



(51) Classification internationale des brevets :
G06T 7/70 (2017.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2017/053459

(22) Date de dépôt international :
08 décembre 2017 (08.12.2017)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1662121 08 décembre 2016 (08.12.2016) FR

(71) Déposant : **SAFRAN** [FR/FR] ; 2, Boulevard du Général
Martial Valin, 75015 PARIS (FR).

(72) Inventeurs : **MANDEL, Robin** ; c/o SAFRAN AIR-
CRAFT ENGINES PI (AJI), Rond-point René Ravaud-Ré-
au, 77550 MOISSY-CRAMAYEL CEDEX (FR). **TRAN-
QUART, Bastien** ; c/o SAFRAN AIRCRAFT ENGINES
PI (AJI), Rond-point René Ravaud-Réau, 77550 MOISSY-
CRAMAYEL CEDEX (FR).

(74) Mandataire : **FONTENELLE, Sandrine** et al. ; Cabi-
net BEAU DE LOMENIE, 158 Rue de l'Université, 75340
PARIS CEDEX 07 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR,
KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING ORIENTATIONS OF FIBRE ELEMENTS IN A PART MADE OF COMPOSITE MATERIAL

(54) Titre : PROCÉDÉ ET DISPOSITIF DE DÉTERMINATION DES ORIENTATIONS D'ÉLÉMENTS DE FIBRES DANS UNE PIÈCE EN MATÉRIAU COMPOSITE

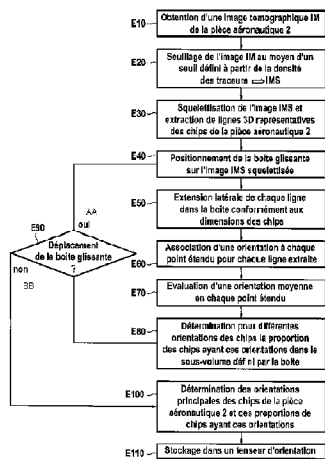


FIG.3

E10 Obtaining a tomographic image IM from the aeronautic part 2
E20 Thresholding the image IM by means of a threshold defined from the density of the tracers -> IMS
E30 Skeletalizing the image IMS and extracting 3D lines representative of chips of the aeronautic part 2
E40 Positioning of the box sliding over the skeletized image IMS
E50 Lateral extending of each line in the box conforming with the sizes of the chips
E60 Associating an orientation to each extended point for each line extracted
E70 Evaluating an average orientation in each extended point
E80 Determining the proportion of the chips having these orientations in the sub-volume defined by the box, for different orientations of chips
E90 Movement of the sliding box?
E100 Determining the main orientations of the chips of the aeronautic part 2 and the proportions of the chips having these orientations
E110 Storing in an orientation tensor
AA yes
BB no

(57) Abstract: The method according to the invention comprises: - obtaining (E10) an image from a part made of composite material, each pixel of the image representing a material density at one point of the part represented by this pixel; - extracting (E30) from the image, for at least one fibre element of the part, a line representative of this element over the length thereof; - for each line extracted: - extending (E50) this line in terms of width at several reference points in accordance with the width of the fibre element, this extension, for each reference point, resulting in several extended points; - connecting (E60) a parallel orientation to a direction of the line at each extended point connected to a reference point at this reference point; - evaluating (E70) an average orientation of the fibre elements for several extended points at these points; and - determining (E100) a proportion of the elements having these orientations from the average orientations evaluated, for several orientations.

(57) Abrégé : Le procédé selon l'invention comprend : — l'obtention (E10) d'une image d'une pièce en matériau composite, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté par ce pixel; — l'extraction (E30) de l'image, pour au moins un élément de fibre de la pièce, d'une ligne représentative de cet élément sur sa longueur; — pour chaque ligne extraite : - l'extension (E50) en largeur de cette ligne en plusieurs points de référence conformément à la largeur de l'élément de fibre, cette extension résultant pour chaque point de référence en plusieurs points étendus; - l'association (E60) à chaque point étendu lié à un point de référence d'une orientation parallèle à une direction de la ligne en ce point de

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).

Publiée:

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

Procédé et dispositif de détermination des orientations d'éléments de
fibres dans une pièce en matériau composite

Arrière-plan de l'invention

5 L'invention concerne le domaine général des matériaux composites.

Elle se rapporte plus particulièrement au contrôle de pièces réalisées en matériau composite, tel que par exemple en matériau composite à fibres longues discontinues (DLF ou DFC pour
10 « Discontinuous Fiber Composites » en anglais), fabriqué à partir de copeaux ou « chips » pré-imprégnés de fibres (ex. de verre, de carbone ou autre) unidirectionnels enchevêtrés aléatoirement. La résine du matériau composite, aussi appelée parfois matrice, peut être thermodurcissable ou thermoplastique.

15 De tels matériaux composites sont particulièrement bien adaptés pour la réalisation de pièces à géométrie complexe (comportant par exemple des nervures ou des bossages), telles qu'utilisées notamment dans l'industrie aéronautique ou dans de nombreuses autres industries mécaniques. Ces pièces sont fabriquées de façon connue à partir de
20 préformes découpées dans une nappe de matière formée à partir des copeaux de fibres enchevêtrés, puis assemblées dans un moule et soumises à un cycle de thermo-compression. Les copeaux peuvent être également injectés à chaud dans le moule.

Les performances de ces matériaux composites dépendent
25 directement de l'enchevêtrement des copeaux de fibres, et souffrent d'une variabilité intrinsèque due au caractère aléatoire de la microstructure (géométrie) du matériau composite à l'échelle des copeaux. Cet enchevêtrement est largement dépendant du procédé de fabrication de la pièce qui peut générer un fluage (i.e. déformation) de la matière lors de la
30 thermo-compression. Il peut par conséquent arriver qu'on observe sur les pièces des comportements mécaniques différents de ceux observés lors d'essais sur éprouvette car les copeaux de fibres se sont réorientés différemment.

En raison de la nature aléatoire de l'enchevêtrement des
35 copeaux de fibres, les matériaux composites et notamment les matériaux

DLF ont donc un comportement difficile à prévoir, ce qui contraint les utilisateurs de ces matériaux à passer par une démarche de certification de leurs pièces par essais. Les campagnes de certification sont particulièrement longues et coûteuses. En outre, il est difficile de procéder

5 par comparaison pour valider d'autres conceptions (ou « designs ») même très proches de la pièce testée. Quand bien même la certification est obtenue, il n'est pas rare que les fabricants de pièces réalisées en matériau DLF doivent démontrer la capacité de chaque pièce fabriquée avant sa livraison.

10 Il existe donc un besoin d'un procédé qui permette de caractériser la microstructure d'une pièce réalisée en matériau composite afin d'être en mesure notamment de prédire ses performances et qui ne présente pas les inconvénients précités.

15 Objet et résumé de l'invention

La présente invention répond notamment à ce besoin en proposant un procédé de détermination des orientations d'éléments de fibres assemblés dans une pièce réalisée en matériau composite, ces éléments de fibres ayant une forme initiale caractérisée par une longueur,

20 une largeur et une épaisseur, le procédé comprenant :

- une étape d'obtention d'une image de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel;
- une étape d'extraction de l'image, pour au moins un élément de fibre de la pièce, d'une ligne représentative de cet élément de fibre sur tout
- 25 ou partie de sa longueur dans la pièce ;
- pour chaque ligne extraite de l'image :
 - une étape d'extension en largeur de cette ligne en une pluralité de points dits de référence de ladite ligne, conformément à la
 - 30 largeur de l'élément de fibre dont la ligne est représentative, ladite extension résultant pour chaque point de référence en une pluralité de points dits étendus associés à ce point de référence ;
 - une étape d'association, à chaque point étendu associé à un
 - 35 point de référence, d'une orientation parallèle à une direction de la ligne en ce point de référence ;

- une étape d'évaluation pour une pluralité de points étendus, d'une orientation moyenne des éléments de fibres en ces points à partir des orientations associées à ces points étendus ; et
- une étape de détermination, pour une pluralité d'orientations des
5 éléments de fibres, d'une proportion d'éléments de fibres ayant ces orientations à partir des orientations moyennes ainsi évaluées.

Corrélativement, l'invention vise aussi un dispositif de détermination des orientations d'éléments de fibres assemblés dans une pièce réalisée en matériau composite, ces éléments de fibres ayant une
10 forme initiale caractérisée par une longueur, une largeur et une épaisseur, ce dispositif comprenant :

- un module d'obtention, apte à obtenir une image de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel ;
- 15 — un module d'extraction, configuré pour extraire de l'image, pour au moins un élément de fibre de la pièce, une ligne représentative de cet élément de fibre sur tout ou partie de sa longueur dans la pièce ;
- un module d'extension, configuré pour étendre en largeur chaque ligne extraite de l'image en une pluralité de points dits de référence de ladite
20 ligne, conformément à la largeur de l'élément de fibre dont la ligne est représentative, ladite extension résultant pour chaque point de référence en une pluralité de points dits étendus associés à ce point de référence ;
- un module d'association, configuré pour associer à chaque point
25 étendu associé à un point de référence d'une ligne extraite de l'image, une orientation parallèle à une direction de la ligne en ce point de référence ;
- un module d'évaluation, configuré pour évaluer pour une pluralité de points étendus, une orientation moyenne des éléments de fibres en ces
30 points à partir des orientations associées à ces points étendus ; et
- un module de détermination, configuré pour déterminer pour une pluralité d'orientations des éléments de fibres, une proportion d'éléments de fibres ayant ces orientations à partir des orientations moyennes ainsi évaluées.

35 La présente invention propose donc de caractériser la microstructure d'une pièce réalisée en matériau composite en déterminant

l'orientation des éléments de fibres (ex. copeaux ou chips, ou plus généralement des éléments de fibres ayant par exemple une forme initiale parallélépipédique caractérisée par une longueur, une largeur et une épaisseur) qui sont enchevêtrés aléatoirement dans le matériau, et la proportion des éléments enchevêtrés selon une même orientation. L'orientation des éléments de fibres du matériau composite est en effet un paramètre microstructural qui, de façon connue, a un impact important sur les propriétés mécaniques du matériau composite.

Conformément à l'invention, cette orientation est déterminée pour une pièce mécanique réelle, telle que par exemple une pièce aéronautique, à partir d'une image représentant cette pièce. Une telle image est par exemple une image tomographique en trois dimensions ou une image radiographique en deux dimensions sur laquelle chaque pixel (aussi appelé « voxel » pour le cas des images en trois dimensions) représente la densité de matériau en un point de la pièce correspondant à ce pixel. Ce type d'image présente l'avantage de fournir des informations assez fines et directement exploitables sur l'intérieur de la pièce. Elle permet ainsi d'extraire des informations sur l'orientation des copeaux au sein de la pièce moyennant un traitement simple proposé par l'invention.

Ce traitement simple comprend dans un premier temps une « squelettisation » de l'image afin de la rendre plus facilement exploitable, cette squelettisation consistant à ne garder pour chaque copeau, qu'une ligne directrice représentative longitudinalement du copeau. Cette ligne est une courbe en deux ou trois dimensions selon l'image considérée et constitue avantageusement la représentation mathématique la plus simple du copeau. L'analyse des orientations des copeaux est alors réalisée à partir des lignes obtenues au moyen par exemple d'une boîte glissante définissant un sous-volume (ex. parallélépipédique ou autre) ou une sous-surface, et déplacée sur tout ou partie du volume ou de la surface de la pièce représentée sur l'image. Plus particulièrement, dans chaque sous-volume/sous-surface, la longueur de la ligne dans une direction donnée est intégrée, en tenant compte des dimensions des copeaux de fibre dans la ou les autres directions, au cours d'une étape dite d'extension de la ligne.

A titre illustratif, dans le cas d'une image en deux dimensions (ex. image radiographique), l'extension est limitée à une extension en

largeur de la ligne en la pluralité de points de référence conformément à la largeur de l'élément de fibre dont la ligne est représentative. Dans le cas d'une image en trois dimensions (ex. image tomographique), l'extension comprend une extension en largeur de la ligne en la pluralité
5 de points de référence conformément à la largeur de l'élément de fibre dont la ligne est représentative, et une extension en épaisseur de la ligne en la pluralité de points de référence conformément à l'épaisseur de l'élément de fibre dont la ligne est représentative.

L'étape d'extension mise en œuvre dans l'invention permet de
10 recréer artificiellement la géométrie des copeaux de fibre dans le (sous-)volume ou (sous)-surface défini(e) par la boîte et de leur associer en plusieurs points dits étendus une orientation. Il suffit dès lors d'estimer la proportion de copeaux de fibres dans chaque direction de l'espace pour connaître la répartition spatiale des copeaux de fibres localement dans le
15 sous-volume, cette connaissance pouvant ensuite être étendue à l'ensemble de la pièce en considérant d'autres sous-volumes ou sous-surfaces de la pièce.

La connaissance des orientations des copeaux dans la pièce peut permettre avantageusement d'alimenter un modèle numérique
20 modélisant la microstructure de cette pièce, tel que par exemple un modèle numérique similaire à celui décrit dans le document WO 2015/185840. Un tel modèle numérique alimenté avec des données réelles extraites de la pièce elle-même (plutôt qu'avec une statistique moyenne) représente de façon réaliste la pièce et permet avantageusement de
25 prédire de manière fiable les propriétés mécaniques (ex. rigidité, propriétés de rupture, etc.) de la pièce en tout point de celle-ci. Grâce à ce modèle, la pièce réelle peut être validée au moyen d'un contrôle non destructif au lieu de nécessiter un essai mécanique sur la pièce comme cela est le cas aujourd'hui. De façon connue, on désigne par contrôle non
30 destructif un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité et/ou la qualité de structures (pièces) ou de matériaux sans les dégrader.

Le contrôle non destructif a une application privilégiée mais non limitative dans le domaine de l'aéronautique, et plus généralement dans
35 n'importe quel domaine dans lequel les structures dont on souhaite caractériser l'état ou la qualité sont coûteuses et/ou leur fiabilité de

fonctionnement est critique. Le contrôle non destructif peut être avantageusement réalisé sur la pièce considérée aussi bien en cours de fabrication qu'en cours d'utilisation ou de maintenance. L'invention s'applique donc de façon privilégiée mais non limitative aux pièces aéronautiques, et plus particulièrement aux pièces aéronautiques en matériaux composites de type DLF (ou DFC). Elle peut également s'appliquer à d'autres types de matériaux composites comme par exemple à des matériaux BMC (pour Bulk Molding Compound en anglais) ou SMS (pour Sheed Molding Compound en anglais). On note que ces deux types de matériaux sont couramment usités pour la réalisation de pièces de grandes tailles et d'épaisseur fine au regard des autres dimensions de ces pièces. Pour de telles pièces, l'usage de la tomographie n'est pas adapté ; on privilégiera alors plutôt, pour mettre en œuvre l'invention, une image de type radiographique de ces pièces, en deux dimensions, permettant d'obtenir une cartographie d'orientation surfacique sur la pièce.

L'invention offre en outre la possibilité, via la détermination des orientations des copeaux de fibres dans la pièce, de contrôler facilement la variabilité dans la répartition des copeaux pouvant exister d'une pièce à l'autre, et/ou par rapport à des orientations dites nominales (i.e. de référence). Cette variabilité est due notamment au procédé de fabrication de la pièce : en effet, d'une pièce à l'autre, les copeaux se positionnent individuellement de façon non déterministe de sorte que de petites variations de répartition des copeaux (au niveau de l'orientation ou de l'enchevêtrement même) peuvent être observées. La connaissance des orientations des copeaux de fibres dans une pièce donnée permet de les comparer à des orientations nominales fixées lors de la conception de la pièce.

Ainsi l'invention permet de vérifier et de s'assurer facilement de la répétabilité du procédé de fabrication des pièces, en s'assurant, grâce aux orientations des copeaux de fibre déterminées au moyen de l'invention, que chacune des pièces a une répartition similaire de ces copeaux de fibre (au regard bien entendu d'un seuil de tolérance donné). On s'assure ainsi que chacune des pièces issues du procédé de fabrication considéré conserve des performances proches de performances nominales prédéterminées.

Dans un mode particulier de réalisation :

- tout ou partie des éléments de fibres assemblés dans la pièce portent des marqueurs (ou des traceurs) suivant la longueur des éléments de fibre ;
- l'étape d'extraction comprend un seuillage de l'image réalisé au moyen d'un seuil défini à partir d'une densité de matériau des marqueurs, ce
- 5 seuillage résultant en une image représentant les marqueurs ; et
- les lignes sont extraites à partir des marqueurs représentés sur l'image résultant du seuillage.

10 Ce mode de réalisation facilite l'extraction des lignes représentatives des copeaux de fibres, celle-ci s'appuyant directement sur les marqueurs présents sur certains copeaux de fibres. On note que tous les copeaux de fibres n'ont pas besoin de porter de tels marqueurs. Bien entendu, la fiabilité des orientations déterminées dépend dans ce mode de réalisation de la quantité de marqueurs présents dans la pièce et de leur

15 répartition dans la pièce. Plus les marqueurs sont répartis uniformément et/ou nombreux dans la pièce, meilleure est la fiabilité des orientations estimées par l'invention.

20 Dans un autre mode de réalisation, pertinent notamment lorsque les éléments/copeaux de fibres ne portent pas de tels marqueurs, l'étape d'extraction comprend la détermination de frontières de chaque élément de fibre de la pièce, les lignes représentatives des éléments de fibres étant extraites à partir des frontières ainsi déterminées.

Ainsi l'invention s'applique aisément de l'absence de marqueurs sur les éléments de fibre.

25 Dans un mode particulier de réalisation, au moins les étapes d'extension et d'association sont mises en œuvre en utilisant une boîte glissante définissant un sous-volume ou une sous-surface de dimensions prédéfinies, déplacée sur tout ou partie de la pièce.

30 Le recours à une boîte glissante permet, comme mentionné précédemment, de parcourir l'ensemble de la pièce, et d'estimer les orientations des éléments de fibres sur l'ensemble de la pièce. Les dimensions de la boîte considérée et du sous-volume ou de la sous-surface défini(e) par cette boîte, sa forme (ex. parallélépipédique ou rectangulaire), ainsi que les recouvrements entre deux déplacements de la

35 boîte glissante sur la pièce, dépendent de plusieurs facteurs. Ainsi, notamment, la définition d'un sous-volume ou d'une sous-surface trop

petit(e) risque de ne pas permettre d'observer un échantillon suffisamment représentatif du matériau, alors qu'un sous-volume ou une sous-surface trop important(e) ne permettra peut-être pas d'identifier des zones d'anisotropie.

5 Dans un mode particulier de réalisation, les orientations des éléments de fibres et les proportions d'éléments de fibres ayant ces orientations moyennes sont stockées dans un tenseur d'orientation.

Un tel tenseur d'orientation s'appuie, de façon connue, sur une matrice à trois lignes et trois colonnes, dont les vecteurs propres
10 représentent les directions principales d'orientation des éléments de fibres dans la pièce tandis que les valeurs propres définissent la proportion d'éléments de fibres de la pièce suivant ces directions. Ce tenseur d'orientation permet une représentation graphique des orientations des éléments de fibre de la pièce au moyen d'ellipsoïdes en trois dimensions
15 ou d'ellipses en deux dimensions dont les directions des axes sont définies par les vecteurs propres du tenseur, tandis que les valeurs propres définissent leurs longueurs.

En variante, on peut envisager une représentation sous forme cartographique, dans un panneau plan.

20 Dans un mode particulier de réalisation, les différentes étapes du procédé de détermination sont déterminées par des instructions de programmes d'ordinateurs.

En conséquence, l'invention vise aussi un programme d'ordinateur sur un support d'informations, ce programme étant
25 susceptible d'être mis en œuvre dans un dispositif de détermination ou plus généralement dans un ordinateur, ce programme comportant des instructions adaptées à la mise en œuvre des étapes d'un procédé de détermination tel que décrit ci-dessus.

Ce programme peut utiliser n'importe quel langage de
30 programmation, et être sous la forme de code source, code objet, ou de code intermédiaire entre code source et code objet, tel que dans une forme partiellement compilée, ou dans n'importe quelle autre forme souhaitable.

L'invention vise aussi un support d'informations lisible par un
35 ordinateur, et comportant des instructions d'un programme d'ordinateur tel que mentionné ci-dessus.

Le support d'informations peut être n'importe quelle entité ou dispositif capable de stocker le programme. Par exemple, le support peut comporter un moyen de stockage, tel qu'une ROM, par exemple un CD ROM ou une ROM de circuit microélectronique, ou encore un moyen
5 d'enregistrement magnétique, par exemple un disque dur.

D'autre part, le support d'informations peut être un support transmissible tel qu'un signal électrique ou optique, qui peut être acheminé via un câble électrique ou optique, par radio ou par d'autres moyens. Le programme selon l'invention peut être en particulier
10 téléchargé sur un réseau de type Internet.

Alternativement, le support d'informations peut être un circuit intégré dans lequel le programme est incorporé, le circuit étant adapté pour exécuter ou pour être utilisé dans l'exécution du procédé en question.

15 L'invention vise également, selon un autre aspect, un procédé de contrôle non destructif appliqué à une pièce en matériau composite, ce matériau composite comprenant un assemblage d'éléments de fibres, ce procédé de contrôle comprenant :

- une étape d'acquisition au moyen d'un système d'imagerie numérique, d'une image de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel ;
- une étape de détermination des orientations des éléments de fibres de la pièce mettant en œuvre un procédé de détermination selon
25 l'invention ; et
- une étape de contrôle non destructif réalisée sur la pièce utilisant les orientations ainsi déterminées.

Corrélativement, l'invention vise aussi un système de contrôle non destructif destiné à être utilisé pour contrôler une pièce en matériau composite, ce matériau composite comprenant un assemblage d'éléments de fibres, ce système de contrôle comprenant :

- un système d'imagerie numérique, configuré pour acquérir une image de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel ;
- 35 — un dispositif de détermination des orientations des éléments de fibres de la pièce selon l'invention ; et

— un dispositif de contrôle de la pièce configuré pour utiliser les orientations ainsi déterminées.

Dans un mode privilégié de réalisation, la pièce est une pièce aéronautique.

5 Le procédé et le système de contrôle bénéficient des mêmes avantages, cités précédemment, que le procédé et le dispositif de détermination selon l'invention.

On peut également envisager, dans d'autres modes de réalisation, que le procédé et le dispositif de détermination, et le procédé
10 et le système de contrôle non destructif selon l'invention présentent en combinaison tout ou partie des caractéristiques précitées.

Brève description des dessins

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention
15 ressortiront de la description faite ci-dessous, en référence aux dessins annexés qui en illustrent un exemple de réalisation dépourvu de tout caractère limitatif. Sur les figures :

- la figure 1 représente un système de contrôle non destructif conforme à l'invention, dans un mode particulier de réalisation ;
- 20 — la figure 2 représente l'architecture matérielle d'un dispositif de détermination selon l'invention appartenant au système de contrôle non destructif de la figure 1 ;
- la figure 3 illustre les principales étapes d'un procédé de détermination selon l'invention dans un mode particulier de réalisation dans lequel il
25 est mis en œuvre par le dispositif de détermination de la figure 2 ;
- les figures 4A-4E illustrent différents traitements et images utilisés par le dispositif de détermination de la figure 2, dans un mode particulier de réalisation ;
- les figures 5A-5D illustrent différents traitements mis en œuvre par le
30 dispositif de détermination de la figure 2, dans un mode particulier de réalisation ; et
- la figure 6 représente les principales étapes d'un procédé de contrôle non destructif selon l'invention dans un mode particulier de réalisation dans lequel il est mis en œuvre par le système de la figure 1.

35

Description détaillée de l'invention

La **figure 1** représente, dans son environnement, un système 1 de contrôle non destructif (ou système CND 1), destiné à être utilisé pour contrôler une pièce en matériau composite.

Dans l'exemple envisagé à la figure 1, cette pièce est une pièce aéronautique 2, telle que par exemple une aube d'une turbomachine, réalisée en matériau composite. Toutefois, aucune limitation n'est attachée à la nature de la pièce considérée sur laquelle on envisage d'appliquer un contrôle non destructif au moyen du système CND 1. Il peut s'agir de tout autre type de pièces aéronautiques ou plus généralement de tout autre type de pièces mécaniques dont on souhaite contrôler par exemple la conformité.

Dans l'exemple envisagé ici, la pièce aéronautique 2 est réalisée dans un matériau composite de type DFC, autrement dit, à fibres longues discontinues (ou DLF), fabriqué à partir de « chips » ou copeaux de fibres enchevêtrés aléatoirement et pré-imprégnés d'une résine thermodurcissable (matrice). Les chips sont par exemple des copeaux de fibre de carbone imprégnés d'une résine de carbone, et qui ont une forme initiale (i.e. avant déformation par le procédé de fabrication de la pièce, par exemple dans le moule) sensiblement parallélépipédique définie par une longueur L, une largeur l et une épaisseur e. Par exemple, la longueur L des chips varie entre 10 et 50 mm, la largeur l est d'environ 10 mm et l'épaisseur des chips est d'environ 0.15 mm. Ces chips constituent des éléments de fibres au sens de l'invention. Dans la suite de la description, on utilise indifféremment les termes chips, copeaux de fibres ou éléments de fibres pour désigner les chips enchevêtrés aléatoirement dans le matériau composite constituant la pièce aéronautique 2.

Bien entendu, les valeurs précédentes ne sont données qu'à titre illustratif. En outre, l'invention s'applique à d'autres matériaux composites constitués d'éléments de fibre pré-imprégnés d'une résine, comme par exemple à des matériaux constitués de copeaux de fibres de verre imprégnés d'une résine polymère, ou tout autre composite composé de chips ou de torons pré-imprégnés disposés de manière aléatoire ou quasi aléatoire dans une cavité. L'invention s'applique également à des éléments de fibres ayant une autre forme initiale qu'une forme

parallélépipédique et pouvant être caractérisée par une longueur L, une largeur l et une épaisseur e.

Conformément à l'invention, le système CND 1 s'appuie, pour
5 réaliser un contrôle non destructif sur la pièce aéronautique 2, sur une détermination des orientations des chips enchevêtrés dans la pièce.

Dans le mode de réalisation envisagé à la figure 1, chaque chip enchevêtré dans la pièce aéronautique 2 porte un marqueur ou un traceur s'étendant sur toute la longueur du chip. Un tel marqueur est par exemple
10 un fil ou un toron en fibre de verre, apparaissant de « couleur » différente de la couleur des copeaux de fibres de carbone utilisés pour constituer le matériau composite (ou ayant un niveau d'absorption différent), et inséré sur le chip de façon connue en soi. La demande de brevet WO 2016028349 décrit un exemple d'insertion et d'utilisation de tels
15 marqueurs dans une pièce en matériau composite.

En variante, seulement une partie des chips enchevêtrés dans la pièce aéronautique 2 porte de tels marqueurs. Préférentiellement, on s'assure d'avoir une proportion d'au moins 70% de copeaux de fibre munis de marqueurs dans la pièce aéronautique 2, répartis de manière équilibrée
20 sur la pièce (i.e. de sorte à éviter une concentration des marqueurs en un endroit de la pièce). L'invention peut toutefois être mise en œuvre avec une concentration moins élevée de marqueurs ; on pourra dès lors assortir les orientations déterminées conformément à l'invention d'un indice de confiance reflétant la proportion de marqueurs présents dans la pièce ainsi
25 que leur répartition.

Conformément à l'invention, pour opérer un contrôle non destructif sur la pièce aéronautique 2, le système CND 1 comprend :
— un système d'imagerie numérique 3, configuré pour acquérir une image de la pièce. Dans l'exemple envisagé à la figure 1, le système
30 d'imagerie numérique 3 est un système tomographique apte à fournir une image IM tomographique en trois dimensions de la pièce aéronautique 2, chaque pixel en trois dimensions de l'image IM (aussi couramment désigné par « voxel » pour « volumetric pixel ») représentant une densité de matériau en un point de la pièce
35 aéronautique 2 par ce pixel ;

- un dispositif 4 de détermination des orientations des chips de la pièce 2, conforme à l'invention, et apte à utiliser à cet effet l'image IM acquise par le système d'imagerie numérique 3 ; et
- un dispositif 5 de contrôle de la pièce aéronautique 2 configuré pour utiliser les orientations déterminées par le dispositif 4 pour effectuer un contrôle non destructif sur la pièce aéronautique 2. Ce contrôle non destructif peut consister par exemple en la vérification de la conformité de la pièce aéronautique 2 par rapport à un standard prédéterminé, en vue notamment d'une certification de la pièce aéronautique 2, ou en la prédiction de performances mécaniques de la pièce aéronautique 2, etc. Des exemples de contrôles non destructifs pouvant être mis en œuvre par le dispositif 5 de contrôle à partir des orientations déterminées par le dispositif 4 selon l'invention sont détaillés ultérieurement.

Dans le mode de réalisation décrit ici, le dispositif 4 de détermination des orientations des chips de la pièce 2 est un ordinateur dont l'architecture matérielle est illustrée schématiquement à la **figure 2**.

Il comprend notamment un processeur 6, des mémoires 7-9 (par exemple, une mémoire morte et/ou un disque dur 7, une mémoire vive 8 et une mémoire non volatile 9), et des moyens de communication 10. Ces moyens de communication 10 comprennent notamment une ou plusieurs interfaces de communication (ex. port USB (Universal Serial Bus), carte réseau, etc.) lui permettant de communiquer d'une part, avec le système 3 d'imagerie numérique ou avec un opérateur pour obtenir l'image tomographique IM de la pièce aéronautique 2 acquise par le système 3 d'imagerie numérique, et d'autre part, avec le dispositif 5 de contrôle, pour lui transmettre les orientations des chips qu'il a déterminées à partir de l'image IM conformément à l'invention.

La mémoire morte et/ou le disque dur 7 constitue un support d'enregistrement lisible par le processeur 6 du dispositif 4 de détermination et sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur conforme à l'invention, comportant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de détermination des orientations selon l'invention, les étapes de ce procédé étant décrites ultérieurement en référence à la figure 3, dans un mode particulier de réalisation.

Ce programme d'ordinateur définit de façon équivalente des modules fonctionnels du dispositif de détermination 4 (ces modules fonctionnels étant des modules logiciels ici), aptes à commander et/ou à utiliser les moyens matériels 7-10 du dispositif 4 de détermination mentionnés précédemment. Ces modules fonctionnels comprennent notamment dans le mode de réalisation décrit ici :

- un module 4A d'obtention, apte à obtenir l'image IM de la pièce aéronautique 2 acquise par le système d'imagerie numérique 3 ;
- un module 4B d'extraction, configuré pour extraire de l'image IM, pour au moins un chip de la pièce, une ligne représentative de ce chip sur tout ou partie de sa longueur dans la pièce ;
- un module 4C d'extension, configuré pour étendre, en largeur et en épaisseur ici, chaque ligne extraite de l'image en plusieurs points dits de référence de la ligne, de sorte à reconstituer en quelque sorte numériquement le chip dont la ligne est représentative ;
- un module 4D d'association, configuré pour associer à chaque point dit étendu résultant de l'extension des lignes extraites de l'image une orientation du chip en ce point ;
- un module 4E d'évaluation, configuré pour évaluer pour une pluralité de points étendus, une orientation moyenne des chips en ces points étendus ; et
- un module 4F de détermination, configuré pour déterminer pour une pluralité d'orientations moyennes ainsi évaluées, une proportion de points étendus ayant cette orientation moyenne.

Les fonctions de ces modules sont décrites plus en détail maintenant en référence aux étapes du procédé de détermination selon l'invention.

La **figure 3** représente sous forme d'ordinogramme les principales étapes du procédé de détermination selon l'invention, dans un mode particulier de réalisation dans lequel il est mis en œuvre par le dispositif 4 de détermination de la figure 1 à partir d'une image tomographique IM en trois dimensions de la pièce aéronautique 2 acquise par le système d'imagerie numérique 3.

L'acquisition d'une image tomographique d'une pièce aéronautique au moyen d'un système d'imagerie numérique est connue en soi et n'est pas décrite en détail ici.

L'image tomographique IM de la pièce aéronautique 2 acquise par le système 3 d'imagerie numérique est obtenue par le dispositif 4 de détermination, et plus particulièrement par son module d'obtention 4A (étape E10). Elle est fournie par exemple par le système 3 d'imagerie numérique au dispositif 4 de détermination via un réseau de télécommunications ou par un opérateur, via par exemple les moyens de communication 10 du dispositif 4 de détermination.

L'image tomographique IM en trois dimensions de la pièce aéronautique 2 fournit une mesure de la densité de matériau en chaque point de la pièce aéronautique 2. Plus particulièrement, l'image IM 2 étant une image numérique codée en niveaux de gris comprenant une pluralité de voxels (points/pixels en 3 dimensions), chaque voxel de l'image IM représente via un niveau de gris qui lui est associé la densité de matériau en le point de la pièce représenté par ce voxel. Les **figures 4A et 4B** représentent respectivement, à titre illustratif, une aube de turbomachine (pièce aéronautique 2 au sens de l'invention), et une image IM tomographique de cette pièce.

L'image tomographique IM est alors traitée par le dispositif 4 d'estimation pour établir une cartographie de paramètres microstructuraux de la pièce aéronautique 2, et plus précisément ici, des orientations préférentielles des chips de la pièce 2.

Dans le mode de réalisation décrit ici, comme mentionné précédemment, les chips enchevêtrés dans la pièce aéronautique 2 sont marqués au moyen de traceurs, qui suivent l'orientation des chips sur toute leur longueur. Ces traceurs (ou marqueurs), qui sont ici en fibre de verre, autrement dit, dans un matériau plus dense que la fibre de carbone constituant les chips, sont utilisés par le dispositif 4 de détermination pour réaliser un seuillage de l'image IM. Ils sont en effet facilement discernables (i.e. détectables) sur l'image IM en raison de leur densité plus élevée que celle des chips.

Ainsi, le module 4B d'extraction du dispositif 4 de détermination réalise ici un seuillage sur les niveaux de gris de l'image IM au moyen d'un seuil THR défini à partir de la densité du matériau (i.e. de la fibre de verre ici) constituant les traceurs se trouvant sur les chips (par exemple THR est pris égal à la densité de la fibre de verre) (étape E20). La réalisation d'un seuillage sur une image codée en niveaux de gris est une opération

connue en soi, non détaillée ici. Le seuillage d'image consiste à remplacer un à un les niveaux de gris des pixels d'une image en fonction du seuil considéré (THR ici) : si un pixel a un niveau de gris ayant une valeur supérieure au seuil, on lui attribue par exemple la valeur 255 (blanc), alors
5 que si le niveau de gris du pixel a une valeur inférieure au seuil, on lui attribue la valeur 0 (noir).

Ce seuillage résulte en une image IMS binaire en noir et blanc sur laquelle ne sont représentés que les traceurs (et plus particulièrement leurs directions, c'est-à-dire leurs lignes moyennes (aussi communément désignées par « fibres neutres » des traceurs). La **figure 4C** illustre un
10 extrait de l'image IMS binaire obtenue par seuillage à partir de l'image tomographique IM de la figure 4B. Cet extrait représente un sous-volume de la pièce aéronautique 2.

L'image IMS ainsi obtenue est ensuite simplifiée par le dispositif
15 4 de détermination, afin de la rendre exploitable pour en extraire les orientations des chips de la pièce aéronautique 2 (étape E30). A cet effet, le dispositif 4 de détermination, via son module d'extraction 4B, réalise une squelettisation de l'image IMS et notamment des traceurs représentés sur celle-ci. La squelettisation est une opération classiquement utilisée en
20 analyse de formes et un outil d'analyse particulièrement connu en traitement d'images. Elle consiste à réduire une forme en un ensemble de courbes appelées squelettes centrées dans la forme d'origine, et conservant les propriétés topologiques de la forme d'origine. Des techniques de squelettisation connues sont par exemple des techniques
25 d'amincissement topologique, d'extraction de carte de distances, de simulation du front enflammé ou encore des techniques de calcul analytique s'appuyant par exemple sur des diagrammes de Voronoï. Elles ne sont pas décrites plus en détail ici.

La squelettisation opérée par le module d'extraction 4B conduit
30 à l'extraction, pour chaque traceur, d'une ligne « squelette » représentative de ce traceur (fibre neutre du traceur). Cette ligne est ici une courbe en trois dimensions qui représente mathématiquement et de façon simple le traceur associé à un chip. Chaque ligne ainsi extraite par le module 4B d'extraction d'un traceur est donc également représentative du
35 chip (i.e. de la fibre neutre du chip) auquel ce traceur est associé dans la pièce aéronautique 2, et ce, sur toute sa longueur.

La **figure 4D** illustre un résultat d'une opération de squelettisation réalisée sur l'image IMS représentée la figure 4C.

Puis le squelette formé par les lignes extraites par le module 4B d'extraction est ensuite traité par le dispositif 4 de détermination pour
5 obtenir les informations nécessaires à la caractérisation de la microstructure de la pièce aéronautique 2.

Dans le mode de réalisation décrit ici, lors de ce traitement, le dispositif 4 de détermination utilise une boîte glissante définissant un sous-volume de dimensions prédéfinies de la pièce aéronautique 2 qu'il
10 déplace sur tout ou partie de la pièce 2 (étape E40). On désigne par POS_n , $n=1,...,N$, les différentes positions prises par la boîte lors de ses déplacements, N désignant un entier supérieur ou égal à 1. A chaque position correspondant un sous-volume distinct de la pièce aéronautique.

Dans le mode de réalisation décrit ici, la boîte glissante définit
15 un sous-volume parallélépipédique. Les dimensions de ce sous-volume sont choisies de sorte à permettre l'observation d'un échantillon suffisamment représentatif du matériau de la pièce aéronautique 2 tout en rendant possible l'observation de zones d'anisotropie dans le matériau le cas échéant. On le choisit de taille suffisante pour contenir un nombre de
20 traceurs permettant d'obtenir une statistique suffisante. On note qu'un indice de confiance peut être associé au nombre de traceurs présents dans le sous-volume pour permettre de contrôler la fiabilité des orientations déterminées conformément à l'invention. Les dimensions du sous-volume peuvent également dépendre de la résolution de la
25 cartographie d'orientations qu'on souhaite obtenir.

Dans le mode de réalisation décrit ici, la boîte glissante est déplacée sur l'ensemble du volume de la pièce 2 représenté sur l'image tomographique IM (ou au moins sur l'ensemble d'un volume d'intérêt prédéterminé de la pièce 2) de sorte à couvrir l'ensemble du volume de la
30 pièce 2 (ou du volume d'intérêt). Le déplacement de la boîte glissante est réalisé ici en prévoyant un recouvrement entre chaque déplacement des volumes contenus dans la boîte glissante. Les dimensions du recouvrement sont prédéterminées : elles peuvent être fixées par défaut ou au contraire être paramétrables. La prévision d'un tel recouvrement
35 permet de ne pas perdre d'information et de lisser l'information obtenue. Par ailleurs, le choix le cas échéant d'un volume d'intérêt limité que l'on

souhaite parcourir avec la boîte glissante peut dépendre de plusieurs facteurs, comme par exemple la géométrie de la pièce 2, la présence ou non d'une zone critique sur cette pièce par rapport à sa tenue structurelle, à son comportement, etc.

5 Dans un autre mode de réalisation, une autre forme de boîte peut être envisagée ; par ailleurs, on peut également d'envisager de déplacer la boîte glissante sur le volume d'intérêt considéré de la pièce 2 sans recouvrement entre les différents déplacements.

10 Pour chaque ligne extraite de l'image contenue dans le sous-volume défini par la boîte lorsque celle-ci se trouve dans une position POS_n, le dispositif 4 de détermination, par l'intermédiaire de son module 4C d'extension, étend chaque ligne dans le sens de la largeur et dans le sens de l'épaisseur conformément aux dimensions des chips (largeur l et épaisseur e respectivement) (étape E50). Cette extension est réalisée en
15 une pluralité de points dits de référence de la ligne correspondant ici à des voxels distincts de l'image, et résulte en une pluralité de points dits étendus associés à chaque point de référence.

Pour mieux illustrer cette étape, la **figure 5A** représente dans un plan (x,y) deux lignes L1 et L2 représentatives de deux chips (ou d'une
20 partie de deux chips) enchevêtrés de la pièce aéronautique 2, ces deux lignes ayant été extraites par le module 4B d'extraction. Le quadrillage illustré sur la figure 5A délimite les voxels de l'image compris dans le sous-volume SS-VOL considéré défini par la boîte glissante dans sa position courante POS_n.

25 Sur la **figure 5B**, la ligne L1 est étendue latéralement en plusieurs points dits de référence choisis sur cette ligne L1 (par exemple répartis de façon régulière sur la ligne L1, un point par voxel par lequel passe la ligne L1). Sur la figure 5B, par souci de simplification, seuls quelques points de référence choisis sur la ligne L1 sont représentés par
30 des cercles noirs et désignés par Pref1. Cette extension en largeur est réalisée en créant une pluralité de points dits étendus de part et d'autre ici de chacun des points de référence Pref1, sur des lignes orthogonales à la direction de la ligne L1 en chacun des points de référence Pref1 considérés, et sur une largeur sensiblement égale à la largeur l des chips.
35 On note que du fait de la discrétisation de l'image en voxels, l'extension de la ligne L1 est réalisée en chaque point de référence Pref1 considéré

sur une largeur qui est un multiple de la largeur d'un voxel. On choisit ce multiple de sorte à se rapprocher le plus possible (par excès ou par défaut) de la largeur l d'un chip. Dans l'exemple illustré à la figure 5B, on étend la ligne L1 sur une largeur comprenant trois voxels. Chaque point
5 étendu correspond ainsi à un voxel distinct dans le sous-volume SS-VOL. La figure 5B illustre un exemple de points étendus représentés par des croix et désignés par Pext1 obtenus pour un point de référence PRef1.

L'extension réalisée est parallèle en tout point de de référence choisi sur la ligne L1 à la direction de la ligne L1 en ce point de référence,
10 de sorte que cette extension en largeur créée en quelque sorte une bande de largeur sensiblement égale à l sensiblement centrée sur la ligne L1 (il est possible que la bande ne soit pas exactement centrée sur la ligne L1 en raison de la discrétisation en voxels et suivant où se trouve la ligne neutre L1 du traceur par rapport au centroïde du voxel par lequel elle
15 passe), et suivant, en tout point de référence de la ligne L1, la direction (i.e. l'orientation) de la ligne L1.

La même opération est réalisée ici par le module d'extension 5C sur l'épaisseur e des chips (non représentée sur la figure 5B).

Le module 4D d'association associe ensuite à chaque point
20 étendu obtenu Pext1 et associé à un point de référence Pref1 de la ligne L1, une orientation parallèle à la direction (i.e. à l'orientation) de la ligne L1 en ce point de référence Pref1 (étape E60). Les orientations ainsi associées à chaque point étendu issu de la ligne L1 sont représentées sur la figure 5B par des flèches.

25 Les modules 4C d'extension et 4D d'association procèdent de la même façon pour chaque ligne contenue dans le sous-volume défini par la boîte glissante positionnée à la position POS_n, et notamment pour la ligne L2 comme illustré à la **figure 5C**. On note que certains points étendus peuvent être associés à une pluralité d'orientations correspondant à des
30 lignes distinctes. C'est le cas par exemple sur la figure 5C des points auxquels sont associés deux flèches, une flèche représentant l'orientation de la ligne L1 et une flèche représentant l'orientation de la ligne L2.

Puis, le module 4E d'évaluation du dispositif 4 de détermination évalue pour chacun des points étendus obtenus une orientation moyenne
35 des chips en ces points (étape E70). Cette orientation moyenne est obtenue ici en moyennant les orientations associées à ces points pour les

différentes lignes traitées par les modules 4C et 4D. La **figure 4D** illustre par une flèche discontinue, pour chaque point étendu, l'orientation moyenne obtenue. On note sur cette figure que lorsqu'un point étendu correspond à une unique ligne, son orientation moyenne est confondue avec l'orientation qui lui a été associée pour cette ligne, la moyenne étant réalisée dans ce cas de figure sur un seul terme.

Le module 4F de détermination du dispositif 4 de détermination, détermine ensuite, pour chaque orientation moyenne obtenue, la proportion de points étendus (voxels ici) ayant cette orientation moyenne dans le sous-volume défini par la boîte glissante en position POS_n (étape E80). Cette proportion est égale, pour chaque orientation moyenne, au nombre de points étendus ayant cette orientation moyenne sur le nombre total de points étendus obtenus pour le sous-volume considéré.

La proportion ainsi obtenue fournit une indication de la proportion d'éléments de fibres, localement dans le sous-volume, dans chaque direction de l'espace correspondant à une orientation moyenne obtenue.

Puis le dispositif 4 de détermination déplace la boîte glissante sur une autre position POS_{n+1}, de sorte ici à balayer l'ensemble du volume de la pièce aéronautique 2 (réponse oui à l'étape test E90), et réitère les étapes E40 à E80 précédemment décrites sur le sous-volume nouvellement défini par la boîte glissante lorsque celle-ci est positionnée à la position POS_{n+1}.

On note que dans un autre mode de réalisation, seules les étapes E50 et E60 sont mises en œuvre au moyen de la boîte glissante, les autres étapes étant réalisées sur le volume entier de la pièce en agrégeant les informations obtenues pour chaque boîte glissante.

Lorsque tout le volume de la pièce a été balayé (réponse non à l'étape test E90), le dispositif 4 de détermination, par le biais de son module 4F de détermination, détermine les orientations principales des chips enchevêtrés dans la pièce aéronautique 2 et les proportions de chips ayant ces orientations (étape E100). A cet effet, il agrège les informations obtenues aux étapes E80 pour les différentes positions POS₁,...,POS_N prises par la boîte glissante, en tenant compte d'éventuels recouvrements lors du déplacement de la boîte glissante (une moyenne peut alors être

réalisée sur les proportions obtenues concernées par les recouvrements permettant de lisser les valeurs obtenues).

5 Dans l'exemple envisagé ici, les différentes positions ne prévoyant aucun recouvrement, il suffit à cet effet au module 4F de détermination de prendre en compte les orientations moyennes évaluées pour chaque sous-volume défini par la boîte glissante, et les proportions de points étendus déterminées associées à ces différentes orientations moyennes (typiquement en moyennant pour une même orientation moyenne, les proportions obtenues pour chacun des sous-volumes).

10 Le module 4F de détermination extrait de ces orientations moyennes et des proportions associées, les orientations principales des chips dans la pièce aéronautique 2, et les stockent ici, en association avec les proportions de chips ayant ces orientations principales, dans un tenseur d'orientation (étape E110). De façon connue, un tel tenseur
15 d'orientation fournit une description de la distribution des orientations dans un volume sous la forme d'une matrice de dimensions 3x3. Les vecteurs propres de cette matrice représentent les directions principales des orientations, tandis que les valeurs propres de la matrice caractérisent le taux (i.e. la proportion) d'éléments (ici de chips) ayant ces directions.
20 Une telle description permet avantageusement une représentation graphique des orientations des chips de la pièce aéronautique au moyen d'ellipsoïdes dont les axes sont déterminés à partir des vecteurs propres (direction des axes) et des valeurs propres (dimensions des axes).

Il est possible par ailleurs d'obtenir aisément de ce tenseur une
25 cartographie des orientations des chips sur l'ensemble du volume de la pièce aéronautique 2. La **figure 4E** illustre une telle cartographie pour l'aube représentée sur la figure 4A. Sur cette cartographie, l'usage du gris foncé dénote une distribution orientée des copeaux de fibres alors que l'usage du gris clair dénote une distribution isotrope des copeaux de fibre.

30 On note, que dans le mode de réalisation décrit ici, des marqueurs ou traceurs sont portés par tout ou partie des chips enchevêtrés dans la pièce aéronautique 2. La présence de ces marqueurs facilite, comme il apparaît à la lecture de ce qui précède, l'extraction des lignes représentatives des chips.

35 Toutefois, l'invention s'applique également lorsque de tels marqueurs ne sont pas présents sur les chips. Dans ce cas, le module 4B

d'extraction 4B ne réalise pas de seuillage de l'image IM (autrement dit il ne met pas en œuvre les étapes E20 et E30 précédemment décrites), mais procède directement à une squelettisation de l'image IM, selon l'une quelconque des techniques introduites précédemment ou en utilisant les gradients de l'image IM, de sorte à déterminer les frontières de chaque chip représenté sur l'image IM. On note que cette squelettisation est facilitée par le fait que les frontières des chips sont généralement plus riches en résine que le reste des chips, et ont donc une densité différente par rapport à l'intérieur des chips. On obtient donc à l'issue de cette

5

10

squelettisation des surfaces fermées délimitant les chips. Puis, à partir de ces surfaces fermées (frontières) délimitant les chips, le module 4B d'extraction extrait une ligne « moyenne » (ligne neutre se trouvant au centre des surfaces ainsi délimitées et correspondant à la direction de plus grande longueur de chaque surface, en supposant que les chips ne sont pas de forme carrée) représentative de chaque chip. Les étapes E40 à E110 sont ensuite appliquées sur les lignes ainsi extraites de l'image IM.

15

On note que dans le mode de réalisation décrit ici, une image tomographique en trois dimensions de la pièce aéronautique 2 a été utilisée, et une extension en largeur et en épaisseur conformément aux dimensions des copeaux a été réalisée.

20

Toutefois, comme indiqué précédemment, une telle image tomographique en trois dimensions n'est pas toujours adaptée pour certains matériaux composites ou certaines pièces aéronautiques (typiquement, lorsque les pièces sont fines et de grandes dimensions comme un capot par exemple). Dans ce cas, il est toujours possible d'appliquer l'invention en utilisant une image en deux dimensions de la pièce, obtenue par exemple par radiographie de la pièce. En outre, il est possible lors de l'étape E50 de ne procéder qu'à une extension dans le sens de la largeur des lignes représentatives des copeaux de fibre extraites de l'image, notamment lorsque l'épaisseur des chips est négligeable par rapport à ses autres dimensions. En effet, dans le cas des pièces fines et de grandes dimensions précitées, on peut faire l'hypothèse que les copeaux de fibre sont plans (même si leur orientation dans le plan peut varier le long de la ligne moyenne). Cette hypothèse est d'autant mieux vérifiée que les copeaux de fibre sont fins, et présentent une forme

25

30

35

de type languette (i.e. copeaux très fins présentant une dimension supérieure à l'autre dans le plan) ou de type fil (comme pour les matériaux BMC par exemple). Cette hypothèse s'applique de façon privilégiée aux copeaux de fibre pour lesquels un ratio d'au moins 10 à 100 entre la plus grande et la plus petite dimension existe.

Comme mentionné précédemment, les orientations des chips de la pièce aéronautique 2 ainsi déterminées par le dispositif 4 de détermination à partir de l'image tomographique IM permettent au système CND 1 de mettre en œuvre un contrôle non destructif sur la pièce aéronautique 2.

La **figure 6** illustre les principales étapes d'un procédé de contrôle non destructif mises en œuvre par le système CND 1 illustré à la figure 1 dans un mode particulier de réalisation.

Conformément à ce procédé, une image tomographique de la pièce aéronautique 2 (par exemple l'image IM décrite précédemment) est acquise par le système d'imagerie numérique 3 (étape F10). Cette image IM est, comme décrit précédemment, une image numérique codée en niveau de gris en trois dimensions, chaque voxel de l'image représentant la densité de matériau de la pièce aéronautique 2 en le point représenté par le voxel.

Cette image IM est fournie au dispositif 4 de détermination des orientations. Le dispositif 4 de détermination détermine à partir de l'image IM les orientations des chips enchevêtrés dans le matériau constituant la pièce aéronautique 2 conformément au procédé de détermination décrite précédemment en référence aux figures 3 à 5. Les orientations ainsi déterminées sont fournies, par exemple sous la forme d'un tenseur d'orientation, au dispositif 5 de contrôle.

Le dispositif 5 de contrôle procède à un contrôle non destructif sur la pièce aéronautique 2 en utilisant les orientations ainsi fournies (étape F30).

Ce contrôle peut prendre différentes formes.

Ainsi les orientations ainsi déterminées peuvent être fournies en entrée d'un modèle numérique permettant de reconstruire un volume élémentaire représentatif (ou VER) de la microstructure du matériau de la pièce aéronautique 2, tel que décrit dans le document WO 2015/185840. Un tel modèle numérique alimenté avec des données d'orientations réelles

extraites de la pièce 2 elle-même conformément à l'invention, plutôt qu'avec une statistique moyenne, offre une représentation très réaliste de la pièce 2. Cette représentation, analysée par éléments finis, permet alors avantageusement de prédire de manière fiable les propriétés mécaniques (ex. rigidité, propriétés de rupture, etc.) de la pièce en tout point de celle-ci. Grâce à ce modèle, la pièce réelle peut ainsi être validée au moyen d'un contrôle non destructif au lieu de nécessiter un essai mécanique sur la pièce comme cela est le cas aujourd'hui.

Une autre forme de contrôle non destructif réalisé par le dispositif 5 de contrôle peut consister à estimer la variation des orientations de pièces sortant de production par rapport à des orientations nominales (et une variabilité nominale) utilisées lors de la conception de la pièce. Pour ce faire, le dispositif 5 de contrôle peut évaluer une norme de la différence entre le tenseur d'orientation fourni par le dispositif 4 de détermination (ex. pour l'ensemble de la pièce ou pour chaque sous-volume défini par la boîte glissante dans une position donnée) et le tenseur des orientations nominales. Ce type de contrôle permet de s'assurer de la répétabilité du procédé de fabrication de la pièce aéronautique.

Une autre forme de contrôle non destructif encore peut consister à détecter des dérogations pouvant apparaître au cours de la fabrication d'une pièce, comme par exemple une répartition anormale localement des orientations des chips, l'apparition de porosité ou d'indication comme des inclusions métalliques.

Bien entendu, d'autres contrôles encore peuvent être envisagés à partir des orientations fournies par le dispositif 4 de détermination selon l'invention. La technique de détermination des orientations fournies par l'invention est une technique logicielle permettant un gain de temps substantiel et une facilité de réalisation par rapport aux techniques de contrôles existant aujourd'hui basées essentiellement sur des essais mécaniques réalisés sur pièces. L'incertitude des contrôles effectués sur les pièces en est ainsi réduite, ce qui permet de minimiser les risques tout en allégeant les structures nécessaires à ces contrôles. L'invention permet en outre avantageusement de démontrer aisément la répétabilité du procédé de fabrication des pièces.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de détermination des orientations d'éléments de fibres assemblés dans une pièce (2) réalisée en matériau composite, lesdits éléments de fibres ayant une forme initiale caractérisée par une longueur, une largeur et une épaisseur, ledit procédé comprenant :
- une étape d'obtention (E10) d'une image (IM) de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel ;
 - une étape d'extraction (E30) de l'image, pour au moins un élément de fibre de la pièce, d'une ligne représentative de cet élément de fibre sur sa longueur dans la pièce ;
 - pour chaque ligne extraite de l'image :
 - une étape d'extension (E50) en largeur de cette ligne en une pluralité de points dits de référence de ladite ligne, conformément à la largeur de l'élément de fibre dont la ligne est représentative, ladite extension résultant pour chaque point de référence en une pluralité de points dits étendus associés à ce point de référence ;
 - une étape d'association (E60), à chaque point étendu associé à un point de référence, d'une orientation parallèle à une direction de la ligne en ce point de référence ;
 - une étape d'évaluation (E70) pour une pluralité de points étendus, d'une orientation moyenne des éléments de fibres en ces points à partir des orientations associées à ces points étendus ; et
 - une étape de détermination (E100), pour une pluralité d'orientations des éléments de fibres, d'une proportion d'éléments de fibres ayant ces orientations à partir des orientations moyennes ainsi évaluées.
2. Procédé selon la revendication 1 dans lequel l'image de la pièce est une image en trois dimensions et l'étape d'extension comprend en outre une extension en épaisseur de la ligne en ladite pluralité de points de référence, conformément à l'épaisseur de l'élément de fibre dont la ligne est représentative.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2 dans lequel :

- tout ou partie des éléments de fibres assemblés dans la pièce portent des marqueurs suivant la longueur des éléments de fibre ;
- l'étape d'extraction comprend un seuillage de l'image réalisé au moyen d'un seuil défini à partir d'une densité de matériau desdits marqueurs, ledit seuillage résultant en une image représentant lesdits marqueurs ; et
- les lignes sont extraites à partir des marqueurs représentés sur l'image résultant du seuillage.

10

4. Procédé selon la revendication 1 ou 2 dans lequel l'étape d'extraction comprend la détermination de frontières de chaque élément de fibre de la pièce, les lignes représentatives des éléments de fibres étant extraites à partir des frontières ainsi déterminées.

15

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 dans lequel au moins les étapes d'extension (E50) et d'association (E60) sont mises en œuvre en utilisant une boîte glissante définissant un sous-volume de dimensions prédéfinies et déplacée sur tout ou partie de la pièce.

20

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel les orientations des éléments de fibres et les proportions d'éléments de fibres ayant ces orientations moyennes sont stockées (E110) dans un tenseur d'orientation.

25

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel l'image de la pièce est une image tomographique ou radiographique.

30

8. Programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution des étapes du procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur.

35

9. Support d'enregistrement lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes du procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.

5

10. Procédé de contrôle non destructif appliqué à une pièce (2) en matériau composite, ledit matériau composite comprenant un assemblage d'éléments de fibres, ledit procédé de contrôle comprenant :

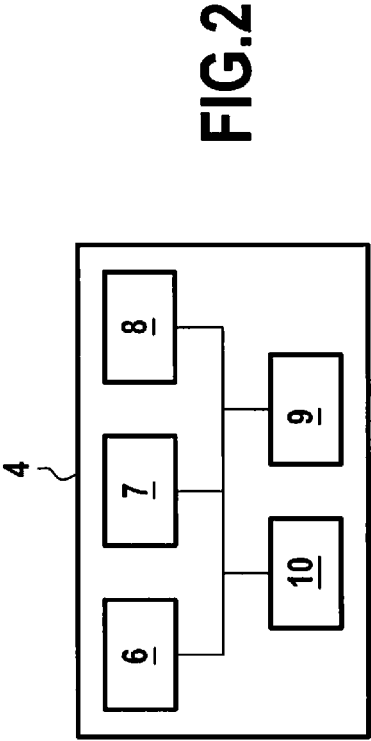
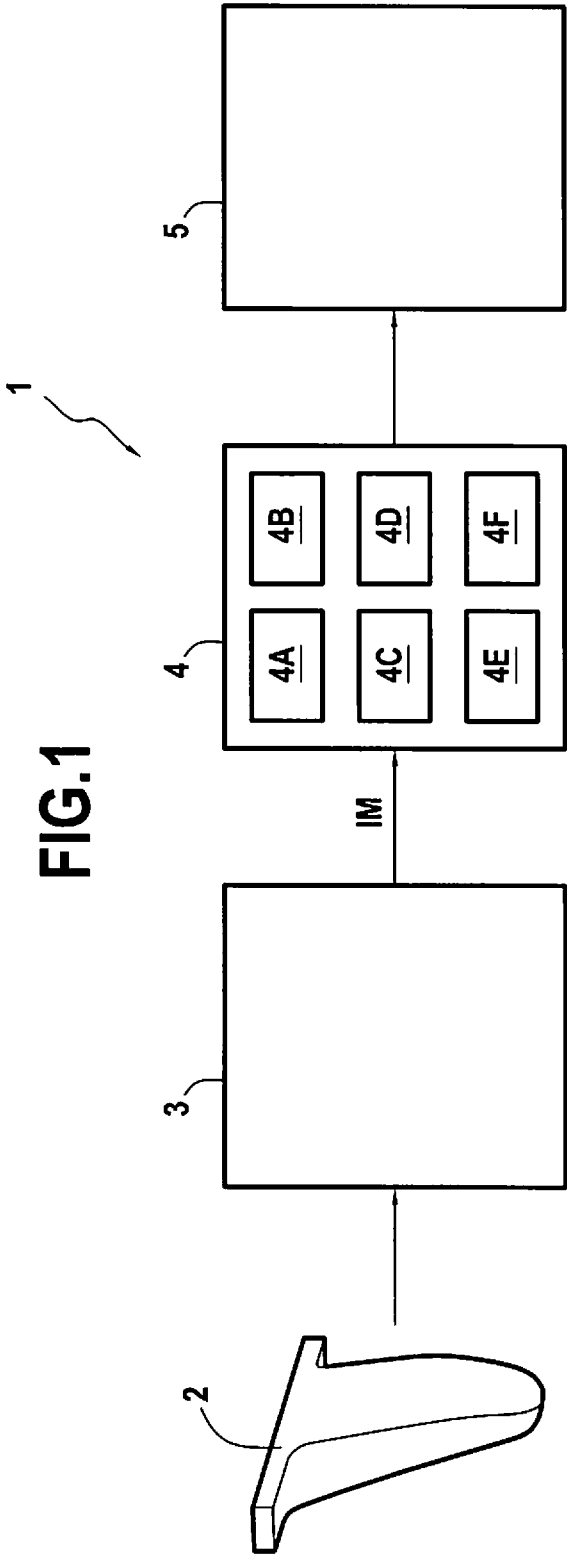
- 10 — une étape d'acquisition (F10) au moyen d'un système d'imagerie numérique (3), d'une image (IM) de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel ;
- 15 — une étape de détermination (F20) des orientations des éléments de fibres de la pièce mettant en œuvre un procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 ; et
- une étape de contrôle non destructif (F30) réalisée sur la pièce utilisant les orientations ainsi déterminées.

20 11. Procédé de contrôle non destructif selon la revendication 10 dans lequel ladite pièce est une pièce aéronautique.

25 12. Dispositif de détermination (4) des orientations d'éléments de fibres assemblés dans une pièce réalisée en matériau composite, lesdits éléments de fibres ayant une forme initiale caractérisée par une longueur, une largeur et une épaisseur, ledit dispositif comprenant :

- un module d'obtention (4A), apte à obtenir une image de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel ;
- 30 — un module d'extraction (4B), configuré pour extraire de l'image, pour au moins un élément de fibre de la pièce, une ligne représentative de cet élément de fibre sur tout ou partie de sa longueur dans la pièce ;
- un module d'extension (4C), configuré pour étendre en largeur chaque ligne extraite de l'image en une pluralité de points dits de référence de ladite ligne, conformément à la largeur de l'élément de fibre dont la
- 35 ligne est représentative, ladite extension résultant pour chaque point

- de référence en une pluralité de points dits étendus associés à ce point de référence ;
- un module d'association (4D), configuré pour associer à chaque point étendu associé à un point de référence d'une ligne extraite de l'image, une orientation parallèle à une direction de la ligne en ce point de référence ;
 - un module d'évaluation (4E), configuré pour évaluer pour une pluralité de points étendus, une orientation moyenne des éléments de fibres en ces points à partir des orientations associées à ces points étendus ; et
 - un module de détermination (4F), configuré pour déterminer, pour une pluralité d'orientations des éléments de fibres, une proportion d'éléments de fibres ayant ces orientations à partir des orientations moyennes ainsi évaluées.
13. Système de contrôle non destructif (1) destiné à être utilisé pour contrôler une pièce en matériau composite, ledit matériau composite comprenant un assemblage d'éléments de fibres, ledit système de contrôle comprenant :
- un système d'imagerie numérique (3), configuré pour acquérir une image de la pièce, chaque pixel de l'image représentant une densité de matériau en un point de la pièce représenté sur l'image par ce pixel ;
 - un dispositif de détermination (4) des orientations des éléments de fibres de la pièce selon la revendication 12 ; et
 - un dispositif de contrôle (5) de la pièce configuré pour utiliser les orientations ainsi déterminées.



2/4

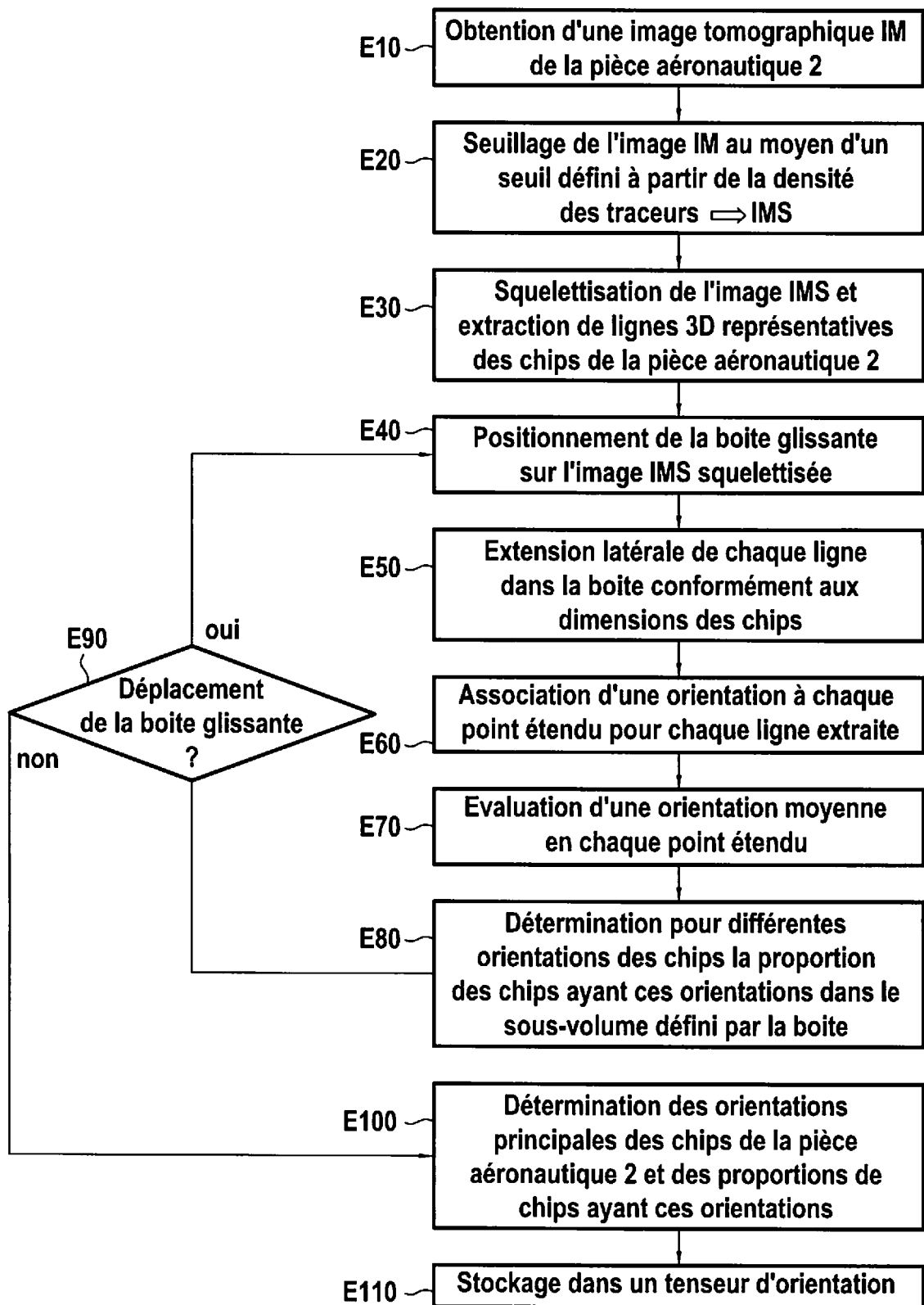


FIG.3

3/4



FIG. 4A

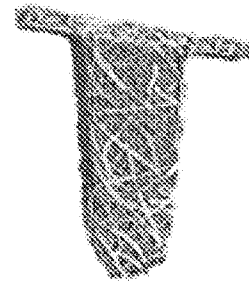


FIG. 4B

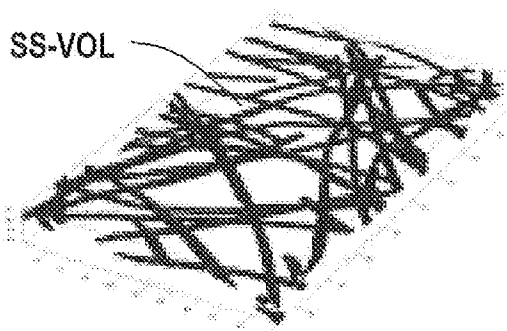


FIG. 4C

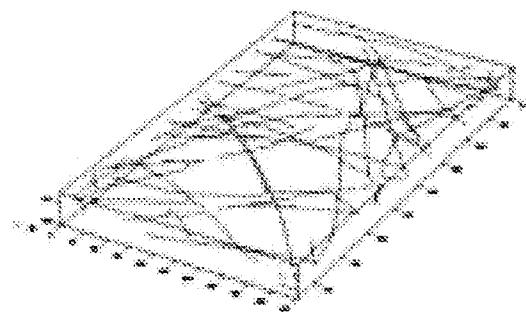


FIG. 4D



FIG. 4E

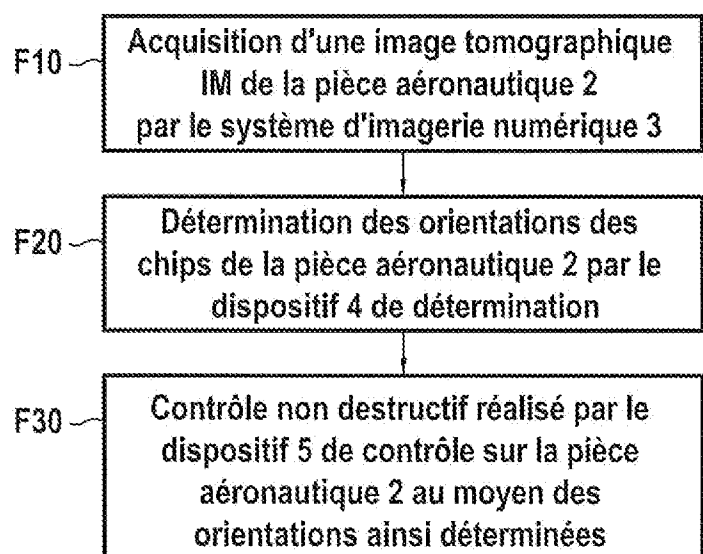
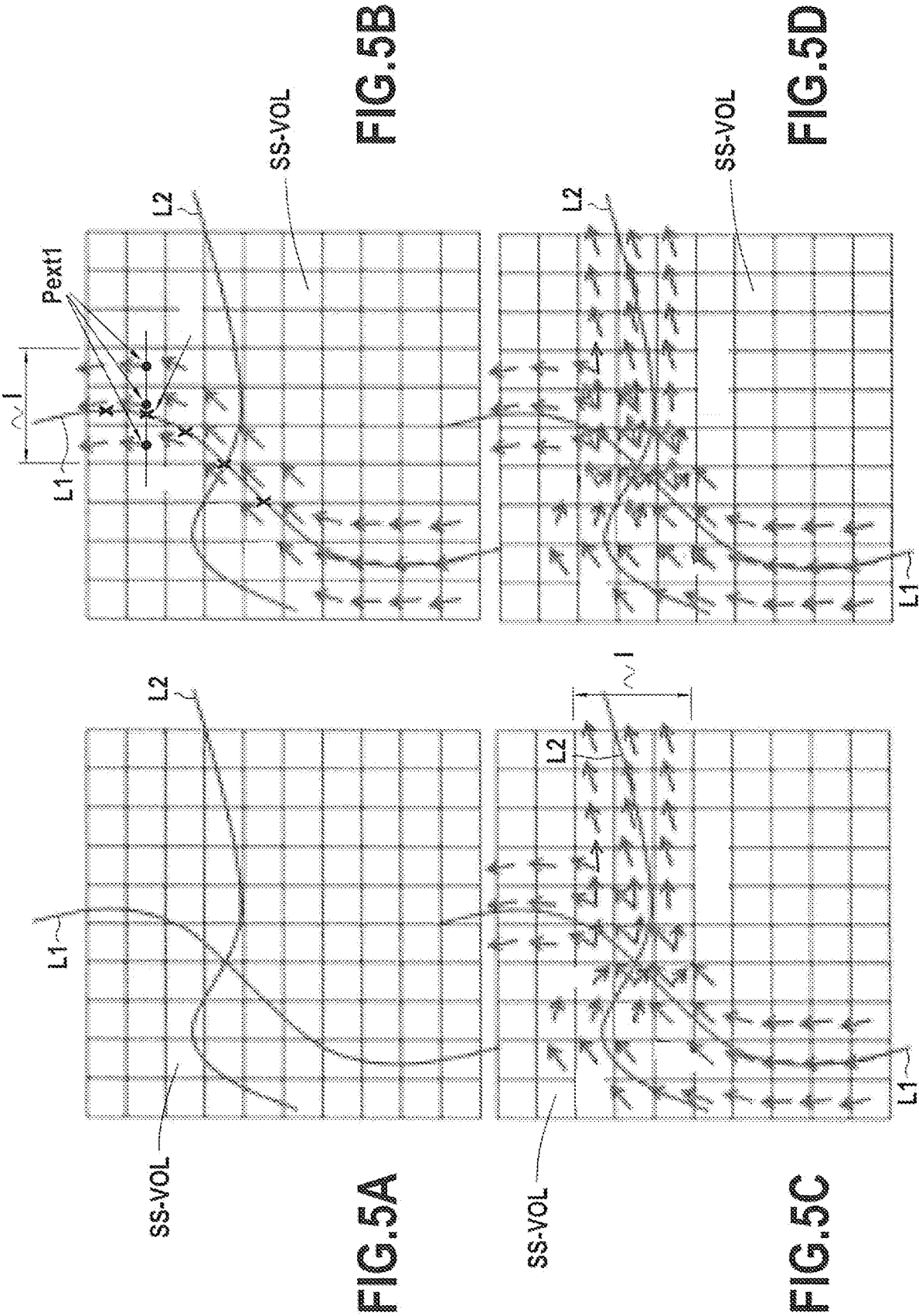


FIG. 6



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2017/053459

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G06T7/70

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)

G06T G06K

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

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JÉRÔME LUX: "AUTOMATIC SEGMENTATION AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF LOW DENSITY FIBREBOARDS", IMAGE ANALYSIS AND STEREOLOGY, vol. 32, no. 1, 19 March 2013 (2013-03-19) , page 13, XP055375971, SI ISSN: 1580-3139, DOI: 10.5566/ias.v32.p13-25 page 22, right-hand column, last paragraph ----- -/--	1-13



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

30 January 2018

Date of mailing of the international search report

09/02/2018

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

Celik, Hasan

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/053459

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	PARHAM SOLTANI ET AL: "3D Fiber Orientation Characterization of Nonwoven Fabrics using X-ray Micro-computed Tomography", WORLD JOURNAL OF TEXTILE ENGINEERING AND TECHNOLOGY, vol. 1, 1 January 2015 (2015-01-01), pages 41-47, XP055375988, page 44 - page 45 -----	1-13
A	XIANG HUANG ET AL: "Skeleton-based tracing of curved fibers from 3D X-ray microtomographic imaging", RESULTS IN PHYSICS, vol. 6, 25 March 2016 (2016-03-25), pages 170-177, XP055375985, ISSN: 2211-3797, DOI: 10.1016/j.rinp.2016.03.008 page 175 - page 176 -----	1-13

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2017/053459

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G06T7/70 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) G06T G06K		
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
A	JÉRÔME LUX: "AUTOMATIC SEGMENTATION AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF LOW DENSITY FIBREBOARDS", IMAGE ANALYSIS AND STEREOLOGY, vol. 32, no. 1, 19 mars 2013 (2013-03-19), page 13, XP055375971, SI ISSN: 1580-3139, DOI: 10.5566/ias.v32.p13-25 page 22, colonne de droite, dernier alinéa ----- -/--	1-13
☒ 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 30 janvier 2018		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 09/02/2018
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 Celik, Hasan

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	PARHAM SOLTANI ET AL: "3D Fiber Orientation Characterization of Nonwoven Fabrics using X-ray Micro-computed Tomography", WORLD JOURNAL OF TEXTILE ENGINEERING AND TECHNOLOGY, vol. 1, 1 janvier 2015 (2015-01-01), pages 41-47, XP055375988, page 44 - page 45 -----	1-13
A	XIANG HUANG ET AL: "Skeleton-based tracing of curved fibers from 3D X-ray microtomographic imaging", RESULTS IN PHYSICS, vol. 6, 25 mars 2016 (2016-03-25), pages 170-177, XP055375985, ISSN: 2211-3797, DOI: 10.1016/j.rinp.2016.03.008 page 175 - page 176 -----	1-13