

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

①① N° de publication : **3 116 806**

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **20 12246**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **B 64 C 39/02** (2020.12), B 64 F 5/60, G 06 T 7/00,  
G 06 T 17/00

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤④ DRONE VOLANT POUR L'INSPECTION DE SURFACES ET PROCÉDÉ D'INSPECTION DE SURFACES AU MOYEN D'UN TEL DRONE VOLANT.

②② Date de dépôt : 27.11.20.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 03.06.22 Bulletin 22/22.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 11.11.22 Bulletin 22/45.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : AIRBUS OPERATIONS Société par  
actions simplifiée — FR.

⑦② Inventeur(s) : FAYOLET Jérôme, MONTET Florent,  
LEFEBVRE ALBARET François et DOMINGUEZ  
Nicolas.

⑦③ Titulaire(s) : AIRBUS OPERATIONS Société par  
actions simplifiée.

⑦④ Mandataire(s) : Le Guen & Associés.

**FR 3 116 806 - B1**



## Description

### **Titre de l'invention : Drone volant pour l'inspection de surfaces et procédé d'inspection de surfaces au moyen d'un tel drone volant**

#### **Domaine technique**

[0001] La présente invention concerne un drone volant pour l'inspection de surfaces ainsi qu'un procédé pour inspecter une surface apte à réfléchir la lumière, telle que la surface externe (ou peau) d'un aéronef, notamment pour détecter des enfoncements et des défauts superficiels sur une telle surface. De tels enfoncements peuvent être provoqués notamment par la chute d'un objet ou par une collision avec un oiseau, tandis que de tels défauts superficiels peuvent résulter de rayures, craquelures, etc.

#### **État de la technique antérieure**

[0002] La détection des enfoncements et défauts superficiels sur la surface externe d'un d'aéronef a conventionnellement été réalisée par contrôle visuel. Le relevé de la position des enfoncements et défauts superficiels est dans ce cas réalisé manuellement au moyen d'outils de mesure tels que des mètres ruban, en référence à des éléments structurels visibles tels que des cadres, lisses ou nervures qui forment la structure interne du fuselage ou de la voilure.

[0003] Une telle opération mobilise plusieurs opérateurs et est longue à mettre en œuvre, notamment dans les cas nécessitant la mise en place d'échafaudages pour atteindre une partie haute de l'aéronef.

[0004] Il a également été proposé, dans le document FR3038109B1 (et son équivalent US9830411B2), d'utiliser des drones équipés de dispositifs de télémétrie afin d'effectuer la détection et la mesure d'enfoncements sur la surface externe d'un d'aéronef.

[0005] Cette méthode permet un gain de temps et une réduction de coûts considérables, mais requiert une connaissance précise *a priori* de la géométrie idéale (c'est-à-dire sans défaut) de la surface à analyser, et ne permet pas toujours d'atteindre une précision de mesure suffisante.

#### **Exposé de l'invention**

[0006] L'invention a pour objet un drone volant et un procédé adaptés à l'inspection de surfaces, notamment des surfaces de grandes dimensions (par exemple plusieurs centaines de mètres-carrés), qui soit rapide à mettre en œuvre et efficace, et qui permette de s'affranchir, au moins en partie, des inconvénients mentionnés ci-dessus.

[0007] L'invention propose à cet effet un drone volant pour l'inspection de surfaces, comprenant :

[0008] – un châssis portant un ou plusieurs rotor(s) ;

- un dispositif lumineux formé de deux sources de lumière ayant chacune une forme allongée selon une direction longitudinale de chacune des sources de lumière, et
- un ensemble d’acquisition d’images, comprenant :
  - deux premiers dispositifs d’acquisition d’images ;
  - un deuxième dispositif d’acquisition d’images agencé entre les deux premiers dispositifs d’acquisition d’images ; et
- dans lequel les deux sources de lumière sont agencées respectivement entre le deuxième dispositif d’acquisition d’images et chacun des premiers dispositifs d’acquisition d’images.

[0009] La manière d’éclairer une surface influe beaucoup sur la détectabilité des défauts sur une telle surface. Ainsi, un éclairage diffus est davantage adapté à faire ressortir des défauts superficiels tels que des variations de couleurs de la surface, des rayures, des coulures, ou encore de la corrosion. Dans de tels cas, tout reflet spéculaire parasite risque d’être confondu avec un défaut superficiel. Par exemple, le reflet d’une ligne risque d’être confondu avec une rayure. En revanche, la réflexion spéculaire d’un motif connu sur une surface suffisamment brillante peut permettre d’identifier des défauts tridimensionnels tels que des enfoncements ou des bosses.

[0010] Ainsi, le drone volant selon l’invention est particulièrement utile du fait qu’il permet à la fois une détection efficace d’enfoncements sur des surfaces par analyse de reflets spéculaires, au moyen du dispositif lumineux et des deux premiers dispositifs d’acquisition d’images, et une détection efficace de défauts superficiels sur des surfaces au moyen du deuxième dispositif d’acquisition d’images, le dispositif lumineux étant éteint, comme cela apparaîtra plus clairement dans ce qui suit.

[0011] Les masses respectives de ces différents dispositifs et leurs contributions au moment d’inertie du drone peuvent en outre être optimisées en fonction des besoins propres aux deux types de détections précités, de manière à limiter au mieux la masse globale du drone volant et le moment d’inertie global de ce dernier.

[0012] De préférence, au moins dans un état particulier du drone volant, les deux sources de lumière, les deux premiers dispositifs d’acquisition d’images et le deuxième dispositif d’acquisition d’images sont alignés selon un axe d’alignement correspondant à la direction longitudinale de chacune des sources de lumière.

[0013] Dans un mode de réalisation préféré de l’invention, le drone volant comprend deux supports de forme allongée portés par le châssis et s’étendant parallèlement à l’axe d’alignement, les deux premiers dispositifs d’acquisition d’images sont rigidement fixés sur les deux supports respectivement, et les deux sources de lumière sont également rigidement fixées sur les deux supports respectivement.

[0014] De préférence, le drone volant comprend un premier dispositif d’entraînement

configuré pour déplacer chacun des deux premiers dispositifs d'acquisition d'images et/ou chacune des deux sources de lumière en rotation autour d'un premier axe, le cas échéant parallèle à l'axe d'alignement, dans une plage angulaire d'amplitude au moins égale à 30 degrés.

- [0015] Le premier axe est avantageusement décalé des rotors du drone volant de sorte que ces derniers demeurent à l'extérieur d'un champ de vision de chacun des deux premiers dispositifs d'acquisition d'images quelle que soit l'orientation de ces derniers dans une plage d'au moins 180 degrés autour du premier axe.
- [0016] À cet effet, le premier axe est par exemple décalé des rotors du drone volant dans une direction orthogonale à une direction moyenne d'axes respectifs desdits rotors.
- [0017] Par ailleurs, les deux sources de lumière sont avantageusement configurées pour émettre une lumière verte.
- [0018] De préférence, le drone volant comprend un gyrostabilisateur par lequel le deuxième dispositif d'acquisition d'images est fixé au châssis.
- [0019] De préférence, le drone volant comprend un deuxième dispositif d'entraînement configuré pour déplacer le deuxième dispositif d'acquisition d'images en rotation autour d'un deuxième axe, le cas échéant parallèle à l'axe d'alignement, dans une plage angulaire d'amplitude au moins égale à 30 degrés.
- [0020] Le deuxième axe est avantageusement décalé par rapport aux rotors du drone volant de sorte que ces derniers demeurent à l'extérieur d'un champ de vision du deuxième dispositif d'acquisition d'images quelle que soit l'orientation de ce dernier dans une plage d'au moins 180 degrés autour du deuxième axe.
- [0021] À cet effet, le deuxième axe est par exemple décalé par rapport aux rotors du drone volant dans la direction orthogonale à la direction moyenne des axes respectifs des rotors.
- [0022] L'invention concerne également un procédé pour inspecter une surface apte à réfléchir la lumière, comprenant au moins les étapes suivantes :
- [0023] – A) Mettre à disposition un drone volant du type décrit ci-dessus ;
- B) Déplacer le drone volant en regard de la surface selon une trajectoire en alternant des phases de vol pseudo-stationnaire et des phases transitoires au cours desquelles la vitesse de déplacement du drone volant est supérieure à la vitesse éventuelle du drone volant dans les phases de vol pseudo-stationnaire, de manière à mettre en œuvre les étapes suivantes:
- B1) Au cours des phases transitoires, les sources de lumière étant allumées, acquérir au moins une série d'images de portions de la surface au moyen de chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images de sorte que, pour chaque image de chaque série, le dispositif lumineux éclaire la portion correspondante de la surface ;

- B2) Au cours des phases de vol pseudo-stationnaire, les sources de lumière étant éteintes, acquérir d'autres images de portions de la surface au moyen du deuxième dispositif d'acquisition d'images, les autres images acquises à l'étape B2 ayant une résolution supérieure à celle des images acquises à l'étape B1.

[0024] D'une manière générale, le procédé selon l'invention permet d'inspecter une surface d'une manière particulièrement efficace au moyen du drone volant du type décrit ci-dessus. En particulier, les images acquises à l'étape B1 permettent la détection d'enfoncements de la surface par analyse du reflet spéculaire du dispositif lumineux, tâche pour laquelle une résolution modérée peut être suffisante, tandis que les autres images acquises à l'étape B2, du fait de l'extinction du dispositif lumineux et de leur résolution supérieure, sont optimisées pour la détection de défauts superficiels.

[0025] La détection d'enfoncements sur la surface par analyse du reflet spéculaire du dispositif lumineux permet notamment l'analyse de surfaces de très grandes dimensions, par exemple de plusieurs centaines de mètres carrés, d'une manière particulièrement rapide, efficace et fiable, sans requérir de connaissance préalable précise de la forme de ces surfaces.

[0026] Dans des modes de réalisation de l'invention, le procédé comprend en outre une étape C1 consistant à mettre en œuvre un dispositif de traitement de données de manière à analyser la forme d'un reflet spéculaire du dispositif lumineux dans tout ou partie des images de chaque série d'images acquise à l'étape B1 de manière à estimer la position d'éventuels enfoncements de la surface.

[0027] Dans des modes de réalisation de l'invention, l'étape C1 comprend, pour chaque série d'images acquise à l'étape B1, les étapes suivantes :

- [0028] – C1-I) Pour chaque image de la série d'images, mettre en œuvre le dispositif de traitement de données de manière à :
- c1) Identifier le reflet spéculaire du dispositif lumineux dans l'image ;
  - c2) À partir du reflet spéculaire identifié à la sous-étape précédente, estimer la position médiane, orthogonalement à la direction longitudinale des deux sources de lumière, d'un reflet spéculaire idéal du dispositif lumineux dans l'image, correspondant à la position médiane d'un tel reflet spéculaire en l'absence d'enfoncement de la surface ;
  - c3) Déterminer une distance entre le drone volant et la surface ;
  - c4) Déterminer la position, sur la surface, de chaque point d'une origine du reflet spéculaire du dispositif lumineux dans l'image ;
  - c5) Estimer une pente locale de la surface en chaque point de

l'origine du reflet spéculaire, au moins à partir d'une estimation de la distance éventuelle entre chaque point du reflet spéculaire de la source de lumière dans l'image et la position médiane estimée du reflet spéculaire idéal ;

- C1-II) À partir de l'ensemble des estimations de pentes locales obtenues à l'issue de l'étape C1-I pour au moins une région de la surface, mettre en œuvre le dispositif de traitement de données de manière à estimer la position d'éventuels enfoncements de la surface.

[0029] Dans des modes de réalisation de l'invention, le procédé comprend en outre une étape C2 consistant à mettre en œuvre un (ou le) dispositif de traitement de données de manière à analyser les autres images acquises à l'étape B2 de manière à détecter d'éventuels défauts superficiels de la surface.

[0030] Lorsque cela est souhaité, le procédé selon l'invention permet l'automatisation de tout ou partie de l'étape C d'analyse. Dès lors que la géométrie idéale de la surface à inspecter est connue au moins grossièrement, la commande du déplacement du drone volant peut être intégralement ou partiellement réalisée de manière programmée, de sorte que l'automatisation de l'étape B du procédé est également possible.

[0031] L'invention concerne également un système pour inspecter une surface apte à réfléchir la lumière, comprenant un drone volant du type décrit ci-dessus, et un dispositif de traitement de données configuré pour la mise en œuvre de l'une au moins des étapes C1 et C2 du procédé.

### **Brève description des dessins**

[0032] L'invention sera mieux comprise, et d'autres détails, avantages et caractéristiques de celle-ci apparaîtront à la lecture de la description suivante faite à titre d'exemple non limitatif et en référence aux dessins annexés dans lesquels :

[0033] [fig.1] est une vue schématique en perspective d'un drone volant pour l'inspection de surfaces aptes à réfléchir la lumière ;

[0034] [fig.1A] est une vue à plus grande échelle d'une partie de la [fig.1], illustrant notamment un premier dispositif d'acquisition d'images du drone volant ;

[0035] [fig.1B] est une vue à plus grande échelle d'une autre partie de la [fig.1], illustrant notamment un deuxième dispositif d'acquisition d'images du drone volant ;

[0036] [fig.2] est une vue schématique de côté du drone volant de la [fig.1] ;

[0037] [fig.2A] est une vue à plus grande échelle d'une partie de la [fig.2], illustrant notamment le deuxième dispositif d'acquisition d'images ;

[0038] [fig.3] est une vue schématique de dessus d'une partie du drone volant de la [fig.1], illustrant notamment le deuxième dispositif d'acquisition d'images ;

[0039] [fig.4] est une vue schématique en perspective d'une surface apte à réfléchir la

lumière ;

- [0040] [fig.5] est une vue schématique partielle de côté de la surface de la [fig.4] et d'un système pour l'inspection de surfaces aptes à réfléchir la lumière, comprenant le drone volant de la [fig.1] et un dispositif de traitement de données, au cours de la mise en œuvre d'une étape B d'un procédé d'inspection de la surface ;
- [0041] [fig.6] est une vue schématique en section transversale de la surface de la [fig.4] et du système de la [fig.5], au cours de la mise en œuvre de l'étape B du procédé ;
- [0042] [fig.7] est une vue semblable à la [fig.6] ;
- [0043] [fig.8] est une vue schématique partielle de côté de la surface de la [fig.4] et du système de la [fig.5], au cours de la mise en œuvre de l'étape B du procédé ;
- [0044] [fig.9] est une vue schématique partielle de dessus de la surface de la [fig.4] et du système de la [fig.5], au cours de la mise en œuvre de l'étape B du procédé ;
- [0045] [fig.10] est une vue partielle d'une image d'une série d'images acquises au cours d'une étape B1 faisant partie de l'étape B du procédé ;
- [0046] [fig.11] est une vue de l'image de la [fig.10] après un traitement appliqué par le dispositif de traitement de données dans le cadre d'étapes du procédé ;
- [0047] [fig.12] est une vue semblable à la [fig.11], illustrant une autre étape du procédé ;
- [0048] [fig.13] comprend, en partie haute, un assemblage d'images de la série d'images acquises au cours de l'étape B1 du procédé, tourné de 90 degrés, et, en partie basse, un graphe de valeurs de pentes locales de la surface en fonction d'une abscisse curviligne sur la surface dans le plan A-A de la partie haute de cette figure, estimées par le dispositif de traitement de données dans le cadre d'une étape du procédé ;
- [0049] [fig.14] est un graphe de valeurs d'enfoncements de la surface en fonction de l'abscisse curviligne sur la surface dans le plan A-A de la partie haute de la [fig.13], estimées par le dispositif de traitement de données dans le cadre d'une étape du procédé ;
- [0050] [fig.15] est un graphe en trois dimensions illustrant une cartographie d'une partie de la surface reconstruite au terme du procédé ;
- [0051] [fig.16] est un organigramme du procédé selon un mode de réalisation préféré de l'invention.
- [0052] Dans l'ensemble de ces figures, des références identiques peuvent désigner des éléments identiques ou analogues.

### **Exposé détaillé de modes de réalisation préférés**

- [0053] Un drone volant 12 selon un mode de réalisation préféré de l'invention va d'abord être décrit en référence aux figures 1 à 3.
- [0054] D'une manière générale, le drone volant 12 comprend un châssis 22 portant un ou plusieurs rotor(s) 24 ; un dispositif lumineux 16 formé de deux sources de lumière 16A, 16B ayant chacune une forme allongée, préférentiellement longiligne, définissant

une direction longitudinale D de chacune des sources de lumière 16A, 16B ; et un ensemble d'acquisition d'images 17.

- [0055] L'ensemble d'acquisition d'images 17 comprend deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B, et un deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 agencé entre les deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B.
- [0056] De plus, l'une 16A des deux sources de lumière est agencée entre le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 et l'un 14A des premiers dispositifs d'acquisition d'images, tandis que l'autre source de lumière 16B est agencée entre le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 et l'autre premier dispositif d'acquisition d'images 14B.
- [0057] Dans le mode de réalisation décrit, le dispositif lumineux 16 et l'ensemble d'acquisition d'images 17 sont agencés de sorte que, au moins dans un état particulier du drone volant 12 (en particulier pour une orientation relative donnée des dispositifs d'acquisition d'images, telle que celle illustrée sur les figures), les deux sources de lumière 16A, 16B, les deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B et le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 sont alignés ou sensiblement alignés selon un axe d'alignement AA correspondant à la direction longitudinale D des sources de lumière 16A, 16B, qui, dans un tel cas, est la même pour chacune des sources de lumière 16A, 16B et définit ainsi une direction longitudinale du dispositif lumineux 16.
- [0058] En particulier, un alignement ou quasi-alignement des deux sources de lumière 16A et 16B permet que le reflet spéculaire global du dispositif lumineux 16 sur une surface plane, vu par chacun des dispositifs d'acquisition d'images, ait une forme allongée sensiblement rectiligne. Bien entendu, l'espace nécessaire au deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 entre les deux sources de lumière 16A, 16B se traduit par une discontinuité du reflet spéculaire précité, pouvant être aisément prise en compte dans la mise en œuvre du procédé de détection d'enfoncements qui sera décrit dans ce qui suit.
- [0059] Le châssis 22 du drone volant est par exemple formé de trois corps longitudinaux, à savoir un corps central 220 et deux corps latéraux 222A, 222B, reliés deux-à-deux par un réseau d'éléments de liaison tels que des tiges, barres ou poutres, dont, par exemple, certains 224A, 224B, 225A, 225B, 226A et 226B sont orientés transversalement aux corps longitudinaux 220, 222A, 222B, et dont d'autres 227 sont orientés de manière oblique par rapport aux corps longitudinaux.
- [0060] Le corps central 220 est pourvu d'une fourche 230 à une extrémité longitudinale de celui-ci, définissant un côté avant du drone volant 12. En référence aux figures 1B, 2A et 3, la fourche 230 comprend deux bras 232A, 232B s'étendant chacun à partir d'une embase 234 rigidement fixée au corps central 220. Les éléments de liaison 224A, 224B situés du côté avant du drone relient respectivement les corps latéraux 222A, 222B du

châssis 22 aux bras 232A, 232B de la fourche 230. Le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 est agencé entre les deux bras 232A, 232B, comme cela apparaîtra plus clairement dans ce qui suit.

- [0061] Les rotors 24 sont par exemple au nombre de quatre, et sont par exemple coplanaires ou sensiblement coplanaires ([fig.1]). Les rotors 24 présentent ainsi des axes de rotation 240 respectifs orientés selon une direction verticale VD du drone, qui est orthogonale à un plan horizontal H du drone défini par les rotors 24. Dans un cas plus général, dans lequel les rotors peuvent ne pas être rigoureusement coplanaires, un tel plan horizontal peut être défini comme étant un plan moyen des rotors 24, et la direction verticale VD peut être définie comme étant une direction moyenne des axes de rotation 240 respectifs des rotors. Plus généralement, le plan horizontal H peut être simplement défini comme étant un plan correspondant à une attitude possible du drone volant 12 en vol stationnaire.
- [0062] Dans l'exemple illustré, l'axe d'alignement AA est parallèle au plan horizontal H et définit une direction transversale TD pour le drone volant 12. De plus, les corps longitudinaux 220, 222A, 222B s'étendent globalement selon une direction orthogonale à la direction transversale TD et parallèle au plan horizontal H, définie en tant que direction longitudinale LD pour le drone volant 12. La direction verticale VD est ainsi orthogonale à chacune des directions longitudinale LD et transversale TD. Le côté avant du drone et un le côté arrière de ce dernier sont opposés selon la direction longitudinale LD.
- [0063] Dans le mode de réalisation décrit, le drone volant 12 comprend deux supports 28A, 28B de forme allongée portés par le châssis 22 et s'étendant parallèlement à l'axe d'alignement AA. Les deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A et 14B sont rigidement fixés chacun sur un support 28A, 28B correspondant. De même, les deux sources de lumière 16A, 16B sont rigidement fixées chacune sur un support 28A, 28B correspondant.
- [0064] Le drone volant 12 comprend en outre un premier dispositif d'entraînement 30 configuré pour déplacer chacun des deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B et/ou chacune des deux sources de lumière 16A, 16B en rotation autour d'un premier axe A1 parallèle à l'axe d'alignement AA (figures 1A et 1B), préférentiellement de manière synchrone.
- [0065] L'amplitude de la plage angulaire des orientations possibles pour les éléments déplacés par le premier dispositif d'entraînement 30, autrement dit l'amplitude maximale des déplacements permis par le premier dispositif d'entraînement 30, est au moins égale à 30 degrés, préférentiellement au moins égale à 90 degrés, et encore plus préférentiellement au moins égale à 160 degrés.
- [0066] Le premier axe A1 est avantageusement décalé des rotors 24 du drone, et donc en

particulier situé en dehors de la zone balayée par les pales des rotors 24, de sorte que les rotors 24 demeurent à l'extérieur d'un champ de vision de chacun des deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B quelle que soit l'orientation desdits dispositifs dans une plage d'au moins 180 degrés autour du premier axe A1, et préférentiellement quelle que soit l'orientation desdits dispositifs dans toute leur plage angulaire permise par le premier dispositif d'entraînement 30.

- [0067] À cet effet, le premier axe A1 est décalé par rapport aux rotors 24 dans une direction orthogonale à la direction verticale VD du drone, en l'occurrence dans la direction longitudinale LD du drone. Un tel décalage peut s'accompagner, ou non, d'un décalage du premier axe A1 par rapport aux rotors 24 selon la direction verticale VD. Dans l'exemple illustré, le premier axe A1 est ainsi décalé vers un côté supérieur du drone, par rapport au plan horizontal H.
- [0068] Dans l'exemple illustré, le premier dispositif d'entraînement 30 est configuré pour déplacer chacun des deux supports 28A, 28B en rotation autour du premier axe A1, et entraîner ainsi un déplacement en rotation conjoint des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B et des sources de lumière 16A, 16B.
- [0069] À cet effet, chacun des supports 28A, 28B comporte par exemple une tige 280A, 280B ayant une extrémité montée pivotante dans une extrémité avant d'un corps latéral 222A, 222B correspondant du châssis 22 ([fig.1A]), et une extrémité opposée montée pivotante dans un corps de liaison 228A, 228B correspondant (figures 1B et 3) porté par (ou solidaire de) une extrémité avant d'un bras 232A, 232B correspondant de la fourche 230. Une extrémité d'un élément de liaison 224A, 224B correspondant est également fixée rigidement à chacun des corps de liaison 228A, 228B. La source de lumière 16A, 16B et le premier dispositif d'acquisition d'images 14A, 14B correspondants sont rigidement fixés sur chacune des tiges 280A, 280B. De plus, un engrenage mené 282A, 282B est par exemple rigidement fixé sur chacune des tiges 280A, 280B.
- [0070] En référence aux figures 1B, 2A et 3, le premier dispositif d'entraînement 30 comporte par exemple deux servomoteurs 301A, 301B portés respectivement par les bras 232A, 232B de la fourche 230, deux engrenages menants 302A, 302B solidaires d'axes de sortie respectifs des servomoteurs, et deux engrenages intermédiaires 304A, 304B, par exemple montés pivotants sur les éléments de liaison 224A, 224B situés du côté avant du drone, en prise chacun conjointement avec un engrenage menant 302A, 302B correspondant et avec un engrenage mené 282A, 282B correspondant, de manière à transmettre un mouvement rotatif du servomoteur correspondant à la tige 280A, 280B correspondante et entraîner ainsi le déplacement en rotation conjoint des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B et des sources de lumière 16A, 16B.

- [0071] Par ailleurs, le drone volant 12 comprend un gyrostabilisateur 32 par lequel le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 est fixé au châssis 22. Dans l'exemple illustré, le gyrostabilisateur 32 est agencé entre les bras 232A, 232B de la fourche 230. Ce gyrostabilisateur 32 est par exemple du type couramment dénommé « gimbal » d'après la terminologie anglo-saxonne ; il allie de manière bien connue une suspension de type cardan et un ensemble de capteurs et d'actionneurs électromécaniques, tels que des servomoteurs, configurés pour compenser tout mouvement parasite d'amplitude inférieure à une amplitude maximale de gyrostabilisation, et garantir ainsi une orientation stable au deuxième dispositif d'acquisition d'images 15.
- [0072] Le gyrostabilisateur 32 est avantageusement configuré pour stabiliser le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 selon un axe longitudinal LA et un axe transversal TA (figures 1B et 3). À cet effet, le gyrostabilisateur 32 comporte par exemple une nacelle 320, sur laquelle le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 est rigidement fixé, un bras 322 sur une extrémité duquel la nacelle 320 est montée avec faculté de rotation autour de l'axe transversal TA, et qui est lui-même monté à son autre extrémité sur l'embase 234 de la fourche 230 avec faculté de rotation autour de l'axe longitudinal LA. De manière connue en soi, le gyrostabilisateur comporte un premier servomoteur et un deuxième servomoteur (non visibles sur les figures) respectivement configurés pour déplacer la nacelle 320 en rotation autour de l'axe transversal TA et pour déplacer le bras 322 en rotation autour de l'axe longitudinal LA de manière à compenser tout mouvement parasite d'amplitude inférieure à l'amplitude maximale de gyrostabilisation.
- [0073] En variante, le gyrostabilisateur 32 peut bien entendu être configuré pour assurer en outre une gyrostabilisation selon un axe vertical (parallèle à la direction verticale VD). La direction verticale est néanmoins celle qui requiert le moins de gyrostabilisation, de sorte qu'il est avantageux, en termes d'économies de masse, et donc de gain d'autonomie, de ne pas prévoir de gyrostabilisation selon un axe vertical.
- [0074] Le drone volant 12 comprend en outre un deuxième dispositif d'entraînement 34 configuré pour déplacer le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 en rotation dans une plage angulaire déterminée autour d'un deuxième axe A2 parallèle à l'axe d'alignement AA, et par exemple confondu avec l'axe transversal TA du gyrostabilisateur 32. Dans ce cas, le deuxième dispositif d'entraînement 34 comprend par exemple le premier servomoteur précité, ce dernier assurant ainsi à la fois la gyrostabilisation selon l'axe transversal TA et les changements d'orientation du deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 dans la plage angulaire précitée, dont l'amplitude est, de manière générale, supérieure à l'amplitude maximale de gyrostabilisation.
- [0075] L'amplitude de la plage angulaire précitée est avantageusement au moins égale à 30 degrés, préférentiellement au moins égale à 90 degrés, et encore plus préféren-

tiellement au moins égale à 160 degrés.

- [0076] Le deuxième axe A2 est avantageusement décalé des rotors 24 du drone, et donc en particulier situé en dehors de la zone balayée par les pales des rotors 24, de sorte que les rotors 24 demeurent à l'extérieur d'un champ de vision du deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 quelle que soit l'orientation dudit dispositif dans une plage d'au moins 180 degrés autour du deuxième axe A2, et préférentiellement quelle que soit l'orientation dudit dispositif dans toute la plage angulaire de ce dernier permise par le deuxième dispositif d'entraînement 34.
- [0077] À cet effet, le deuxième axe A2 est décalé par rapport aux rotors 24 dans une direction orthogonale à la direction verticale VD du drone, en l'occurrence dans la direction longitudinale LD du drone. Un tel décalage peut s'accompagner, ou non, d'un décalage du deuxième axe A2 par rapport aux rotors 24 selon la direction verticale VD. Dans l'exemple illustré, le deuxième axe A2 est ainsi décalé vers le côté supérieur du drone, par rapport au plan horizontal H.
- [0078] Les premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B et le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 sont par exemple chacun constitués d'une caméra numérique ou d'un appareil photo numérique.
- [0079] Les capteurs respectifs des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B sont de préférence des capteurs trichromes RGB à haute résolution, par exemple 8 mégapixels. De plus, les premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B sont avantageusement configurés pour délivrer un flux compressé en sortie, par exemple un flux vidéo encodé selon l'une des normes MPEG.
- [0080] Le capteur du deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 est de préférence également un capteur trichrome RGB, préférentiellement à matrice de Bayer. Ce capteur est avantageusement d'une résolution supérieure à celle des capteurs respectifs des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B, par exemple une résolution supérieure ou égale à 12 mégapixels. De plus, le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 est avantageusement configuré pour délivrer un flux d'images non compressées, par exemple encodé sur 12 bits.
- [0081] Dans le mode de réalisation illustré, chaque source de lumière 16A, 16B consiste en une rangée longitudinale d'éléments lumineux, par exemple des diodes électroluminescentes (LED), portés par – ou intégrés dans – une structure de forme allongée dans la direction longitudinale D fixée sur le support 28A, 28B correspondant ou intégrée dans ce dernier. En variante, plusieurs rangées longitudinales d'éléments lumineux parallèles peuvent être prévues sur chaque support 28A, 28B. En variante encore, chaque source de lumière 16A, 16B peut consister en un unique élément lumineux de forme allongée dans la direction longitudinale D, ou en plusieurs éléments lumineux de ce type parallèles les uns aux autres. Chaque source de lumière 16A, 16B est de

préférence peu directive de manière à permettre l'éclairage de surfaces à analyser. Le degré d'ouverture (dans le plan transversal) du faisceau lumineux émis par chaque source de lumière 16A, 16B est choisi en fonction de paramètres du procédé d'inspection dont la description va suivre, notamment de la forme de la surface à analyser et de la distance moyenne prévue entre le drone volant 12 et une telle surface au cours de la mise en œuvre du procédé.

[0082] Le dispositif lumineux 16 présente de préférence une étendue longitudinale LLS supérieure à l'envergure d'un ensemble constitué par le châssis 22 et les rotors 24 du drone volant 12, et par exemple égale à 1 mètre ([fig.9]), ou davantage. Dans des modes de réalisation de l'invention, cette étendue longitudinale LLS est au moins égale à une fois et demi l'écartement maximal  $D_{max}$  entre les axes respectifs des rotors 24 du drone volant 12 ([fig.1]). Une grande étendue longitudinale LLS par rapport à l'envergure précitée permet d'optimiser l'efficacité de mise en œuvre du procédé d'inspection tout en limitant le dimensionnement, et donc le coût, du drone volant 12, comme cela apparaîtra plus clairement dans ce qui suit. La rangée d'éléments lumineux de chacune des sources de lumière 16A, 16B comporte par exemple une densité linéique d'éléments lumineux telle que les sources de lumière 16A, 16B paraissent continues à une distance nominale d'inspection à laquelle le procédé d'inspection est destiné à être mis en œuvre. Une densité linéique importante d'éléments lumineux permet une bonne homogénéité de l'éclairage de la surface à inspecter. Bien entendu, le choix de ces paramètres peut être optimisé notamment en fonction des dimensions d'une surface à inspecter.

[0083] Les sources de lumière 16A, 16B sont avantageusement configurées pour émettre une lumière verte, à laquelle les capteurs à matrice RGB de Bayer équipant les premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B présentent un pic de sensibilité. Une telle couleur présente en outre l'avantage de faciliter la distinction entre un reflet du dispositif lumineux 16 et des reflets parasites produits par des dispositifs d'éclairage conventionnels, tels que des tubes à néon.

[0084] Le drone volant 12 intègre bien entendu une batterie de manière à alimenter le dispositif lumineux 16 et l'ensemble d'acquisition d'images 17 en énergie électrique. Cette batterie peut être distincte de – ou confondue avec – une ou des batteries alimentant les rotors 24, le gyrostabilisateur 32, et les premier et deuxième dispositifs d'entraînement 30 et 34.

[0085] En référence aux figures 5-7, un système 10 pour inspecter une surface apte à réfléchir la lumière comprend, selon un mode de réalisation préféré de l'invention, un drone volant 12 du type décrit ci-dessus ainsi qu'un dispositif de traitement de données 18.

[0086] Le dispositif de traitement de données 18 est un dispositif générique du commerce tel

qu'un ordinateur, une tablette ou un smartphone ou équivalent, doté d'un programme conçu pour la mise en œuvre du procédé d'inspection selon l'invention, ou est un appareil conçu spécifiquement pour la mise en œuvre de ce procédé. Dans des modes de réalisation de l'invention, le dispositif de traitement de données 18 peut être partiellement ou totalement embarqué sur le drone volant 12. Dans tous les cas, le dispositif de traitement de données 18 est apte à échanger des données avec les premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B et le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 du drone volant 12, par exemple par liaison sans-fil. Le dispositif de traitement de données 18 peut avantageusement être conçu pour commander le vol du drone volant 12 ou pour s'interfacer avec une unité de commande du drone volant 12.

- [0087] Un procédé pour inspecter une surface apte à réfléchir la lumière, selon un mode de réalisation de l'invention, va maintenant être décrit en référence constante à la [fig.16].
- [0088] Une première étape A d'un tel procédé comprend la mise à disposition du drone volant 12 ou, le cas échéant, du système 10 complet.
- [0089] La [fig.4] illustre une partie d'une surface 30 à inspecter. Le procédé selon l'invention est applicable dès lors que la surface 30 présente une brillance suffisante pour permettre de distinguer un reflet spéculaire du dispositif lumineux 16 sur cette surface. À cet égard, le procédé est préférentiellement appliqué aux surfaces présentant un degré de brillant spéculaire au moins égal à 10% (au sens de la norme ISO 2813). Il est à noter que le procédé selon l'invention est applicable à des surfaces présentant un effet de peau d'orange (en anglais : « orange peel effect »), par exemple du fait du type de peinture dont peut être revêtue une telle surface, comme cela apparaîtra plus clairement dans ce qui suit.
- [0090] L'invention est applicable à des surfaces à inspecter de géométries variées. Toutefois, dans le cadre du mode de réalisation illustré de l'invention, la surface 30 à inspecter présente, abstraction faite d'éventuels enfoncements, une géométrie telle que, dans tout plan de section orthogonale à une certaine direction, la fonction  $\theta(s)$ , qui détermine l'angle  $\theta$  que fait le vecteur  $\mathbf{n}$  normal à la surface au point d'abscisse  $s$  par rapport à un plan de référence, tel qu'un plan horizontal (X, Y), défini par rapport à un repère orthonormé {X, Y, Z}, en fonction de l'abscisse curviligne  $s$  dans ledit plan de section ([fig.4]), est une fonction bijective.
- [0091] La surface 30 est ainsi une surface de forme cylindrique de section circulaire, ou, en variante, une surface de forme cylindrique de section elliptique ou ovale, ou plus généralement de section annulaire pouvant être localement approximée par un cylindre de révolution. Dans ce cas, le plan ou les plans de section considérés pour la mise en œuvre du procédé sont préférentiellement des plans transversaux à un axe AX de la surface, tandis que le plan horizontal de référence, pour la définition de l'angle  $\theta$  et de

l'abscisse curviligne  $s$ , comprend l'axe AX.

- [0092] Dans une application particulière du procédé selon l'invention, la surface 30 est la surface extérieure d'un aéronef, en particulier la surface extérieure du fuselage d'un avion.
- [0093] Dans d'autres modes de réalisation de l'invention, la surface 30 est une surface de forme conique, auquel cas la surface 30 est localement approximée par un cylindre de révolution pour la mise en œuvre du procédé.
- [0094] En référence à la [fig.5], le procédé selon l'invention comporte une étape B consistant à déplacer le drone volant 12 en regard de la surface 30 selon une trajectoire T1 ou T3 en alternant des phases de vol pseudo-stationnaire ST, dans lesquelles le drone volant 12 est sensiblement immobile ou se déplace à vitesse relativement lente à proximité d'un point de vol prédéterminé, et des phases transitoires TR reliant deux points de vol successifs et au cours desquelles la vitesse de déplacement du drone est supérieure à la vitesse éventuelle du drone dans les phases de vol pseudo-stationnaire, de manière à mettre en œuvre les étapes B1 et B2 suivantes, respectivement au cours des phases transitoires TR et au cours des phases de vol pseudo-stationnaire ST.
- [0095] En référence aux figures 5 à 8, l'étape B1 consiste, au cours des phases transitoires TR, les sources de lumière 16A, 16B étant allumées, à acquérir au moins une série d'images  $\{I(1)...I(n)\}$  de portions  $P(1)...P(n)$  de la surface 30 au moyen de chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B, et facultativement au moyen du deuxième dispositif d'acquisition d'images 15, pendant le déplacement du drone volant 12 en regard de la surface 30.
- [0096] La trajectoire T1 ou T3 est telle qu'un axe optique 40 (figures 5 et 7) respectif de chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B demeure dans un plan de section correspondant de la surface 30 (par exemple le plan de coupe des figures 6 et 7). Dans l'exemple illustré, chaque source de lumière 16A, 16B est ainsi maintenue dans une orientation telle que la direction longitudinale D de celle-ci soit sécante audit plan de section correspondant, et de sorte que, pour chaque image  $I(1)...I(n)$  de la série, la source de lumière 16A, 16B correspondante éclaire la portion  $P(1)...P(n)$  correspondante de la surface 30. Dans l'exemple illustré, chaque source de lumière 16A, 16B est maintenue dans une orientation telle que la direction longitudinale D de celle-ci soit orthogonale audit plan de section.
- [0097] Dans le mode de réalisation préféré de l'invention, la trajectoire T1 ou T3 du drone volant 12 pendant l'acquisition d'une série donnée d'images  $\{I(1)...I(n)\}$  est une trajectoire inscrite dans un plan de section A-A transversal à l'axe AX de la surface 30.
- [0098] Le cas échéant, en référence à la [fig.5], la trajectoire globale du drone volant 12 pour l'acquisition successive de plusieurs séries d'images par chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B comporte des premières portions de tra-

jectoire T1 et T3 inscrites respectivement dans des plans de section A-A transversaux à l'axe AX de la surface 30, et des deuxièmes portions de trajectoire T2 reliant les premières portions de trajectoire T1, T3 deux-à-deux, en étant par exemple orientées sensiblement parallèlement à l'axe AX de la surface 30. Dans un but d'efficacité, les premières portions T3 sont parcourues en sens inverse par rapport aux premières portions T1 et sont mises en œuvre en alternance avec ces dernières.

- [0099] Les plans de section transversaux à l'axe AX, dans lesquels sont définis les premières portions de trajectoire T1 et T3, sont espacés les uns des autres d'une distance telle que la totalité de la surface à analyser soit balayée au moins une fois par le reflet du dispositif lumineux 16 vu par l'un au moins des dispositifs d'acquisition d'images mis en œuvre dans l'étape B1, en prenant en compte la discontinuité due au deuxième dispositif d'acquisition d'images 15. Il est à noter que la [fig.8] montre le reflet spéculaire vu par l'un des deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B.
- [0100] Les images acquises à l'étape B1 sont particulièrement adaptées à la détection d'enfoncements sur la surface 30 par analyse du reflet spéculaire SR, une telle détection pouvant être opérée de manière visuelle ou, de préférence, au moyen du dispositif de traitement de données 18 dans une étape C1 du procédé, comme cela apparaîtra plus clairement dans ce qui suit.
- [0101] Les points de vol sont avantageusement définis de manière à favoriser des transitions dans lesquelles le reflet du dispositif lumineux 16 balaie le plus vite possible la surface à inspecter. Durant les phases transitoires TR, les vitesses et accélérations maximales du drone volant 12 sont paramétrées de manière à assurer la sécurité des opérations, tandis que la qualité de l'image n'est en soit pas le facteur limitant pour la mise en œuvre du procédé de détection d'enfoncements qui va être décrit dans ce qui suit. Durant ces transitions, les sources de lumière 16A, 16B restent allumées et les premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B acquièrent des images à une cadence relativement élevée, par exemple de 20 images par seconde.
- [0102] De plus, le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 est avantageusement utilisé de la même manière que les premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B durant les phases transitoires TR afin d'acquérir des images de portions complémentaires de la surface à analyser. Le nombre de premières portions de trajectoire T1, T3 peut ainsi être réduit au mieux. Le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 est dans ce cas avantageusement utilisé à une résolution inférieure à sa résolution nominale, ce qui permet d'économiser de la mémoire de stockage, mais aussi de réduire le temps de traitement des images.
- [0103] Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, les images acquises par le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 sont transmises au sol en temps réel pendant toute l'étape B, tandis que les images acquises par les premiers dispositifs

d'acquisition d'images 14A, 14B pendant l'étape B1 sont stockées et traitées par une unité de traitement embarquée sur le drone volant et faisant partie du dispositif de traitement de données 18. Dans un tel cas, les images acquises par le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 à l'étape B1 peuvent en outre permettre de vérifier la qualité de la prise de vue en temps réel.

- [0104] Enfin, à l'approche de chaque point de vol, le drone volant 12 ralentit et le mode de fonctionnement de l'ensemble d'acquisition d'images 17 est modifié quand la vitesse du drone passe en dessous d'un seuil, par exemple de 2 cm/s. Le dispositif lumineux 16 s'éteint et le deuxième dispositif d'acquisition d'images 15 passe en mode d'acquisition à une résolution supérieure et à une fréquence réduite, par exemple une fréquence de 5 images/s, pour la mise en œuvre de l'étape B2 du procédé.
- [0105] L'étape B2 consiste donc, au cours des phases de vol pseudo-stationnaire ST, les sources de lumière 16A, 16B étant éteintes, à acquérir d'autres images de portions de la surface 30 au moyen du deuxième dispositif d'acquisition d'images 15, ces autres images ayant une résolution supérieure à celle des images acquises à l'étape B1.
- [0106] Du fait de l'absence de reflet provenant du dispositif lumineux 16 et de leur résolution supérieure, les autres images acquises à l'étape B2 sont particulièrement adaptées à la détection de défauts superficiels sur la surface 30, une telle détection pouvant être opérée de manière visuelle ou, de préférence, au moyen du dispositif de traitement de données 18 dans une étape C2 du procédé, comme cela apparaîtra plus clairement dans ce qui suit.
- [0107] Du fait du caractère sensiblement stationnaire du drone volant 12, les images acquises dans une phase de vol pseudo-stationnaire ST, par exemple au nombre de cinq images, couvrent sensiblement la même portion de la surface à analyse et peuvent être avantageusement combinées afin d'accroître le rapport signal à bruit (SNR), et/ou comparées de manière à identifier d'éventuels reflets parasites grâce à un léger décalage entre les images.
- [0108] De ce fait, la contrainte concernant le niveau de précision de l'asservissement en position du drone volant 12 pendant les phases de vol pseudo-stationnaire ST peut être relativement relâchée, en tolérant par exemple une erreur de quelques centimètres par rapport à la consigne, et en assurant pas une stabilité parfaite du drone. Le drone volant 12 est d'ailleurs avantageusement équipé de moyens de mesure de sa position réelle avec une précision centimétrique. Un traitement d'image ultérieur peut ainsi permettre une localisation millimétrique de défauts superficiels sur la surface inspectée. Une telle tolérance permet un gain d'énergie significatif par rapport à l'application d'une consigne de positionnement stricte et permet également de d'effectuer l'inspection plus rapidement en n'attendant pas une stabilisation parfaite du drone par rapport à la surface à inspecter.

- [0109] Le procédé comporte en outre une étape C consistant à mettre en œuvre le dispositif de traitement de données 18 pour opérer au moins l'une des étapes C1 et C2 suivantes.
- [0110] L'étape C1 consiste à analyser la forme d'un reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans tout ou partie des images de chaque série d'images acquise à l'étape B1 de manière à estimer la position d'éventuels enfoncements 32 de la surface 30, au moyen du dispositif de traitement de données 18.
- [0111] Plus précisément, l'étape C1 comporte, pour chaque série d'images acquise à l'étape B1 par chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A et 14B, une étape C1-I consistant, pour chaque image I(1)...I(n) de la série d'images, à mettre en œuvre le dispositif de traitement de données 18 de manière à opérer les sous-étapes c1 à c5 qui suivent.
- [0112] La première sous-étape c1 consiste à identifier un reflet spéculaire du dispositif lumineux 16 dans l'image ([fig.10]), par exemple par segmentation de celle-ci. Il est à noter que, par souci de simplification, la discontinuité du reflet spéculaire due à l'espacement entre les deux sources de lumière 16A, 16B est omise sur les figures.
- [0113] À cet effet, le dispositif de traitement de données met par exemple en œuvre un algorithme de seuillage adaptatif. La [fig.11] illustre l'image correspondante ainsi segmentée, et permet donc d'apercevoir le reflet spéculaire ISR ainsi déterminé.
- [0114] La deuxième sous-étape c2 consiste, à partir du reflet spéculaire ISR identifié dans l'image à l'étape précédente, à estimer la position médiane, orthogonalement à la direction longitudinale D du dispositif lumineux 16, d'un reflet spéculaire idéal du dispositif lumineux 16 dans l'image, correspondant à la position médiane d'un tel reflet spéculaire en l'absence d'enfoncement de la surface 30.
- [0115] À cet effet, le dispositif de traitement de données 18 détermine, par exemple par régression linéaire, une ligne médiane ML du reflet spéculaire ISR qui soit orientée parallèlement à la direction longitudinale D du dispositif lumineux 16 ([fig.12]). Une telle ligne peut être assimilée à la position médiane du reflet spéculaire idéal du dispositif lumineux 16, dès lors que les enfoncements 32 susceptibles d'affecter la surface 30 sont de petite dimension par comparaison avec l'étendue longitudinale LSR, sur la surface 30, du reflet spéculaire SR du dispositif lumineux 16 (figures 5, 8 et 9).
- [0116] La troisième sous-étape c3 consiste à déterminer une distance  $R_c$  entre le drone volant 12 et la surface 30. Plus précisément, la distance  $R_c$  est définie, pour le premier dispositif d'acquisition d'images 14A ou 14B considéré, comme étant la distance entre un centre optique OC du premier dispositif d'acquisition d'images 14A ou 14B et la surface 30 (c'est-à-dire la distance entre le centre optique OC et le point de la surface 30 situé au plus près du centre optique OC).
- [0117] À cet effet, le dispositif de traitement de données 18 détermine une étendue longitudinale apparente LISR du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans

l'image ([fig.11]), et en déduit une distance  $R_c$  entre le drone volant 12 et la surface 30 ([fig.6]). En référence aux figures 8 et 9, l'étendue longitudinale LSR de l'origine SR, sur la surface 30, du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 vu par chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B, se déduit de l'étendue longitudinale LLS du dispositif lumineux 16 par de simples considérations d'optique géométrique. Par « origine du reflet spéculaire sur la surface 30 », il faut simplement comprendre les points de la surface 30 dont sont issus les rayons lumineux ayant formé le reflet spéculaire ISR dans l'image.

- [0118] Dans l'exemple illustré, dans lequel le drone comporte deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B agencés aux extrémités du dispositif lumineux 16, l'étendue longitudinale LSR de l'origine SR, sur la surface 30, du reflet spéculaire ISR, est égale à la moitié de l'étendue longitudinale LLS du dispositif lumineux 16. Connaissant l'étendue longitudinale LSR de l'origine SR du reflet spéculaire ISR sur la surface 30, ainsi que les caractéristiques intrinsèques des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B telles que la distance focale, la position du centre optique OC ([fig.7]), et d'éventuels paramètres de distorsion, l'étendue longitudinale apparente LISR précédemment déterminée du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans l'image permet de déduire la distance  $R_c$  entre le drone volant 12 et la surface 30.
- [0119] La troisième sous-étape c3 peut être mise en œuvre avant, pendant, ou après la mise en œuvre de la deuxième sous-étape c2.
- [0120] La quatrième sous-étape c4 consiste à déterminer la position, sur la surface 30, de chaque point de l'origine SR du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans l'image.
- [0121] Dans le mode de réalisation illustré, cette sous-étape c4 est mise en œuvre d'une manière qui va être décrite ci-après en référence plus particulièrement à la [fig.7].
- [0122] À partir de données de départ que sont la position médiane estimée du reflet spéculaire idéal dans l'image, correspondant à la ligne ML dans l'exemple illustré, la distance  $R_c$  entre le drone volant 12 et la surface 30, et des caractéristiques des premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B (distance focale, dimensions des photosites, position du centre optique OC, etc.), le dispositif de traitement de données 18 détermine l'angle  $\gamma$  entre l'axe optique 40 du premier dispositif d'acquisition d'images 14A ou 14B considéré et un plan P défini comme étant le plan passant par le centre optique OC du premier dispositif d'acquisition d'images et dans lequel s'inscrit une position médiane d'une origine du reflet spéculaire idéal du dispositif lumineux 16 sur une surface idéale 31 correspondant à la forme qu'aurait la surface 30 sans enfoncement. Par définition, l'origine du reflet spéculaire idéal se confond avec l'origine SR du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16, sur toute partie non enfoncée de

la surface 30.

- [0123] Le plan P comprend donc les rayons lumineux virtuels RI qui formeraient le reflet spéculaire du dispositif lumineux 16 reçu par le premier dispositif d'acquisition d'images 14A ou 14B considéré si la surface 30 étant sans déformation ([fig.7]). Dans toute partie non enfoncée de la surface 30, ces rayons lumineux RI sont orientés dans un plan P sensiblement normal à la surface 30 dès lors que la distance entre l'axe optique 40 du premier dispositif d'acquisition d'images 14A, 14B et un axe longitudinal moyen des sources de lumière 16A, 16B (correspondant à l'axe d'alignement AA dans l'exemple illustré) demeure négligeable par rapport à la distance Rc entre le drone volant 12 et la surface 30.
- [0124] Par ailleurs, l'orientation  $\phi$  de l'axe optique 40 par rapport à un plan horizontal (X, Y) est déterminée au moyen d'un gyroscope ou d'un dispositif analogue équipant le drone volant 12 et d'informations fournies par le premier dispositif d'entraînement 30.
- [0125] En additionnant l'angle  $\gamma$  entre l'axe optique 40 et le plan P comprenant les rayons lumineux virtuels Ri, et l'inclinaison  $\phi$  de l'axe optique 40, le dispositif de traitement de données 18 détermine l'angle correspondant  $\theta$ , et en déduit l'abscisse  $s$  de la position médiane de l'origine du reflet spéculaire idéal sur la surface 30, au moyen de la relation bijective existant entre  $\theta$  et  $s$ .
- [0126] Le dispositif de traitement de données 18 peut en déduire la position de l'ensemble des points de l'image sur la surface 30, et en déduit en particulier la position, sur la surface 30, de l'origine de chaque point du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans l'image. Ainsi, le dispositif de traitement de données établit une correspondance entre chaque point de l'image et chaque point de la portion correspondante de la surface 30.
- [0127] La cinquième sous-étape c5 consiste à estimer une pente locale de la surface 30 en chaque point du reflet spéculaire SR vu par le premier dispositif d'acquisition d'images 14A ou 14B considéré, au moins à partir d'une estimation de la distance éventuelle entre chaque point du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans l'image et la position médiane du reflet spéculaire idéal, correspondant à la ligne ML.
- [0128] En référence à la [fig.6], la mise en œuvre de la sous-étape c5 repose sur le modèle de reflet suivant : la surface 30 étant approximée par un cylindre de révolution comme expliqué ci-dessus, Ra désigne la courbure locale de la surface 30 dans un plan de section donné, et il est rappelé que Rc désigne la distance entre le drone volant 12 et la surface 30. L'angle  $\alpha$  désigne l'angle entre la surface 30 (avec d'éventuels enfoncements) et la surface idéale (sans déformation). L'angle  $\epsilon c$  est l'angle entre un rayon lumineux réel RR produit par le reflet spéculaire SR vu par le dispositif d'acquisition d'image 14A (ou 14B) considéré, dans le plan de section considéré, en présence d'un enfoncement 32 de la surface 30, et un rayon lumineux idéal RI que

produirait le reflet spéculaire vu par le dispositif d'acquisition d'image 14A (ou 14B), dans le plan de section considéré, en l'absence d'enfoncement. Ce dernier rayon est orienté dans le plan P sensiblement normal à la surface idéale 31 (correspondant à la forme qu'aurait la surface 30 sans l'enfoncement 32) comme expliqué ci-dessus. La distance  $\Delta$  est définie entre le point de la surface 30 d'où est issu le rayon lumineux réel RR et le point de la surface idéale 31 d'où est issu le rayon lumineux idéal RI.

[0129] La largeur de chaque source de lumière 16A, 16B (orthogonalement à sa direction longitudinale D) et l'éventuel effet de peau d'orange de la surface 30 sont modélisés conjointement par une distribution d'orientations  $\Omega$  autour d'un angle moyen  $\beta$ . Il est aisément démontrable que :

$$[0130] \quad \alpha = \beta + \Omega = \epsilon_a + \epsilon_c = \Delta \times \left( \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} \right)$$

[0131] La déviation  $\Omega$  induite par la largeur de chaque source de lumière 16A, 16B et par l'éventuel effet de peau d'orange peut être considérée comme bornée :

$$\Omega \in [-\Omega_{max}; +\Omega_{max}]$$

[0132] Il est à noter que dans le cas d'une surface 30 de forme cylindrique de révolution ou de forme approximable par un cylindre de révolution (abstraction faite des éventuels enfoncements), et de sources de lumière 16A, 16B longilignes sensiblement parallèles à l'axe de révolution AX du cylindre, la distorsion du reflet spéculaire ne dépend au premier ordre que de l'angle  $\alpha$ , tandis que l'inclinaison de la surface 30 dans la direction X de l'axe AX n'intervient qu'au second ordre.

[0133] Le dispositif de traitement de données 18 détermine une estimation du maximum de déviation  $\Omega_{max}$  en estimant la largeur du reflet spéculaire idéal du dispositif lumineux 16 dans l'image (correspondant au reflet spéculaire qui serait perçu en l'absence d'enfoncement de la surface 30). À cet effet, le dispositif de traitement de données 18 détermine la largeur médiane IISR-CO de la plus grande portion connexe ISR-CO du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans l'image ([fig.11]). Cette largeur médiane IISR-CO étant considérée comme une estimation de la largeur du reflet spéculaire idéal, le dispositif de traitement de données en déduit l'estimation du maximum de déviation  $\Omega_{max}$ , égal à la largeur médiane IISR-CO divisée par le double de la distance  $R_c$  entre le drone volant 12 et la surface 30.

[0134] Enfin, le dispositif de traitement de données 18 estime la distance  $\Delta'$  éventuelle entre chaque point du reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans l'image, et la position médiane du reflet spéculaire idéal, correspondant à la ligne ML ([fig.12]), et en déduit la distance  $\Delta$  correspondante sur la surface 30 par de simples considérations géométriques.

[0135] Étant donné que  $\Omega \in [-\Omega_{max}; +\Omega_{max}]$  et que  $\beta + \Omega = \Delta \times \left( \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} \right)$ , le dispositif de traitement de données 18 en déduit une borne inférieure  $\beta_{min}$  et une borne

supérieure  $\beta_{max}$  de la pente locale  $\beta$  de la surface 30, égale à la dérivée de l'enfoncement de la surface 30 par rapport à l'abscisse curviligne :  $\beta = \frac{\partial r}{\partial s}$ .

- [0136] À l'issue de la mise en œuvre de l'étape C1-I pour l'ensemble des images de chaque série, le dispositif de traitement de données 18 dispose d'un ensemble d'inéquations concernant la pente locale  $\beta$  de la surface 30 en chaque point de la surface 30 ayant renvoyé un reflet spéculaire du dispositif lumineux 16 au moins une fois au cours de l'étape B1 d'acquisition des images. À titre illustratif, la partie haute de la [fig.13] est un assemblage d'images ainsi acquises, qui montre un tel ensemble de points ayant renvoyé un reflet spéculaire du dispositif lumineux 16, dans une région donnée de la surface 30.
- [0137] Dans une étape C1-II ultérieure du procédé, le dispositif de traitement de données 18 s'appuie sur l'ensemble des estimations de pentes locales obtenues à l'issue de l'étape C1-I, pour au moins une région de la surface 30, pour estimer la position d'éventuels enfoncements de la surface 30.
- [0138] À cet effet, dans l'exemple préférentiel illustré, le dispositif de traitement de données 18 effectue une optimisation de manière à déterminer, le long de différents plans de section parallèles de la surface, des profils correspondants de la pente  $\frac{\partial r}{\partial s}$  (figure 13 : partie basse) compatibles avec les valeurs de pentes minimales  $\beta_{min}$  et maximales  $\beta_{max}$  définies à l'étape C1-I, tout en minimisant une fonction représentative de la somme des pentes le long de chacun des plans de section (en valeur absolue). L'optimisation réalisée par le dispositif de traitement de données porte par exemple sur l'intégrale suivante :
- [0139] 
$$\int_{s_{min}}^{s_{max}} \left\| \frac{\partial r}{\partial s} \right\|^2 ds$$
- [0140] Le long de chacun des plans de section considérés, le dispositif de traitement de données 18 détermine un profil d'enfoncement correspondant en calculant l'intégrale des pentes locales précédemment déterminées (en faisant par exemple l'hypothèse d'un enfoncement nul à l'extrémité du domaine d'intégration). La figure 14 illustre la courbe d'enfoncement  $\Delta r$  ainsi obtenue pour le plan de section A-A défini sur la partie haute de la [fig.13].
- [0141] En juxtaposant l'ensemble des profils d'enfoncement reconstruits sur des plans de sections adjacents, le dispositif de traitement de données 18 détermine une carte de profondeur de la surface 30, ou d'au moins une partie de celle-ci, comme illustré sur la [fig.15].
- [0142] Pour une série d'images donnée, le nombre de plans de section considérés dans l'étape C1-II est par exemple égal à la définition longitudinale minimale (en pixels) du

reflet spéculaire ISR du dispositif lumineux 16 dans les images de la série.

- [0143] Le dispositif de traitement de données applique par exemple un filtrage spatial de manière à réduire ou supprimer le bruit de mesure et les basses fréquences correspondant à des déformations de grande dimension ne correspondant pas aux enfoncements à détecter.
- [0144] Finalement, le dispositif de traitement de données 18 recense les éventuels enfoncements 32 de la surface 30 en assimilant toute zone de ladite carte de profondeur, correspondant à une profondeur supérieure à un seul prédéterminé, à un tel enfoncement.
- [0145] Le procédé de détection des enfoncements décrit ci-dessus présente notamment l'avantage d'être robuste vis-à-vis du flou de bouger induit par d'éventuelles vibrations parasites du drone volant 12, de sorte qu'il n'est pas requis que les premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A, 14B soient gyrostabilisés. Il en résulte un avantage certain en termes de masse globale et de moment d'inertie du drone, et donc en termes d'autonomie et de manœuvrabilité.
- [0146] Par ailleurs, l'étape C2 consiste de manière générale à analyser les autres images acquises à l'étape B2 de manière à détecter d'éventuels défauts superficiels de la surface 30, tels que des rayures, craquelures, coulures, etc.
- [0147] À cet effet, le dispositif de traitement 18 met avantageusement en œuvre un algorithme de combinaison des images afin d'en accroître le rapport signal à bruit (SNR), ainsi qu'un algorithme de détection de contraste, par exemple.
- [0148] D'une manière générale, à toute étape du procédé, l'homme du métier comprendra qu'il peut être opportun d'appliquer des techniques conventionnelles de réduction de bruit et d'optimisation du signal.
- [0149] L'homme du métier comprendra également que l'ordre de certaines étapes peut être différent de ce qui est décrit ci-dessus. Par exemple, les étapes B1 et C1-I peuvent être mise en œuvre en parallèle, le dispositif de traitement de données 18 mettant en œuvre les opérations de traitement de données de l'étape C1-I pour un plan de section donné de la surface 30 pendant l'acquisition d'une série d'images pour un autre plan de section de la surface, ou, au sein d'une même série d'images, le dispositif de traitement de données 18 mettant en œuvre les opérations de traitement de données de l'étape C1-I pour une image donnée pendant l'acquisition d'une autre image de la série.
- [0150] Du fait que le drone volant 12 est équipé de deux premiers dispositifs d'acquisition d'images 14A et 14B disposés aux extrémités opposées du dispositif lumineux 16, chaque dispositif perçoit des reflets spéculaires du dispositif lumineux 16 qui sont décalés sur la surface 30 à inspecter, de sorte que la partie de la surface analysée pour un trajet du drone volant selon un plan de section donné est accrue par rapport à ce qu'elle serait avec un unique premier dispositif d'acquisition d'images.

- [0151] La trajectoire suivie par le drone volant pour l'acquisition d'une ou de plusieurs séries d'images peut différer de ce qui est décrit ci-dessus. D'une manière générale, il est préférable que la trajectoire (ou le cas échéant les premières portions de trajectoire) du drone volant pour l'acquisition d'une série d'images (ou de chaque série d'images) soit définie selon un plan de plus grande courbure de la surface 30, tandis que, le cas échéant, les deuxièmes portions de trajectoire sont définies selon un plan de moindre courbure de la surface. Ainsi, dans l'exemple illustré, les plans de section définissant les premières portions de trajectoire T1 et T3 sont transversaux à la surface 30 et sont donc des plans dans lesquels la surface 30 présente une section incurvée (sensiblement circulaire), tandis que les deuxièmes portions de trajectoire T2 sont définies parallèlement à l'axe AX de la surface, direction dans laquelle la surface 30 présente une courbure nulle ou plus faible.
- [0152] L'homme du métier comprendra par ailleurs que la fréquence de prise de vue peut être adaptée en fonction de l'échantillonnage spatial souhaité sur la surface 30 le long d'un plan de section donné, cet échantillonnage étant dépendant de la courbure de la surface et de la dimension des enfoncements susceptibles d'affecter la surface 30.
- [0153] De manière facultative, le procédé peut comprendre une étape C1-I-bis intercalée entre l'étape C1-I et l'étape C1-II, consistant pour un opérateur à identifier visuellement un ou plusieurs enfoncements 32 de la surface 30 dans les images acquises à l'étape B1 et à sélectionner une ou plusieurs régions de la surface comportant le ou les enfoncements, de telle sorte que l'étape C1-II mise ensuite en œuvre par le dispositif de traitement de données 18 ne concerne que cette ou ces régions. Le temps de calcul requis par l'étape C1-II peut ainsi être réduit. Une telle étape C1-I-bis peut, en variante, être mise en œuvre au moyen d'une intelligence artificielle préalablement entraînée à reconnaître des déformations de reflet spéculaire caractéristiques d'un enfoncement de la surface.
- [0154] Par ailleurs, la sous-étape c4 décrite ci-dessus est mise en œuvre en tirant profit du caractère bijectif de la fonction  $\theta(s)$  reliant l'orientation  $\theta$  de la normale locale  $n$  à la surface 30 à l'abscisse curviligne  $s$  sur cette surface le long d'un plan de section donné.
- [0155] En variante, la sous-étape c4 peut reposer sur d'autres méthodes de recalage des images acquises, sur la surface 30, notamment des méthodes ne nécessitant pas que la surface 30 soit d'une forme telle que la fonction  $\theta(s)$  précitée soit une bijection. À cet effet, la sous-étape c4 repose par exemple sur la reconnaissance, dans au moins certaines des images acquises, de motifs existants sur la surface 30. Dans le cas où la surface 30 est la surface extérieure d'un aéronef, de tels motifs sont par exemple constitués de rangées de rivets. En variante encore, la sous-étape c4 peut reposer sur l'émission d'une lumière structurée par le dispositif lumineux 16 et l'analyse du reflet de structures formées par cette lumière sur la surface 30.

- [0156] D'une manière générale, le procédé selon l'invention permet l'analyse de surfaces de très grandes dimensions, par exemple de plusieurs centaines de mètres carrés, d'une manière particulièrement rapide, efficace et fiable, sans requérir de connaissance préalable précise de la forme de ces surfaces.
- [0157] Le procédé selon l'invention permet l'automatisation de l'ensemble des étapes d'analyse C1-I, C1-II, C2, et le cas échéant, C1-I-bis. Dès lors que la géométrie idéale de la surface 30 à inspecter est connue, au moins grossièrement, la commande du drone volant peut être intégralement ou partiellement réalisée de manière programmée, de sorte que l'automatisation de l'étape B1 du procédé est également possible.

## Revendications

- [Revendication 1] Drone volant (12) pour l'inspection de surfaces aptes à réfléchir la lumière, comprenant :
- un châssis (22) portant un ou plusieurs rotor(s) (24) ;
  - un dispositif lumineux (16) formé de deux sources de lumière (16A, 16B) ayant chacune une forme allongée selon une direction longitudinale (D) de chacune des sources de lumière (16A, 16B) ; et
  - un ensemble d'acquisition d'images, comprenant :
    - deux premiers dispositifs d'acquisition d'images (14) ;
    - un deuxième dispositif d'acquisition d'images (15) agencé entre les deux premiers dispositifs d'acquisition d'images (14) ; et

dans lequel les deux sources de lumière (16A, 16B) sont agencées respectivement entre le deuxième dispositif d'acquisition d'images (15) et chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images (14).

- [Revendication 2] Drone volant selon la revendication 1, dans lequel, au moins dans un état particulier du drone volant (12), les deux sources de lumière (16A, 16B), les deux premiers dispositifs d'acquisition d'images (14) et le deuxième dispositif d'acquisition d'images (15) sont alignés selon un axe d'alignement (AL) correspondant à la direction longitudinale (D) de chacune des sources de lumière (16A, 16B).

- [Revendication 3] Drone volant selon la revendication 1 ou 2, comprenant deux supports (28A, 28B) de forme allongée portés par le châssis (22) et s'étendant parallèlement à l'axe d'alignement (AL), dans lequel les deux premiers dispositifs d'acquisition d'images (14) sont rigidement fixés sur les deux supports respectivement, et dans lequel les deux sources de lumière (16A, 16B) sont rigidement fixées sur les deux supports respectivement.

- [Revendication 4] Drone volant selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, comprenant un premier dispositif d'entraînement (30) configuré pour déplacer chacun des deux premiers dispositifs d'acquisition d'images (14A, 14B) et/ou chacune des deux sources de lumière (16A, 16B) en rotation autour d'un premier axe (A1), dans une plage angulaire

- d'amplitude au moins égale à 30 degrés.
- [Revendication 5] Drone volant selon la revendication 4, dans lequel le premier axe est décalé des rotors (24) du drone volant de sorte que ces derniers demeurent à l'extérieur d'un champ de vision de chacun des deux premiers dispositifs d'acquisition d'images (14A, 14B) quelle que soit l'orientation de ces derniers dans une plage d'au moins 180 degrés autour du premier axe (A1).
- [Revendication 6] Drone volant selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel les deux sources de lumière (16A, 16B) sont configurées pour émettre une lumière verte.
- [Revendication 7] Drone volant selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, comprenant un gyrostabilisateur (32) par lequel le deuxième dispositif d'acquisition d'images (15) est fixé au châssis (22).
- [Revendication 8] Drone volant selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, comprenant un deuxième dispositif d'entraînement (34) configuré pour déplacer le deuxième dispositif d'acquisition d'images (15) en rotation autour d'un deuxième axe (A2), dans une plage angulaire d'amplitude au moins égale à 30 degrés.
- [Revendication 9] Drone volant selon la revendication 8, dans lequel le deuxième axe (A2) est décalé par rapport aux rotors (24) du drone volant de sorte que ces derniers demeurent à l'extérieur d'un champ de vision du deuxième dispositif d'acquisition d'images (15) quelle que soit l'orientation de ce dernier dans une plage d'au moins 180 degrés autour du deuxième axe (A2).
- [Revendication 10] Procédé pour inspecter une surface (30) apte à réfléchir la lumière, comprenant au moins les étapes suivantes :
- A) Mettre à disposition un drone volant (12) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 ;
  - B) Déplacer le drone volant (12) en regard de la surface (30) selon une trajectoire (T1, T3) en alternant des phases de vol pseudo-stationnaire et des phases transitoires au cours desquelles la vitesse de déplacement du drone volant (12) est supérieure à la vitesse éventuelle du drone volant (12) dans les phases de vol pseudo-stationnaire, de manière à mettre en œuvre les étapes suivantes:
    - B1) Au cours des phases transitoires, les sources de lumière (16A, 16B) étant allumées, acquérir au moins

une série d'images de portions de la surface (30) au moyen de chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images (14A, 14B) de sorte que, pour chaque image de chaque série, le dispositif lumineux (16) éclaire la portion correspondante de la surface (30) ;

- B2) Au cours des phases de vol pseudo-stationnaire, les sources de lumière (16A, 16B) étant éteintes, acquérir d'autres images de portions de la surface (30) au moyen du deuxième dispositif d'acquisition d'images (15), les autres images acquises à l'étape B2 ayant une résolution supérieure à celle des images acquises à l'étape B1.

[Revendication 11] Procédé selon la revendication 10, dans lequel, pour chaque série d'images acquise à l'étape B1, la trajectoire (T1, T3) du drone volant (12) est telle qu'un axe optique (40) de chacun des premiers dispositifs d'acquisition d'images (14A, 14B) demeure dans un plan de section (A-A) correspondant de la surface, et que les deux sources de lumière (16A, 16B) soient chacune dans une orientation telle que la direction longitudinale (D) de celles-ci soit sécante audit plan de section (A-A) de la surface.

[Revendication 12] Procédé selon la revendication 10 ou 11, comprenant en outre une étape C1 consistant à mettre en œuvre un dispositif de traitement de données (18) de manière à analyser la forme d'un reflet spéculaire (ISR) du dispositif lumineux (16) dans tout ou partie des images de chaque série d'images acquise à l'étape B1 de manière à estimer la position d'éventuels enfoncements (32) de la surface (30).

[Revendication 13] Procédé selon la revendication 12, dans lequel l'étape C1 comprend, pour chaque série d'images acquise à l'étape B1, les étapes suivantes :

- C1-I) Pour chaque image de la série d'images, mettre en œuvre le dispositif de traitement de données (18) de manière à :
  - c1) Identifier le reflet spéculaire (ISR) du dispositif lumineux (16) dans l'image ;
  - c2) À partir du reflet spéculaire identifié à la sous-étape précédente, estimer la position médiane, ortho-

gonalement à la direction longitudinale (D) des deux sources de lumière (16A, 16B), d'un reflet spéculaire idéal du dispositif lumineux (16) dans l'image, correspondant à la position médiane (ML) d'un tel reflet spéculaire en l'absence d'enfoncement de la surface (30) ;

- c3) Déterminer une distance ( $R_c$ ) entre le drone volant (12) et la surface (30) ;
  - c4) Déterminer la position, sur la surface (30), de chaque point d'une origine (SR) du reflet spéculaire (ISR) du dispositif lumineux (16) dans l'image ;
  - c5) Estimer une pente locale ( $\frac{\partial r}{\partial s}$ ) de la surface (30) en chaque point de l'origine (SR) du reflet spéculaire, au moins à partir d'une estimation de la distance ( $\Delta$ ) éventuelle entre chaque point du reflet spéculaire (ISR) de la source de lumière (16) dans l'image et la position médiane (ML) estimée du reflet spéculaire idéal ;
- C1-II) À partir de l'ensemble des estimations de pentes locales ( $\frac{\partial r}{\partial s}$ ) obtenues à l'issue de l'étape C1-I pour au moins une région de la surface, mettre en œuvre le dispositif de traitement de données (18) de manière à estimer la position d'éventuels enfoncements (32) de la surface.

[Revendication 14] Procédé selon l'une quelconque des revendications 10 à 13, comprenant en outre une étape C2 consistant à mettre en œuvre un, ou le, dispositif de traitement de données (18), de manière à analyser les autres images acquises à l'étape B2 de manière à détecter d'éventuels défauts superficiels de la surface (30).

[Revendication 15] Système pour inspecter une surface (30) apte à réfléchir la lumière, comprenant :

- un drone volant (12) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, et
- un dispositif de traitement de données (18) configuré pour la mise en œuvre de l'une au moins parmi l'étape C1 du procédé selon la revendication 12 ou 13 et l'étape C2 du procédé selon

la revendication 14.

[Fig. 1]

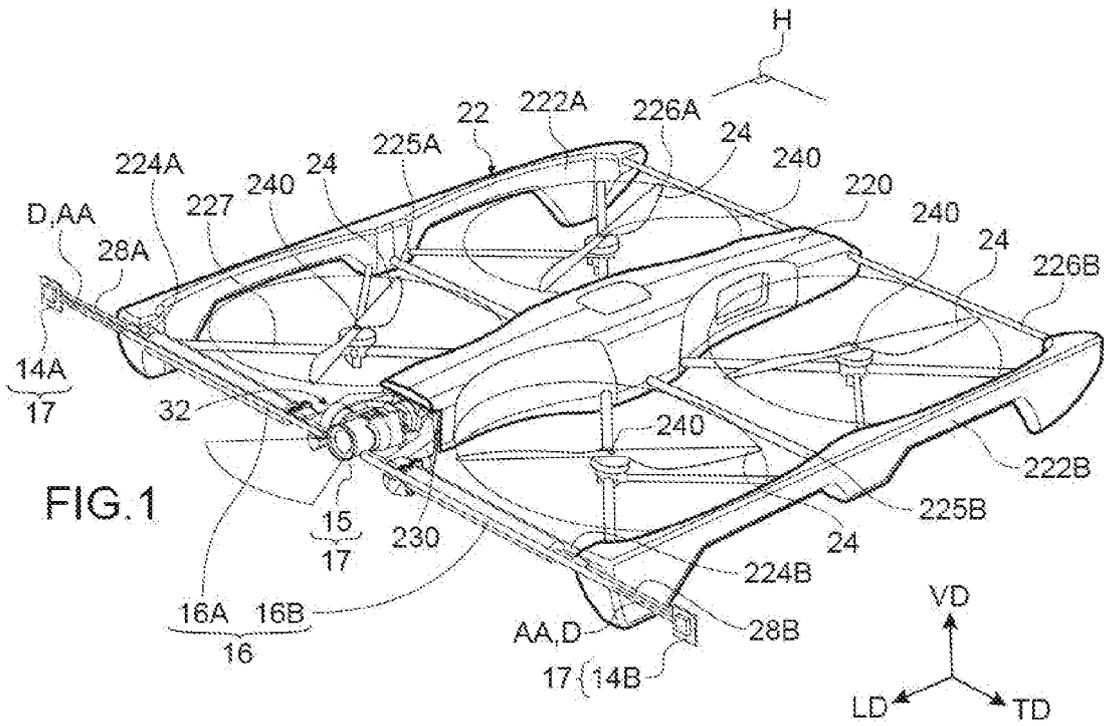


FIG. 1

[Fig. 1A]

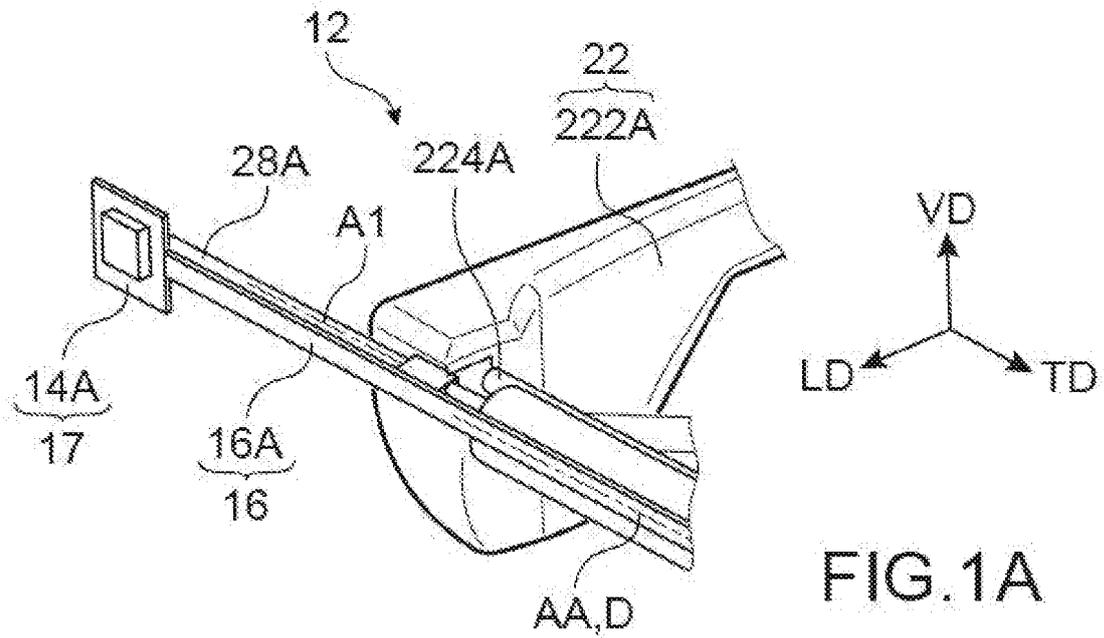
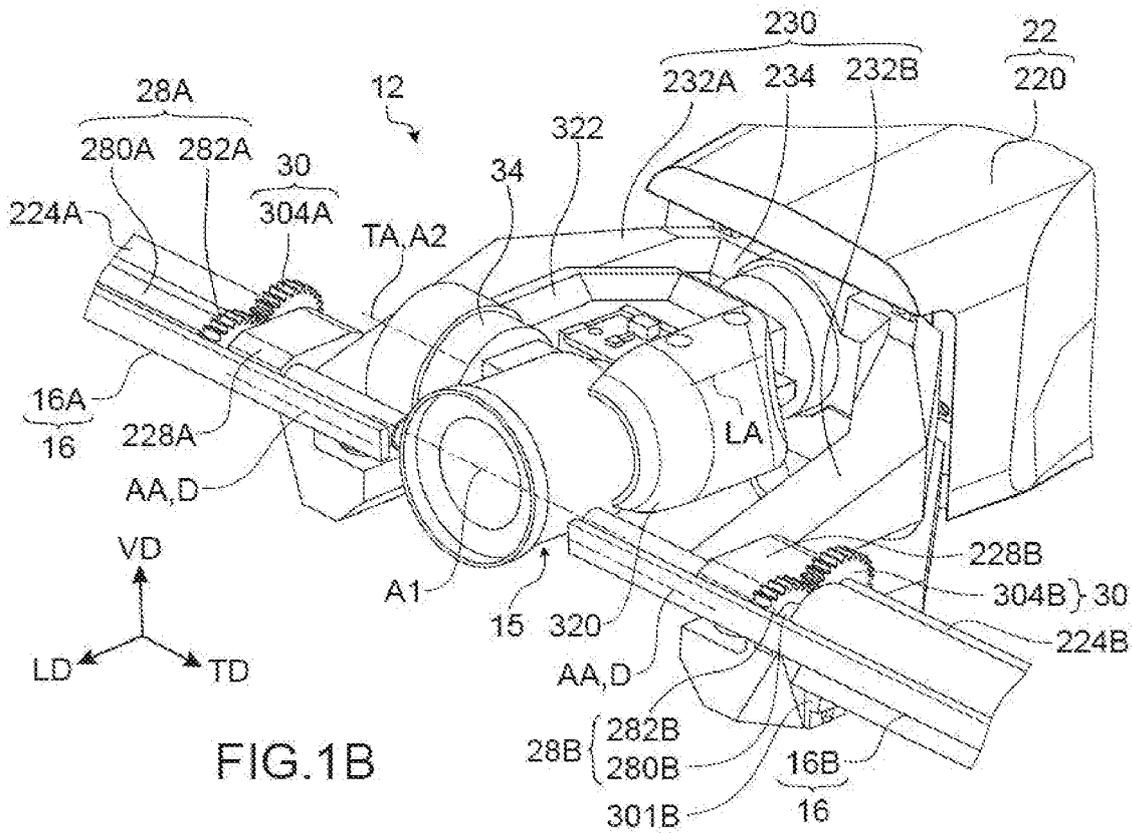
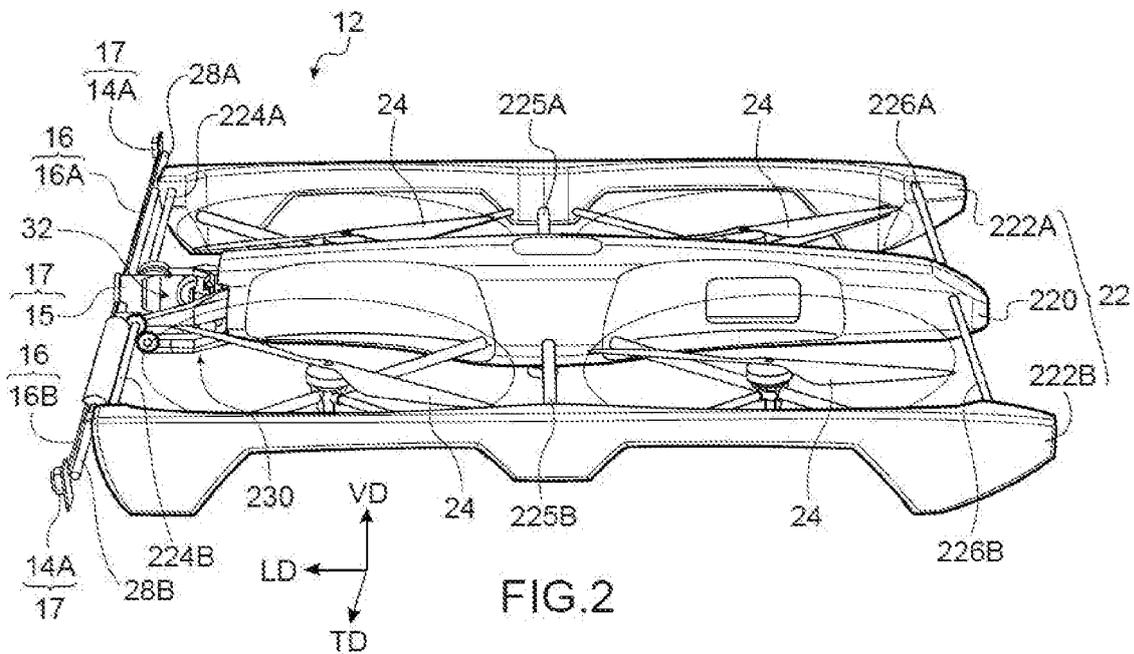


FIG. 1A

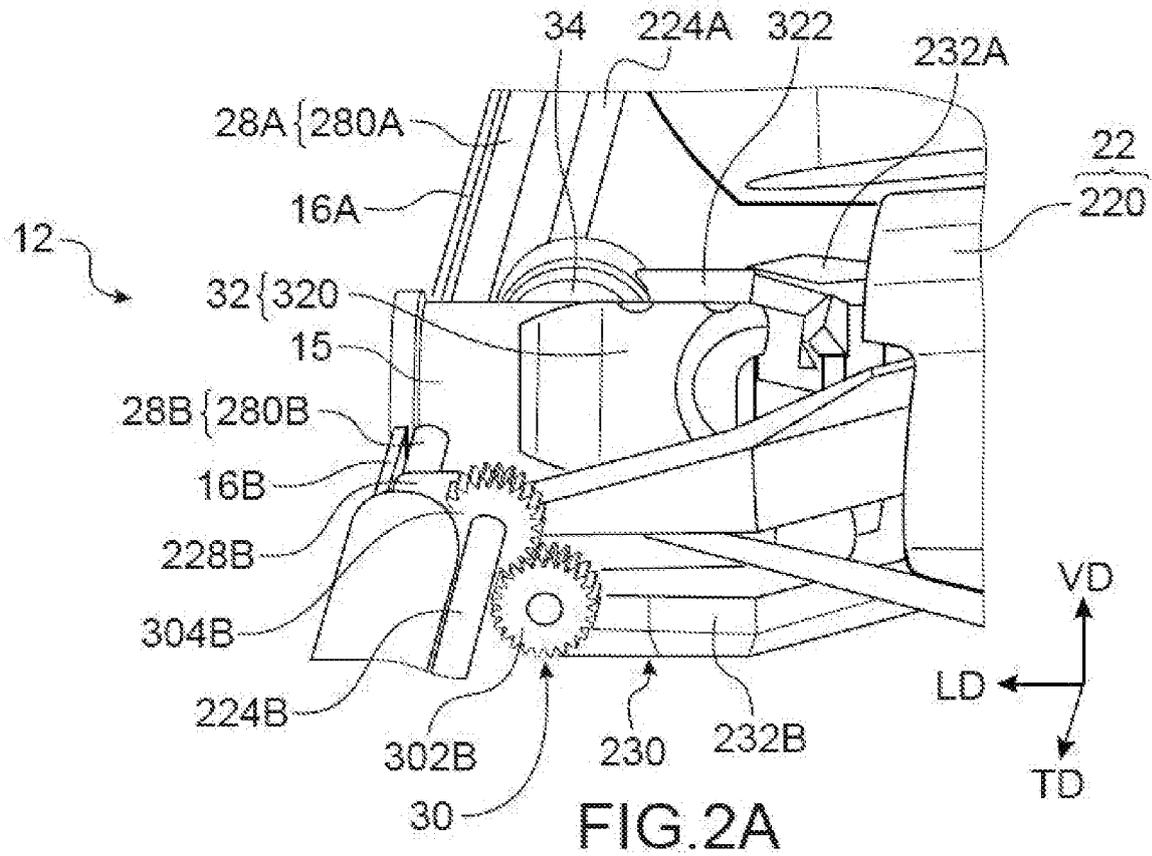
[Fig. 1B]



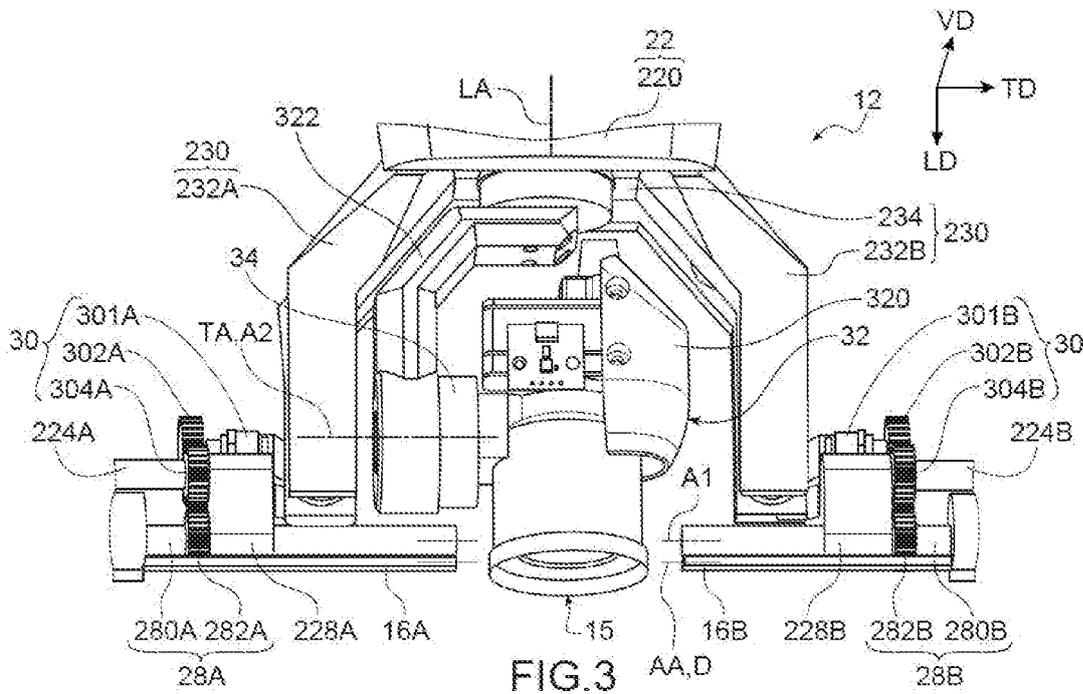
[Fig. 2]



[Fig. 2A]



[Fig. 3]



[Fig. 4]

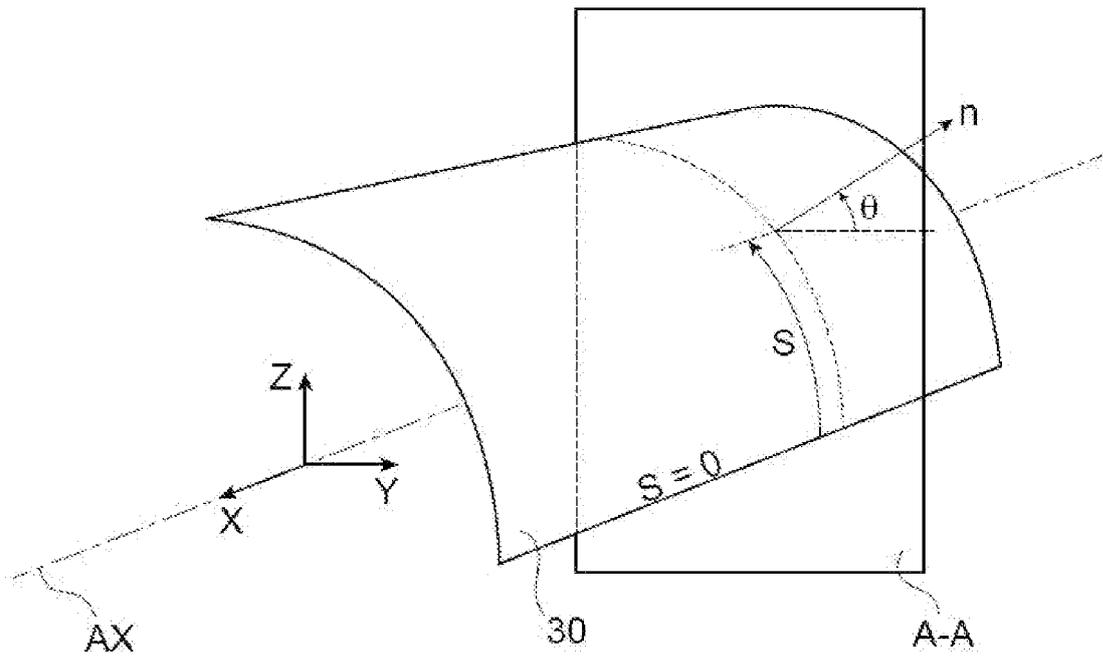


FIG. 4

[Fig. 5]

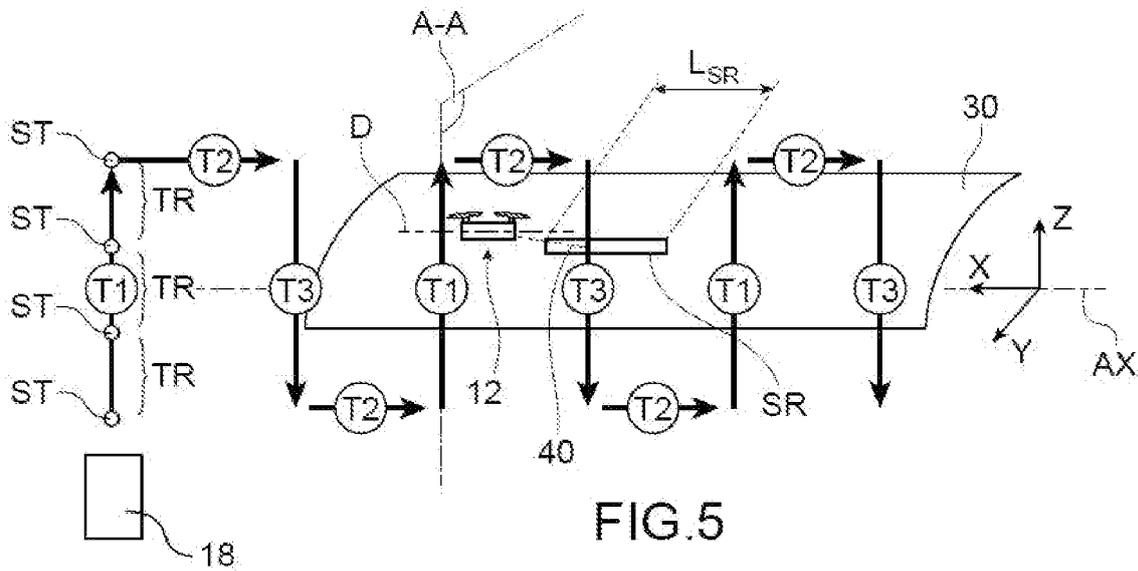


FIG. 5



[Fig. 8]

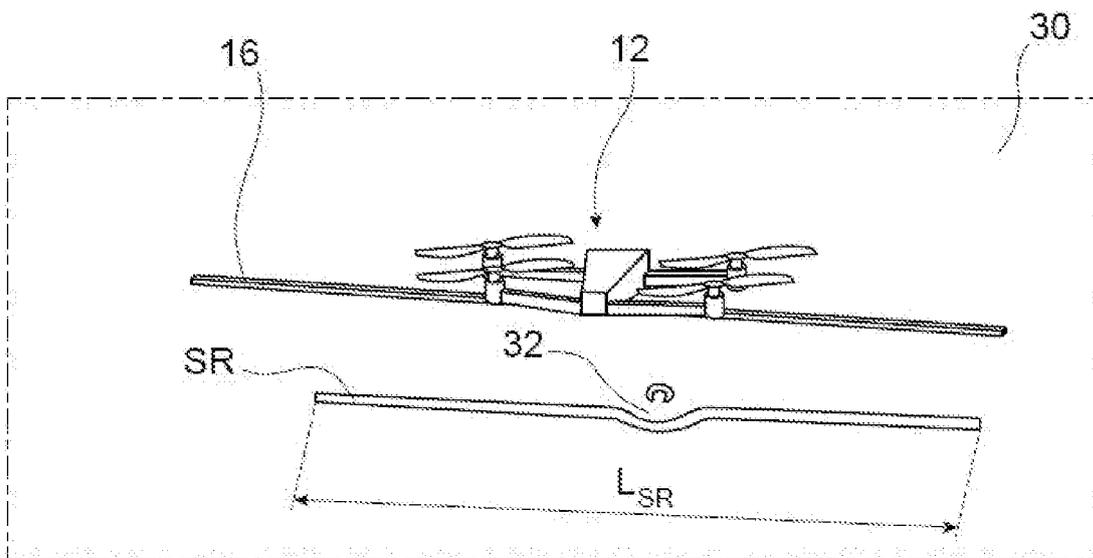


FIG.8

[Fig. 9]

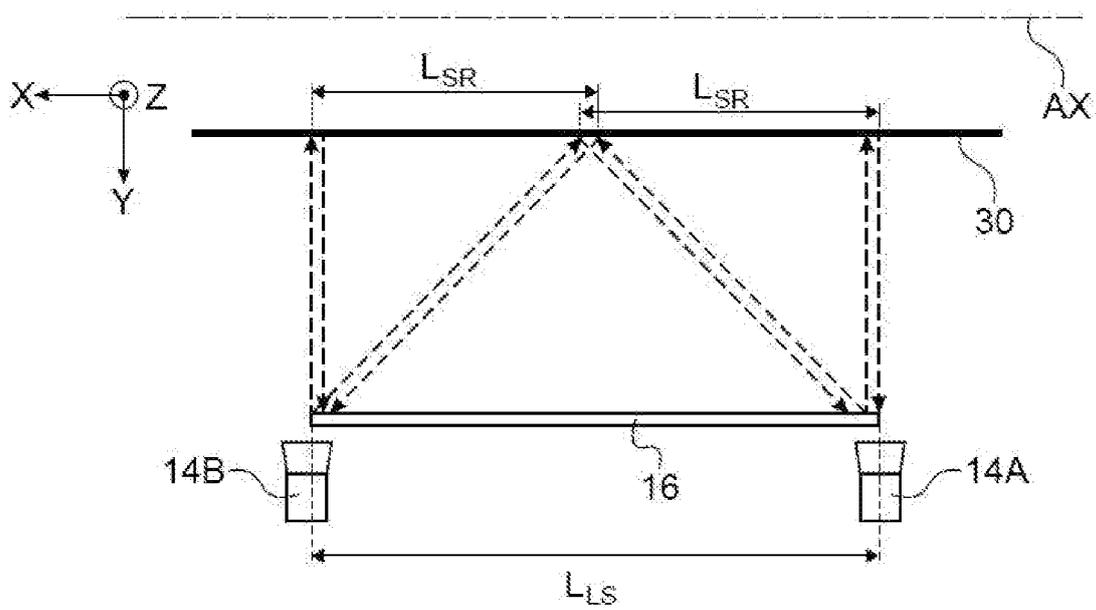


FIG.9

[Fig. 10]

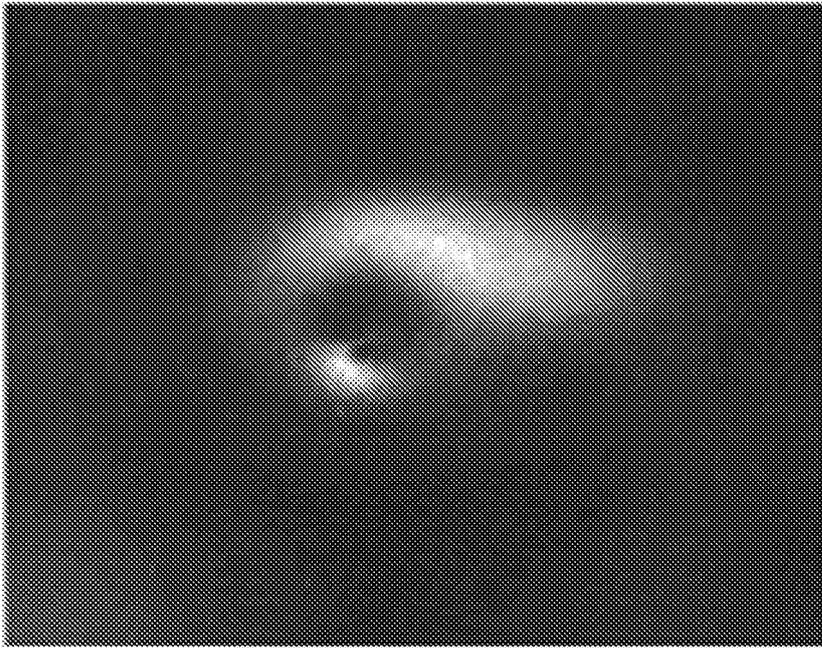


FIG. 10

[Fig. 11]

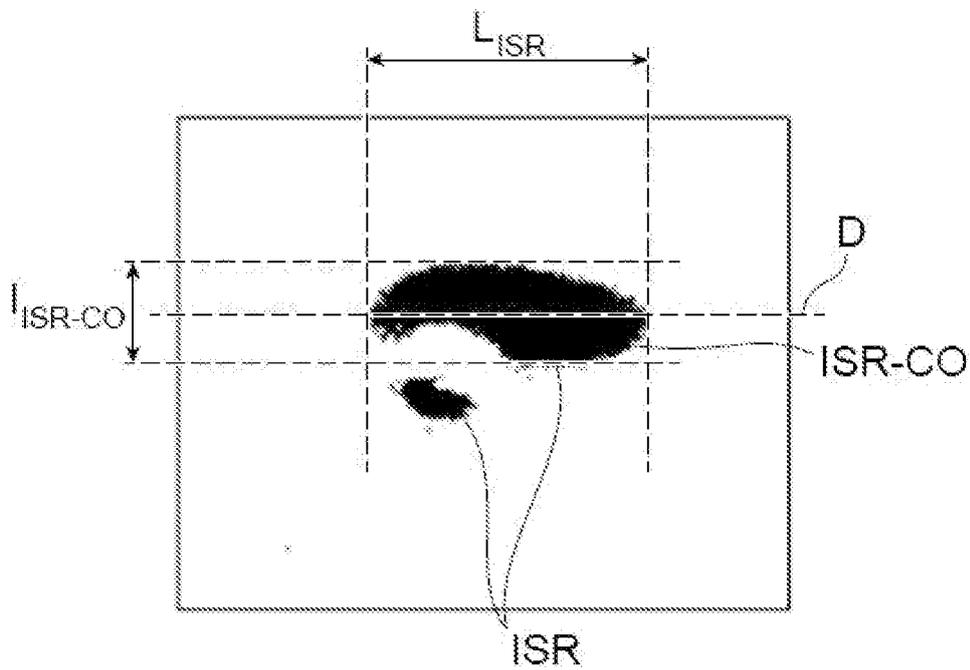


FIG. 11

[Fig. 12]

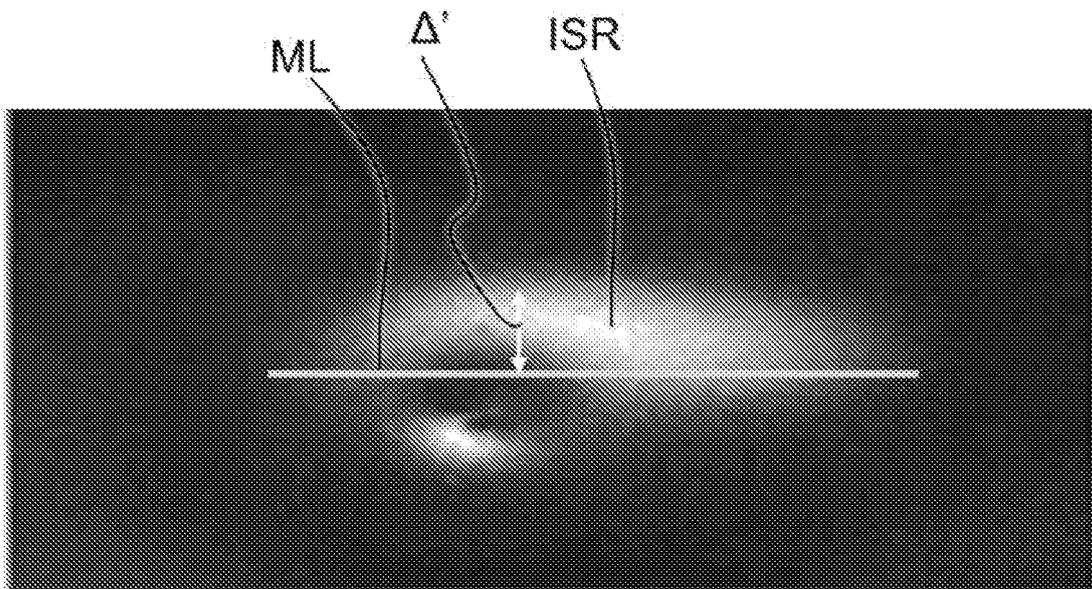


FIG. 12

[Fig. 13]

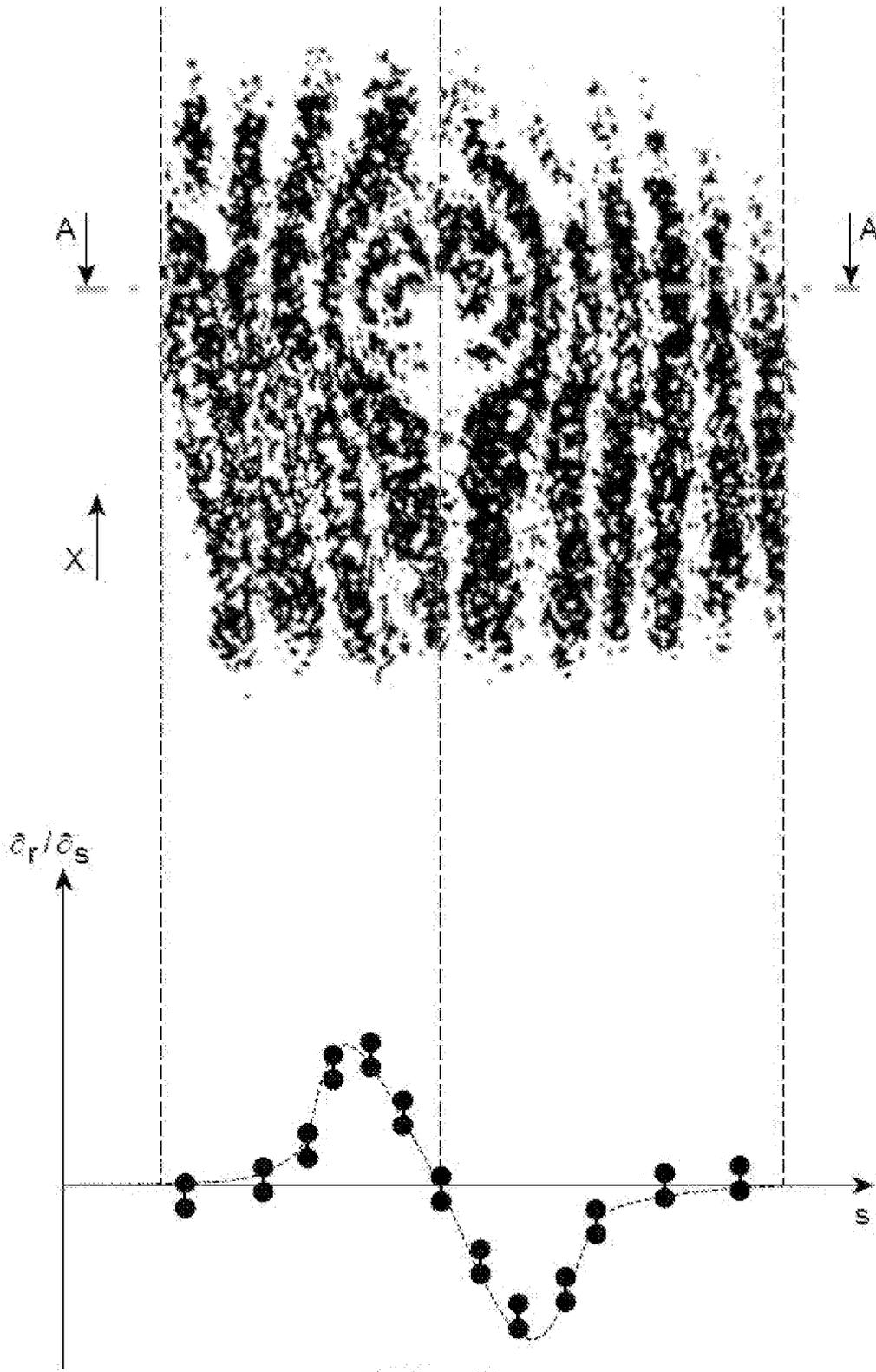


FIG. 13

[Fig. 14]

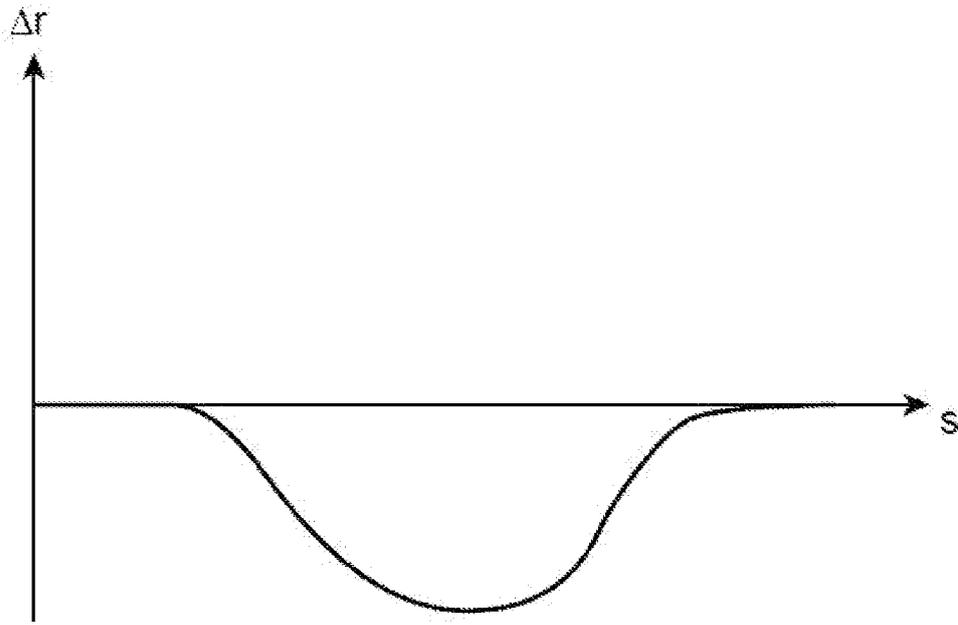


FIG.14

[Fig. 15]

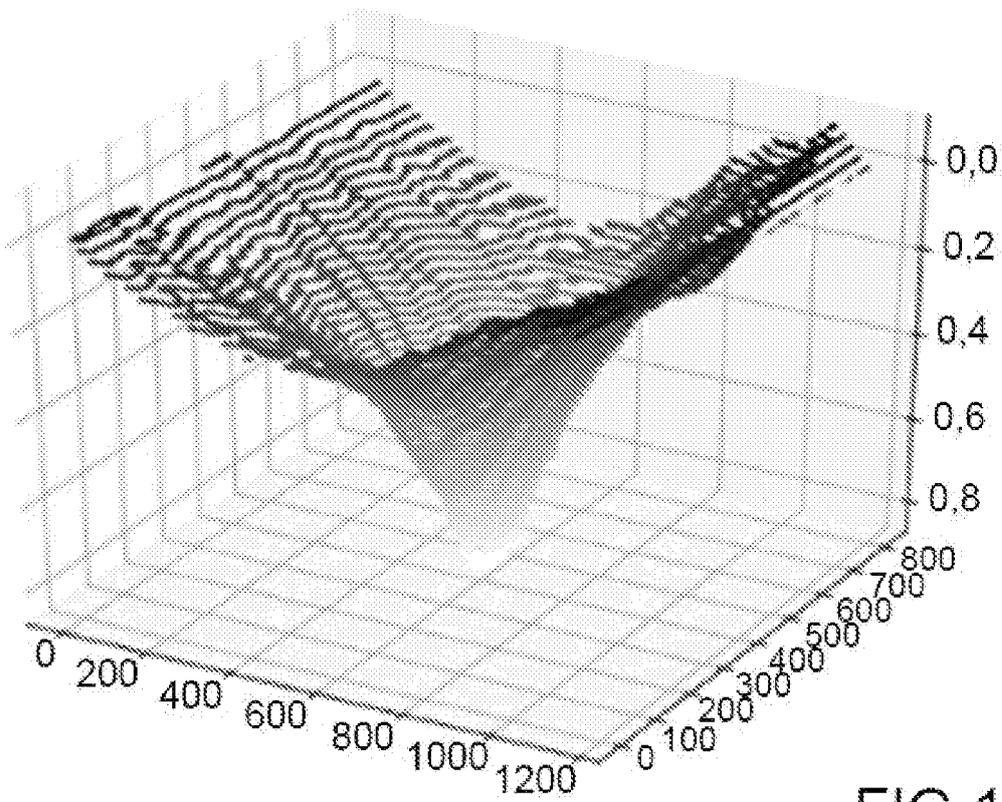


FIG.15

[Fig. 16]

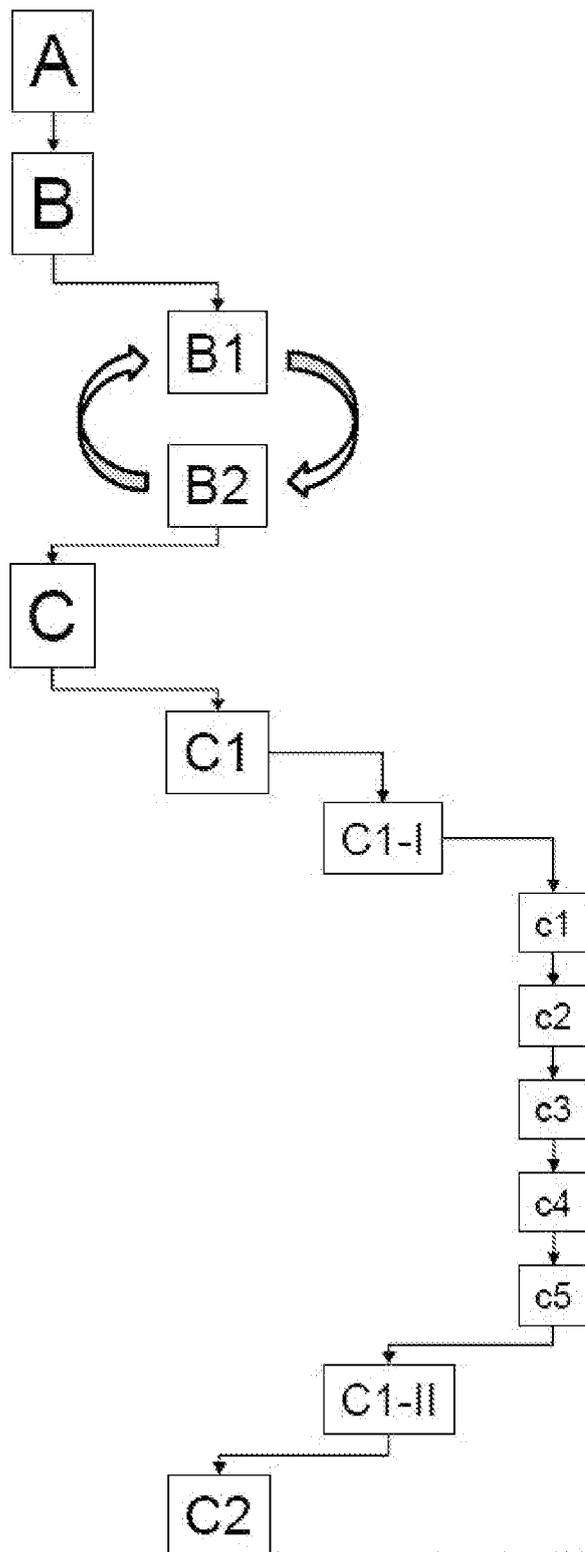


FIG. 16

# 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**

NEANT

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

US 2019/128772 A1 (HEINRICH CHRISTOPH [DE]  
ET AL) 2 mai 2019 (2019-05-02)

WO 2019/183955 A1 (SZ DJI TECHNOLOGY CO  
LTD [CN]) 3 octobre 2019 (2019-10-03)

US 2019/002093 A1 (MURAMATSU FUMIO [JP] ET  
AL) 3 janvier 2019 (2019-01-03)

DE 10 2017 102338 A1 (RWTH AACHEN [DE])  
9 août 2018 (2018-08-09)

US 2019/287237 A1 (DE BONFIM GRIPP JORGE  
AUGUSTO [BR] ET AL)  
19 septembre 2019 (2019-09-19)

Irving Prof Phil Don ET AL: "CRANFIELD  
UNIVERSITY LAWRENCE COOK VISUAL INSPECTION  
RELIABILITY FOR COMPOSITE AIRCRAFT  
STRUCTURES SCHOOL OF APPLIED SCIENCES PhD  
THESIS Supervisors",

,  
1 octobre 2009 (2009-10-01), XP055827985,  
Extrait de l'Internet:  
URL: [https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/6834/Lawrence\\_Cook\\_Thesis\\_2009.pdf;jsessionid=E2E74636BFB89A56101C5DA4361BF16E?sequence=1](https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/6834/Lawrence_Cook_Thesis_2009.pdf;jsessionid=E2E74636BFB89A56101C5DA4361BF16E?sequence=1)  
[extrait le 2021-07-27]

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

NEANT