et
20 au point central de convergence des deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 sur la surface de l'objet 18, l'angle commun d'incidence des deux faisceaux est noté θ_i et correspond à la colatitude, tandis que la longitude φ_i est, par symétrie et par convention, égale à 0 pour le faisceau lumineux F_1 et à π pour le faisceau lumineux F_2 .

L'appareil de mesure comporte en outre un détecteur 22 d'ondes lumineuses diffusées par l'objet 18 en champ lointain, disposé sur l'axe z entre l'objet 18 et le séparateur 12. Il fournit un signal de mesure à une unité de traitement 24 à laquelle il est connecté. Il est précisément placé de manière à détecter les ondes résultantes F_3 diffusées après interférence dans la direction de la normale à la surface exposée aux
30 faisceaux lumineux F_1 et F_2 , c'est-à-dire dans la direction de l'axe z . La diffusion F_3 résulte d'une superposition, dans la direction de l'axe z , des deux diagrammes de diffusion des deux faisceaux incidents F_1 et F_2 .

A condition que la surface de l'objet 18 présente des rugosités faibles devant la longueur d'onde moyenne du rayonnement incident, de sorte qu'elle réfléchisse les

rayonnements de façon quasi spéculaire, c'est-à-dire avec une faible diffusion, l'ensembement des articles de :

- Elson, intitulé « Theory of light scattering from a rough surface with an inhomogeneous dielectric permittivity », publié dans Physical Review B, volume 30, n° 10, pages 5460 à 5480 (novembre 1984), et
- Amra et al, intitulé « Comparison of surface and bulk scattering in optical multilayers », publié dans Applied Optics, volume 32, n° 28, pages 5492 à 5503 (octobre 1993),

montre que les modes de polarisation du champ diffusé E sont proportionnels à la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v})$ de la fonction de topographie $z = h(\mathbf{r})$ de la surface exposée de l'objet 18, où la variable vectorielle $\mathbf{v}$ désigne la fréquence spatiale.

Plus précisément, dans le domaine des rayonnements électromagnétiques, on montre que le champ E peut s'écrire pour chaque mode :

$$E(\mathbf{v}, \mathbf{v}_0) = D(\mathbf{v}, \mathbf{v}_0) \cdot \hat{h}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0),$$

où $\mathbf{v}_0$ désigne la fréquence spatiale incidente et où D est un facteur entièrement donné par la théorie électromagnétique au premier ordre, qui ne dépend pas de la microstructure de l'objet 18 et de sa topographie mais uniquement de l'origine de la diffusion (surface ou volume), des conditions d'exposition et de détection (longueur d'onde, incidence, polarisation, direction, ...) et de l'indice de réfraction moyen des milieux (incident et substrat).

On montre également que la fréquence spatiale $\mathbf{v}$ peut s'écrire :

$$\mathbf{v} = \left(\frac{n \sin \theta}{\lambda} \right) (\cos \varphi, \sin \varphi),$$

où n est l'indice de réfraction du milieu où s'exerce la mesure et λ est la longueur d'onde moyenne du rayonnement émis par la source 10, θ et φ représentant respectivement les colatitude et longitude en coordonnées sphériques autour de l'axe z . On remarque notamment que l'on peut balayer le module de la fréquence spatiale $\mathbf{v}$ en balayant selon l'angle θ ou selon la longueur d'onde λ et que l'on peut balayer son argument en balayant selon l'angle de longitude φ (l'argument étant même égal à φ). De façon pratique, eu égard au fait que le détecteur 22 reste avantageusement fixe, le module de la fréquence spatiale peut être balayé en modifiant la longueur d'onde d'éclairement, tandis que la direction de la fréquence spatiale peut être modifiée grâce à une rotation de l'objet 18 autour de sa normale (cas des surfaces anisotropes).

La fréquence spatiale incidente s'écrit donc :

$$\mathbf{v}_{0,1} = \left(\frac{n \sin \theta_i}{\lambda} \right) (1,0) = \mathbf{v}_0 \text{ pour le faisceau lumineux incident } F_1, \text{ et}$$

$$\mathbf{v}_{0,2} = \left(\frac{n \sin \theta_i}{\lambda} \right) (-1,0) = -\mathbf{v}_{0,1} = -\mathbf{v}_0 \text{ pour le faisceau lumineux incident } F_2.$$

Lorsque les deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 présentent un déphasage prédéterminé noté η entre eux engendré par le déphaseur 20 sur le premier faisceau lumineux F_1 , il en résulte un champ total diffusé :

$$\begin{aligned} E_T(\mathbf{v}, \mathbf{v}_0) &= E(\mathbf{v}, \mathbf{v}_{0,1}) + E(\mathbf{v}, \mathbf{v}_{0,2}) \\ &= D(\mathbf{v}, \mathbf{v}_0) \cdot \hat{h}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0) \cdot \exp(j\eta) + D(\mathbf{v}, -\mathbf{v}_0) \cdot \hat{h}(\mathbf{v} + \mathbf{v}_0), \end{aligned}$$

5 avec j tel que $j^2 = -1$.

Conformément à l'invention, ce champ total diffusé est mesuré par le détecteur 22 dans la direction de l'axe z , c'est-à-dire pour $\theta=0$, soit $\mathbf{v} = 0$. Plus précisément, la mesure donne accès à une intensité représentée par le carré du champ total diffusé. Le champ dont le carré est mesuré par le détecteur 22 est donc :

$$E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \hat{h}(-\mathbf{v}_0) \cdot \exp(j\eta) + D(\mathbf{0}, -\mathbf{v}_0) \cdot \hat{h}(\mathbf{v}_0).$$

10 Or il se trouve que le facteur D présente une symétrie telle que $D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = D(\mathbf{0}, -\mathbf{v}_0)$ et que la transformée de Fourier d'une fonction réelle présente une symétrie hermitienne ($\hat{h}(-\mathbf{v}_0) = \hat{h}(\mathbf{v}_0)^*$), de sorte que :

$$E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot [\hat{h}(\mathbf{v}_0)^* \cdot \exp(j\eta) + \hat{h}(\mathbf{v}_0)].$$

En particulier, lorsque les deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 sont sans déphasage entre eux, il en résulte un champ total diffusé :

$$E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot [\hat{h}(\mathbf{v}_0)^* + \hat{h}(\mathbf{v}_0)] = 2 D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Re}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)].$$

15 De même, lorsque les deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 sont en opposition de phase grâce à un retard de $\exp(j\pi)$ engendré par le déphaseur 20 sur le premier faisceau lumineux F_1 , il en résulte un champ total diffusé :

$$E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot [\hat{h}(\mathbf{v}_0)^* \cdot \exp(j\pi) + \hat{h}(\mathbf{v}_0)] = 2 j D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Im}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)].$$

20 Il en résulte que l'astuce consistant à mesurer, dans l'axe de la normale à la surface de l'objet 18, les ondes diffusées par cette surface à partir de deux faisceaux incidents symétriques interférant en phase et/ou en opposition de phase permet d'obtenir une mesure proportionnelle au carré de la partie réelle et/ou imaginaire de la transformée de Fourier de la fonction de topographie $z = h(\mathbf{r})$ de la surface de l'objet 18.

Ainsi, sans le déphaseur 20, il est possible de retrouver simplement la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à partir de la connaissance de sa partie réelle et de celle, plus classique et obtenue par les mesures connues de l'art antérieur, de son module donné par la racine carrée du spectre de rugosité, à une incertitude de signe
5 près. Cela nécessite cependant de réaliser une mesure préalable avec un seul faisceau incident pour une estimation du spectre de rugosité, puis une mesure conforme à ce qui a été décrit précédemment avec un déphasage nul entre les deux faisceaux incidents.

De façon équivalente, il est possible de retrouver simplement la transformée
10 de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à partir de la connaissance de sa partie imaginaire et de celle de son module donné par la racine carrée du spectre de rugosité, à une incertitude de signe près. Cela nécessite également de réaliser une mesure préalable avec un seul faisceau incident pour une estimation du spectre de rugosité, puis une mesure conforme à ce qui a été décrit précédemment avec un déphasage égal à π entre les
15 deux faisceaux incidents.

Enfin, lorsque l'appareil de mesure inclut le déphaseur 20 et que ce dernier est commandé de manière à lier en phase les deux faisceaux lumineux incidents F_1 et F_2 successivement selon un déphasage nul et selon un déphasage en opposition de phase, il est encore plus simple de retrouver la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à
20 partir de la connaissance de sa partie réelle et de sa partie imaginaire, à une incertitude de signe près.

Dans tous les cas, l'unité de traitement 24 est programmée pour retrouver ainsi la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ et pour ensuite reconstituer simplement la topographie souhaitée $h(\mathbf{r})$ par un calcul numérique de transformée de Fourier
25 inverse.

Dans tous les cas également, il subsiste une incertitude sur le signe de la partie réelle et/ou imaginaire de la transformée de Fourier de la fonction de topographie $z = h(\mathbf{r})$ puisque la mesure ne permet d'accéder qu'au carré de cette partie réelle et/ou imaginaire. Cela revient à avoir une incertitude de π sur l'argument
30 de la transformée de Fourier de la fonction de topographie $z = h(\mathbf{r})$ et donc une incertitude de signe sur la transformée de Fourier elle-même. Mais comme la transformée de Fourier est une fonction continue, il suffit de choisir son signe arbitrairement pour reconstruire, par continuité, la topographie $z = h(\mathbf{r})$. Plus précisément, l'indétermination sur la phase peut être levée par continuité à l'aide

d'algorithmes bien connus de déroulement de phase. Le résultat sera $z = \pm h(\mathbf{r})$, ce qui veut dire que l'on obtiendra, soit la topographie, soit son négatif. Ceci n'est pas réellement un problème, et c'est une caractéristique que l'on retrouve par ailleurs en microscopie.

- 5 D'une façon plus générale, on peut mesurer conformément à l'invention, dans l'axe de la normale à la surface de l'objet 18, les ondes diffusées par cette surface à partir de deux faisceaux incidents symétriques interférant selon au moins un déphasage prédéterminé η quelconque. Si η est différent de 0 et π , cela ne permet pas d'obtenir une mesure proportionnelle au carré de la partie réelle et/ou imaginaire
- 10 de la transformée de Fourier de la fonction de topographie $z = h(\mathbf{r})$ de la surface de l'objet 18, mais on peut malgré tout estimer simplement la transformée de Fourier à partir des mesures et de la connaissance du déphasage prédéterminé η .

Concrètement, on accède à une mesure $M(\eta)$ pouvant s'écrire de la façon suivante :

$$M(\eta) = \frac{|E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0)|^2}{|D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0)|^2} = |\hat{h}(\mathbf{v}_0)^* \cdot \exp(j\eta) + \hat{h}(\mathbf{v}_0)|^2$$

$$= 2 \left(|\hat{h}(\mathbf{v}_0)|^2 + \text{Re}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)^2 \cdot \exp(-j\eta)] \right),$$

- 15 la grandeur $|E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0)|^2$ étant mesurée et la grandeur $|D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0)|^2$ calculée.

En notant ρ le module de la valeur complexe $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ et δ son argument (i.e. $\hat{h}(\mathbf{v}_0) = \rho \cdot \exp(j\delta)$), l'écriture précédente se simplifie en :

$$M(\eta) = 2\rho^2 [1 + \cos(2\delta - \eta)] = \left[2\rho \cos\left(\delta - \frac{\eta}{2}\right) \right]^2.$$

- Cette écriture définit une fonction $M(\eta)$ que l'on sait mesurer en fonction du paramètre η piloté par le déphaseur 20 et qui est par ailleurs dépendante des deux
- 20 paramètres, module ρ et argument δ , de la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$.

Ainsi, il est possible de retrouver simplement la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à partir de la connaissance d'une seule valeur de $M(\eta)$ et de celle, plus classique et obtenue par les mesures connues de l'art antérieur, de son module ρ donné par la racine carrée du spectre de rugosité, à une incertitude de signe près.

- 25 En effet, il suffit alors de calculer :

$$\delta = \frac{1}{2} \left[\eta + \arccos\left(\frac{M(\eta)}{2\rho^2} - 1\right) \right],$$

où δ est connu à π près.

Cela nécessite cependant de réaliser une mesure préalable avec un seul faisceau incident pour une estimation du spectre de rugosité, puis une mesure conforme à ce qui a été décrit précédemment avec un déphasage η entre les deux faisceaux incidents. Bien sûr, pour $\eta = 0$, on retrouve une mesure proportionnelle au carré de la partie réelle de $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ ne nécessitant pas de déphaseur 20. Pour $\eta = \pi$, on retrouve une mesure proportionnelle au carré de la partie imaginaire de $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$.

Il est possible également de retrouver simplement la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à partir de deux mesures $M(\eta_1)$ et $M(\eta_2)$. Dans ce cas, il n'est plus nécessaire de réaliser une mesure préalable avec un seul faisceau incident pour une estimation du spectre de rugosité. On obtient effectivement un système de deux équations $M(\eta_1) = 2\rho^2[1 + \cos(2\delta - \eta_1)]$ et $M(\eta_2) = 2\rho^2[1 + \cos(2\delta - \eta_2)]$ à deux inconnues ρ et δ . On peut notamment obtenir δ à π près en résolvant par exemple analytiquement ou numériquement le rapport suivant :

$$M(\eta_1)/M(\eta_2) = [1 + \cos(2\delta - \eta_1)]/[1 + \cos(2\delta - \eta_2)].$$

Enfin, le déphaseur 20 peut être exploité en optimisant son potentiel de mesures multiples successives avec des déphasages successifs prédéterminés η_i pour $1 \leq i \leq n$ et n aussi élevé qu'on le souhaite. On peut alors obtenir les paramètres ρ et δ de façon connue en soi par optimisation numérique en comparant la fonction analytique théorique $M_{th}(\eta) = 2\rho^2[1 + \cos(2\delta - \eta)]$ avec la fonction discrète $M_{mes}(\eta) = \{M(\eta_i), 1 \leq i \leq n\}$. Une telle optimisation peut par exemple se faire par minimisation itérative d'une distance entre ces deux fonctions pour rendre la fonction théorique aussi proche que possible de l'ensemble des mesures en faisant varier les paramètres ρ et δ . L'argument δ est là encore obtenu à π près.

Cette reconstitution de la topographie sur la surface exposée de l'objet 18 par calcul de transformée de Fourier inverse nécessite cependant de connaître la fonction $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ sur toute une bande de fréquences spatiales $\mathbf{v}_0$. Or comme cela a été vu précédemment, le module de la variable vectorielle $\mathbf{v}_0$ dépend de l'angle d'incidence θ_i et de la longueur d'onde moyenne d'émission λ . Faire varier l'angle d'incidence θ_i nécessite de commander mécaniquement l'appareil de mesure, tandis que faire varier la longueur d'onde moyenne d'émission λ ne nécessite que de prévoir une source 10 accordable à spectre large ou une source blanche associée à un spectrophotomètre en entrée ou en sortie de l'appareil de mesure. La résolution du balayage en module des fréquences spatiales $\mathbf{v}_0$ est alors donnée par la plus petite longueur d'onde de ce spectre. On préférera donc généralement balayer en module la

bande de fréquences spatiales en faisant varier le paramètre λ , d'autant plus que la dispersion d'indice est souvent négligeable dans la bande spectrale envisagée, et qu'il en est de même pour le facteur D.

Une reconstitution complète de la topographie sur la surface exposée de l'objet 18 doit en outre avantageusement faire varier l'orientation en longitude des fréquences spatiales incidentes ν_0 pour les balayer en direction et accéder ainsi à l'anisotropie de la surface bidimensionnelle observée. Cela s'obtient en faisant simplement varier les valeurs de l'angle φ_i puisque la transformée de Fourier conserve les rotations. Pour cela, il suffit de faire tourner l'objet 18 autour de l'axe z, par exemple en le disposant sur un plateau rotatif motorisé 26, et de répéter les mesures pour chaque plan d'incidence.

Un procédé de mesure tel que celui de la figure 2 peut être mis en œuvre par l'appareil de mesure de la figure 1. Par souci de simplicité, ce procédé est décrit en conformité avec le protocole de mesure décrit précédemment selon lequel les deux faisceaux lumineux incidents F_1 et F_2 présentent un déphasage successivement nul et en opposition de phase entre eux à l'aide du déphaseur 20. Bien évidemment, il peut être adapté à tous les autres protocoles de mesure décrits précédemment, à savoir : les deux faisceaux lumineux incidents F_1 et F_2 présentent un seul déphasage η quelconque, par exemple nul, égal à π ou autre, sachant qu'une mesure préalable permet d'estimer le module de $\hat{h}(\nu_0)$; les deux faisceaux lumineux incidents F_1 et F_2 présentent un déphasage successivement égal à deux valeurs quelconques η_1 et η_2 à l'aide du déphaseur 20 ; les deux faisceaux lumineux incidents F_1 et F_2 présentent des déphasages successifs égaux à n valeurs quelconques $\eta_1, \dots, \eta_n$ à l'aide du déphaseur 20.

Au cours d'une première étape d'initialisation 100, l'objet 18 est disposé sur le plateau rotatif motorisé 26. Le plan d'incidence est réglé à $(\varphi_{i,1}, \varphi_{i,2}) = (0, \pi)$.

Au cours d'une deuxième étape d'initialisation 102, la longueur d'onde moyenne d'émission λ de la source 10 est réglée à une valeur minimale $\lambda_{\min}$ de balayage.

Ensuite, au cours d'une étape d'exposition 104, la source 10 émet un faisceau lumineux F qui est subdivisé en deux faisceaux F_1 et F_2 par le séparateur 12. Ces deux faisceaux lumineux F_1 et F_2 sont amenés à converger vers l'objet 18 selon un angle d'incidence non nul commun θ_i à l'aide des réflecteurs 14 et 16 et à présenter un déphasage successivement nul et en opposition de phase entre eux à l'aide du

déphaseur 20. Ces deux faisceaux lumineux incidents interfèrent entre eux et produisent un faisceau lumineux F_3 diffusé dans la direction de l'axe z vers le détecteur 22.

5 Ensuite, au cours d'une étape de détection en champ lointain 106, le détecteur 22 capte le faisceau lumineux F_3 , diffusé dans la direction de l'axe z, résultant successivement d'une interférence en déphasage nul et en opposition de phase des faisceaux lumineux incidents pour produire un signal de mesure successivement proportionnel aux carrés des valeurs de champ diffusé $E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = 2 D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Re}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)]$ et $E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = 2 j D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Im}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)]$.

10 Ensuite, au cours d'une étape de traitement 108, l'unité de traitement 24 calcule la valeur de la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à l'aide de ses parties réelle et imaginaire obtenues pour les valeurs courantes du plan d'incidence et de la longueur d'onde moyenne d'émission.

15 Au cours d'une étape de test 110 suivante, si la longueur d'onde moyenne d'émission λ n'a pas encore atteint sa valeur de balayage maximale $\lambda_{\max}$, elle est incrémentée d'un pas de longueur d'onde $\Delta\lambda$ au cours d'une étape 112 et le procédé reprend à l'étape 104. Sinon le procédé passe à une autre étape de test 114.

20 Au cours de l'étape de test 114, si tous les plans d'incidences n'ont pas encore été balayés, le plateau rotatif motorisé est actionné d'un pas de longitude $\Delta\phi$ autour de l'axe z au cours d'une étape 116 et le procédé reprend à l'étape 102. Sinon le procédé passe à une étape de traitement final 118.

Lors de cette étape de traitement final 118, l'unité de traitement 24 calcule la valeur de topographie $h(\mathbf{r})$ de l'objet 18 par transformée de Fourier inverse de la fonction $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ connue en toutes ses valeurs calculées aux étapes 108 successives.

25 Il apparaît clairement qu'un appareil de mesure avec son mode de fonctionnement tel que celui décrit précédemment permet de reconstituer simplement la topographie d'une surface d'un objet à partir de mesures de diffusion en champ lointain, pour peu que la rugosité de l'objet soit suffisamment faible devant la longueur d'onde moyenne incidente. Il demeure également exploitable pour des
30 mesures de défauts isolés sur une surface, ou pour des hétérogénéités d'indice, à condition que la diffusion demeure faible devant le flux incident.

On remarquera également que l'installation décrite précédemment ne nécessite pas de système imageur, ni d'objectif de microscope, ni de détecteur

matriciel. On peut donc utiliser un détecteur monobloc ou une fibre optique, de façon analogue à ce qui est pratiqué pour l'imagerie à un pixel.

On notera par ailleurs que l'invention n'est pas limitée au mode de réalisation décrit précédemment.

5 En particulier, bien qu'il ait été décrit d'exploiter le paramètre λ aux étapes 102, 110 et 112 pour balayer les fréquences spatiales incidentes, c'est l'angle d'incidence θ_i qui pourrait en variante être exploité. Il est en outre toujours possible de remplacer le balayage en longueur d'onde par un éclairage en lumière blanche, à condition que le signal mesuré soit renvoyé, directement ou via une fibre optique,
10 vers un spectrophotomètre puis vers un détecteur matriciel ou linéaire, afin qu'il puisse être analysé séparément pour chaque fréquence spatiale.

Comme indiqué précédemment également, les étapes 104, 106 et 108 peuvent être aisément adaptées en fonction du protocole de mesure choisi.

Par ailleurs, même si le mode de réalisation décrit précédemment concerne
15 l'exposition d'un objet à des ondes lumineuses, les principes de l'invention s'appliquent à d'autres types d'ondes électromagnétiques ou de pression.

Par ailleurs également, il a été détaillé un mode de réalisation dans lequel l'état de surface d'un objet est reconstitué, mais l'invention s'applique également à la reconstitution d'états de volumes hétérogènes, pour peu que les variations aléatoires
20 d'indices soient transverses.

Il apparaîtra plus généralement à l'homme de l'art que diverses modifications peuvent être apportées au mode de réalisation décrit ci-dessus, à la lumière de l'enseignement qui vient de lui être divulgué. Dans les revendications qui suivent, les termes utilisés ne doivent pas être interprétés comme limitant les revendications au
25 mode de réalisation exposé dans la présente description, mais doivent être interprétés pour y inclure tous les équivalents que les revendications visent à couvrir du fait de leur formulation et dont la prévision est à la portée de l'homme de l'art en appliquant ses connaissances générales à la mise en œuvre de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

REVENDICATIONS

1. Installation comprenant un objet (18) et un appareil de mesure d'un état de surface ou de volume de cet objet (18), l'appareil de mesure comportant :

- 5 - un dispositif (10, 12, 14, 16, 20) d'exposition de l'objet à au moins un faisceau d'ondes,
- un détecteur (22) d'ondes diffusées en champ lointain par l'objet dans au moins une direction pour la fourniture d'au moins un signal de mesure, et
- 10 - une unité de traitement (24) dudit au moins un signal de mesure pour en extraire une information sur l'état de surface ou de volume de l'objet,

caractérisée en ce que :

- le dispositif d'exposition (10, 12, 14, 16, 20) est conçu pour engendrer
- 15 deux faisceaux d'ondes (F_1 , F_2) temporellement cohérents et liés en phase de manière à pouvoir interférer en présentant au moins un déphasage prédéterminé entre eux, le dispositif d'exposition (10, 12, 14, 16, 20) étant configuré et disposé par rapport à l'objet (18) de telle sorte que ces deux faisceaux d'ondes (F_1 , F_2) soient
- 20 d'incidences non normales sur l'objet (18) et symétriques l'une de l'autre par rapport à la normale (z) à la surface ou au volume exposé,
- le détecteur (22) est placé par rapport à l'objet (18) de manière à détecter en champ lointain les ondes résultantes diffusées (F_3) après interférence dans la direction de la normale (z) à la surface ou au
- 25 volume exposé, et
- l'unité de traitement (24) est programmée pour obtenir par calcul une transformée de Fourier d'une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé (18) à partir du signal de mesure et pour ensuite reconstituer cette topographie par un calcul de transformée de
- 30 Fourier inverse de la transformée de Fourier calculée.

2. Installation selon la revendication 1, dans laquelle le dispositif d'exposition (10, 12, 14, 16, 20) comporte :

- une source d'ondes (10) conçue pour l'émission d'un faisceau d'ondes (F) de longueur de cohérence suffisante pour permettre une cohérence temporelle par séparation, et
- un séparateur (12) du faisceau d'ondes (F) émis par la source (10),
5 disposé de manière à fournir lesdits deux faisceaux d'ondes (F₁, F₂) temporellement cohérents et liés en phase en assurant une différence de trajet entre eux inférieure à la longueur de cohérence.

3. Installation selon la revendication 2, dans laquelle la longueur de cohérence suffisante est obtenue par émission d'un faisceau d'ondes (F) de pureté
10 spectrale inférieure à 1%.

4. Installation selon la revendication 2 ou 3, dans laquelle la source d'ondes (10) est une source accordable à spectre large dont la longueur d'onde moyenne d'émission est réglable par balayage entre une valeur minimale et une valeur maximale.

5. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans laquelle un déphaseur accordable (20) utilisé en mode cadencé est placé sur le trajet suivi par l'un des deux faisceaux d'ondes (F₁, F₂) temporellement cohérents et commandé de manière à les lier en phase successivement selon plusieurs déphasages différents.

6. Installation selon la revendication 5, dans laquelle le détecteur (22) est
20 coordonné avec le déphaseur (20) de manière à :

- lier les deux faisceaux d'ondes (F₁, F₂) en phase successivement selon un déphasage nul et selon un déphasage en opposition de phase, et
- fournir en conséquence un signal de mesure successivement
25 proportionnel au carré de valeurs de champ diffusé prenant la forme

$$E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = 2 D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Re}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)] \quad \text{et} \quad E_T(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) = 2 j D(\mathbf{0}, \mathbf{v}_0) \cdot \text{Im}[\hat{h}(\mathbf{v}_0)],$$
où la valeur « 0 » indique la valeur d'un paramètre de fréquence spatiale diffusée nulle dans la direction de la normale (z) à la surface ou au volume exposé, le paramètre $\mathbf{v}_0$ désignant la
30 fréquence spatiale incidente variable en fonction de la longueur d'onde moyenne des deux faisceaux d'ondes (F₁, F₂) temporellement cohérents et de leur angle commun (θ_i) d'incidence, D désignant un facteur indépendant de la microstructure et de la topographie de l'objet (18), $\hat{h}$ désignant la transformée de Fourier d'une fonction de

topographie de la surface ou du volume de l'objet (18), Re la partie réelle d'un nombre complexe, Im la partie imaginaire d'un nombre complexe et j le nombre complexe imaginaire pur tel que $j^2 = -1$.

7. Installation selon la revendication 6, dans laquelle l'unité de traitement (24) est programmée pour retrouver la transformée de Fourier $\hat{h}(\mathbf{v}_0)$ à partir de ses parties réelle et imaginaire et pour ensuite reconstituer ladite fonction de topographie par un calcul numérique de transformée de Fourier inverse.

8. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, comportant en outre un plateau rotatif motorisé (26) destiné à recevoir l'objet (18) et disposé de manière à le faire tourner autour de la normale (z) à la surface ou au volume exposé pour accéder à une anisotropie de surface ou de volume de l'objet (18).

9. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans laquelle le dispositif d'exposition (10, 12, 14, 16, 20) est à émission de rayonnements électromagnétiques, notamment de rayonnements lumineux dans le domaine visible.

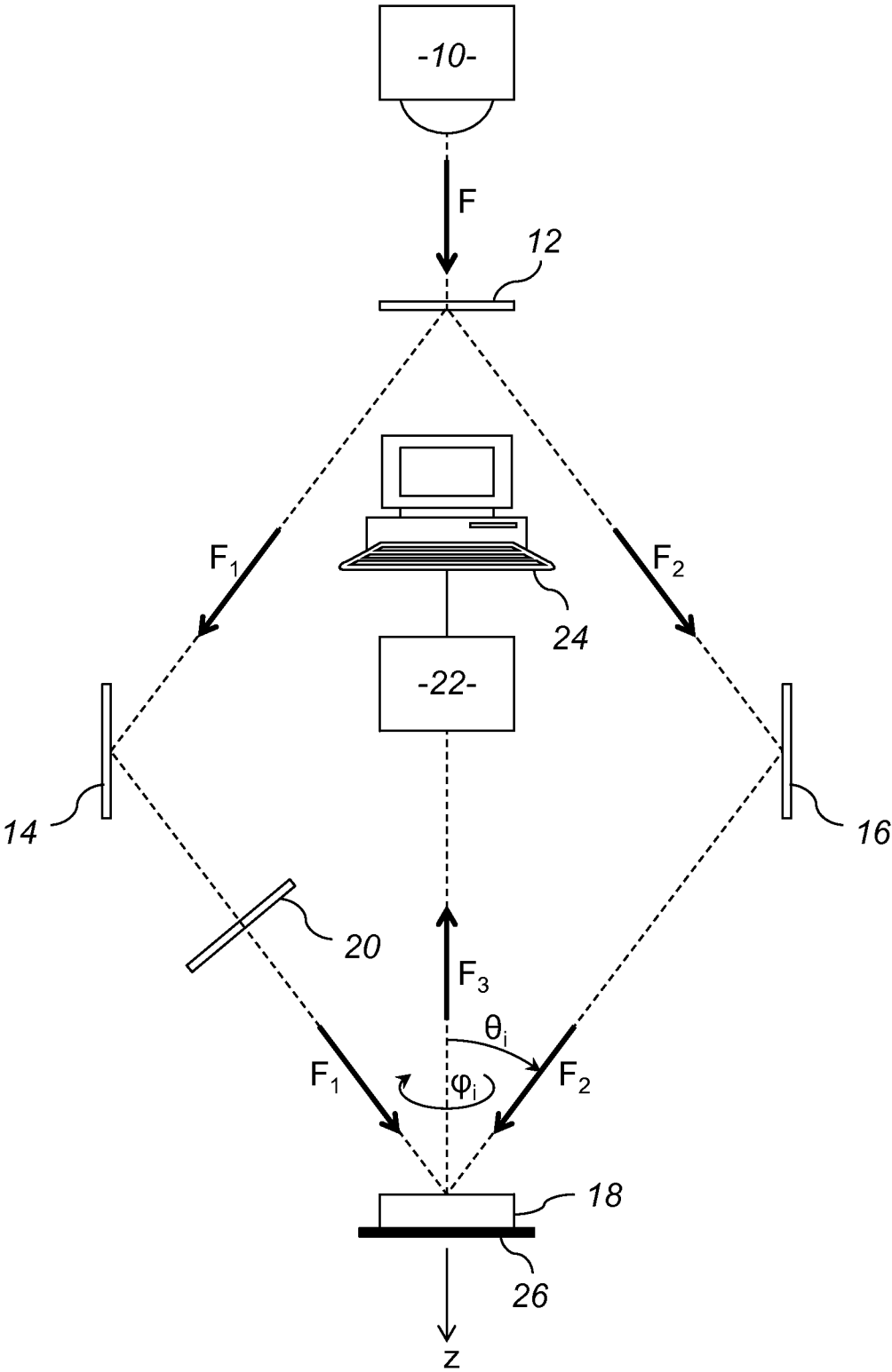
10. Procédé de mesure d'un état de surface ou de volume d'un objet (18), comportant les étapes suivantes :

- exposition (104) de l'objet à au moins un faisceau d'ondes,
 - détection (106) d'ondes diffusées en champ lointain par l'objet dans au moins une direction pour la fourniture d'au moins un signal de mesure, et
 - traitement (108, 118) dudit au moins un signal de mesure pour en extraire une information sur l'état de surface ou de volume de l'objet,
- caractérisé en ce que :

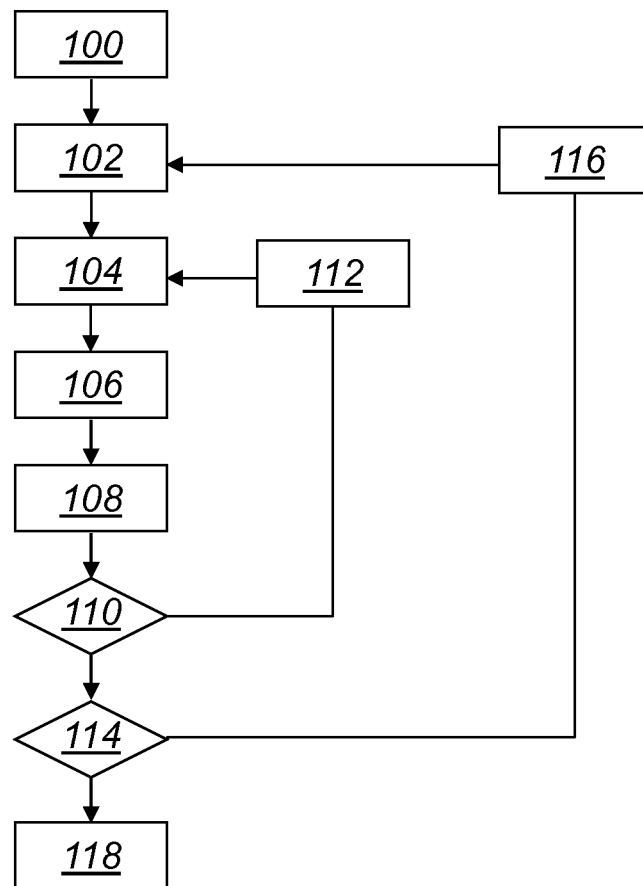
- l'exposition (104) est conçue pour engendrer deux faisceaux d'ondes (F_1 , F_2) temporellement cohérents et liés en phase de manière à pouvoir interférer en présentant au moins un déphasage prédéterminé entre eux, et en outre conçue pour que ces deux faisceaux d'ondes (F_1 , F_2) soient d'incidences non normales sur l'objet (18) et symétriques l'une de l'autre par rapport à la normale (z) à la surface ou au volume exposé,
- la détection (106) des ondes diffusées (F_3) est réalisée en champ lointain après interférence dans la direction de la normale (z) à la surface ou au volume exposé, et

- le traitement (108, 118) comporte l'obtention par calcul d'une transformée de Fourier d'une topographie de la surface ou du volume de l'objet exposé (18) à partir du signal de mesure, puis un calcul (118) de transformée de Fourier inverse de la transformée de Fourier calculée pour reconstituer cette topographie.

Figure 1



2/2

Figure 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/051234

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. G01B9/02 G01B11/24 G01B11/25 G01B11/30 G01N21/88 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) G01B 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, WPI Data																																
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>US 2004/105100 A1 (SHIRLEY LYLE [US]) 3 June 2004 (2004-06-03)</td> <td>1,2,9,10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>paragraph [0059] - paragraph [0064]; figure 1 paragraph [0077] - paragraph [0079] paragraph [0279] - paragraph [0280] -----</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 102 322 807 B (UNIV BEIJING JIAOTONG) 24 April 2013 (2013-04-24)</td> <td>1,2,9,10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>the whole document -----</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>US 7 538 891 B1 (MELLO MICHAEL [US] ET AL) 26 May 2009 (2009-05-26)</td> <td>1,2,9,10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>figure 1a -----</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>US 4 714 348 A (MAKOSCH GUNTER [DE]) 22 December 1987 (1987-12-22)</td> <td>1,10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>figure 1 -----</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-/-</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	X	US 2004/105100 A1 (SHIRLEY LYLE [US]) 3 June 2004 (2004-06-03)	1,2,9,10	Y	paragraph [0059] - paragraph [0064]; figure 1 paragraph [0077] - paragraph [0079] paragraph [0279] - paragraph [0280] -----	1-10	X	CN 102 322 807 B (UNIV BEIJING JIAOTONG) 24 April 2013 (2013-04-24)	1,2,9,10	Y	the whole document -----	1-10	X	US 7 538 891 B1 (MELLO MICHAEL [US] ET AL) 26 May 2009 (2009-05-26)	1,2,9,10	Y	figure 1a -----	1-10	X	US 4 714 348 A (MAKOSCH GUNTER [DE]) 22 December 1987 (1987-12-22)	1,10	Y	figure 1 -----	1-10		-/-	
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.																														
X	US 2004/105100 A1 (SHIRLEY LYLE [US]) 3 June 2004 (2004-06-03)	1,2,9,10																														
Y	paragraph [0059] - paragraph [0064]; figure 1 paragraph [0077] - paragraph [0079] paragraph [0279] - paragraph [0280] -----	1-10																														
X	CN 102 322 807 B (UNIV BEIJING JIAOTONG) 24 April 2013 (2013-04-24)	1,2,9,10																														
Y	the whole document -----	1-10																														
X	US 7 538 891 B1 (MELLO MICHAEL [US] ET AL) 26 May 2009 (2009-05-26)	1,2,9,10																														
Y	figure 1a -----	1-10																														
X	US 4 714 348 A (MAKOSCH GUNTER [DE]) 22 December 1987 (1987-12-22)	1,10																														
Y	figure 1 -----	1-10																														
	-/-																															
☒ 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 "&" document member of the same patent family																																
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report																														
21 August 2017		01/09/2017																														
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 Grand, Jean-Yves																														

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/051234

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2008/278729 A1 (KIM MIN YOUNG [KR]) 13 November 2008 (2008-11-13)	1,10
Y	the whole document -----	1-10
Y	US 2012/194823 A1 (MOORE ERIC [US] ET AL) 2 August 2012 (2012-08-02) the whole document -----	1-10
Y	WO 2015/037797 A1 (KIM SUNG MOO [KR]) 19 March 2015 (2015-03-19) the whole document -----	1-10
Y	WO 2009/141838 A1 (ZHERMACK SPA [IT]; GENRIKHOVIC LEVIN GENNADY [RU]; NIKOKAEVICH VISHNYA) 26 November 2009 (2009-11-26) the whole document -----	1-10
Y	JP 2003 281499 A (NAT AEROSPACE LAB) 3 October 2003 (2003-10-03) the whole document -----	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2017/051234

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2004105100 A1	03-06-2004	US 6690474 B1	10-02-2004
		US 2004105100 A1	03-06-2004
		US 2006012802 A1	19-01-2006

CN 102322807 B	24-04-2013	NONE	

US 7538891 B1	26-05-2009	NONE	

US 4714348 A	22-12-1987	DE 3574280 D1	21-12-1989
		EP 0226658 A1	01-07-1987
		JP H0619264 B2	16-03-1994
		JP S62153704 A	08-07-1987
		US 4714348 A	22-12-1987

US 2008278729 A1	13-11-2008	CN 101303223 A	12-11-2008
		EP 1990604 A1	12-11-2008
		JP 5462999 B2	02-04-2014
		JP 2008281543 A	20-11-2008
		KR 20080099008 A	12-11-2008
		TW 200844396 A	16-11-2008
		US 2008278729 A1	13-11-2008

US 2012194823 A1	02-08-2012	US 2012194823 A1	02-08-2012
		WO 2012103557 A2	02-08-2012

WO 2015037797 A1	19-03-2015	KR 20150029424 A	18-03-2015
		WO 2015037797 A1	19-03-2015

WO 2009141838 A1	26-11-2009	NONE	

JP 2003281499 A	03-10-2003	JP 3673857 B2	20-07-2005
		JP 2003281499 A	03-10-2003

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2017/051234

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01B9/02 G01B11/24 G01B11/25 G01B11/30 G01N21/88 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01B 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) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2004/105100 A1 (SHIRLEY LYLE [US]) 3 juin 2004 (2004-06-03)	1,2,9,10
Y	alinéa [0059] - alinéa [0064]; figure 1 alinéa [0077] - alinéa [0079] alinéa [0279] - alinéa [0280] -----	1-10
X	CN 102 322 807 B (UNIV BEIJING JIAOTONG) 24 avril 2013 (2013-04-24)	1,2,9,10
Y	le document en entier -----	1-10
X	US 7 538 891 B1 (MELLO MICHAEL [US] ET AL) 26 mai 2009 (2009-05-26)	1,2,9,10
Y	figure 1a -----	1-10
X	US 4 714 348 A (MAKOSCH GUNTER [DE]) 22 décembre 1987 (1987-12-22)	1,10
Y	figure 1 -----	1-10
	-/-	
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "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) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "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 "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 "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 "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 21 août 2017		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 01/09/2017
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Grand, Jean-Yves

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2008/278729 A1 (KIM MIN YOUNG [KR]) 13 novembre 2008 (2008-11-13)	1,10
Y	le document en entier -----	1-10
Y	US 2012/194823 A1 (MOORE ERIC [US] ET AL) 2 août 2012 (2012-08-02)	1-10
	le document en entier -----	
Y	WO 2015/037797 A1 (KIM SUNG MOO [KR]) 19 mars 2015 (2015-03-19)	1-10
	le document en entier -----	
Y	WO 2009/141838 A1 (ZHERMACK SPA [IT]; GENRIKHOVIC LEVIN GENNADY [RU]; NIKOKAEVICH VISHNYA) 26 novembre 2009 (2009-11-26)	1-10
	le document en entier -----	
Y	JP 2003 281499 A (NAT AEROSPACE LAB) 3 octobre 2003 (2003-10-03)	1-10
	le document en entier -----	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2017/051234

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2004105100 A1	03-06-2004	US 6690474 B1	10-02-2004
		US 2004105100 A1	03-06-2004
		US 2006012802 A1	19-01-2006

CN 102322807 B	24-04-2013	AUCUN	

US 7538891 B1	26-05-2009	AUCUN	

US 4714348 A	22-12-1987	DE 3574280 D1	21-12-1989
		EP 0226658 A1	01-07-1987
		JP H0619264 B2	16-03-1994
		JP S62153704 A	08-07-1987
		US 4714348 A	22-12-1987

US 2008278729 A1	13-11-2008	CN 101303223 A	12-11-2008
		EP 1990604 A1	12-11-2008
		JP 5462999 B2	02-04-2014
		JP 2008281543 A	20-11-2008
		KR 20080099008 A	12-11-2008
		TW 200844396 A	16-11-2008
		US 2008278729 A1	13-11-2008

US 2012194823 A1	02-08-2012	US 2012194823 A1	02-08-2012
		WO 2012103557 A2	02-08-2012

WO 2015037797 A1	19-03-2015	KR 20150029424 A	18-03-2015
		WO 2015037797 A1	19-03-2015

WO 2009141838 A1	26-11-2009	AUCUN	

JP 2003281499 A	03-10-2003	JP 3673857 B2	20-07-2005
		JP 2003281499 A	03-10-2003
