



(51) Classification internationale des brevets :

G01N 29/04 (2006.01) G01N 29/24 (2006.01)
G01N 29/11 (2006.01) G01N 29/265 (2006.01)
G01N 29/22 (2006.01) G01N 29/48 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2018/050154

(22) Date de dépôt international :

23 janvier 2018 (23.01.2018)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

1750585 25 janvier 2017 (25.01.2017) FR

(71) Déposants : SAFRAN [FR/FR] ; 2 boulevard du Général
Martial Valin, 75015 Paris (FR). CENTRE NATIONAL

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR] ; 3 rue
Michel Ange, 75016 Paris (FR). ECOLE SUPERIEURE
DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES
DE LA VILLE DE PARIS [FR/FR] ; 10 Rue Vauquelin,
75005 Paris (FR).

(72) Inventeurs : BAELDE, Aurélien ; Safran Aircraft Engines
PI (AJI), Rond-point René Ravaud - Réau, 77550 Moissy-Cramayel (FR). JENSON, Frédéric ; Safran Aircraft
Engines PI (AJI), Rond-point René Ravaud - Réau, 77550
Moissy-Cramayel (FR). FINK, Mathias ; 16 rue Edouard
Laferrrière, 92190 Meudon (FR). LAURENT, Jérôme ; 1
rue de la Madone, 75018 Paris (FR). PRADA, Claire ; 60
rue Madame, 75006 Paris (FR).

(74) Mandataire : GEVERS & ORES ; 9 Rue Saint Antoine
du T, 31000 Toulouse (FR).

(54) Title: MULTIELEMENT METHOD AND DEVICE FOR TESTING PARTS WITH ULTRASOUND

(54) Titre : PROCEDE ET DISPOSITIF DE CONTROLE DE PIECES PAR ULTRASONS MULTIELEMENTS

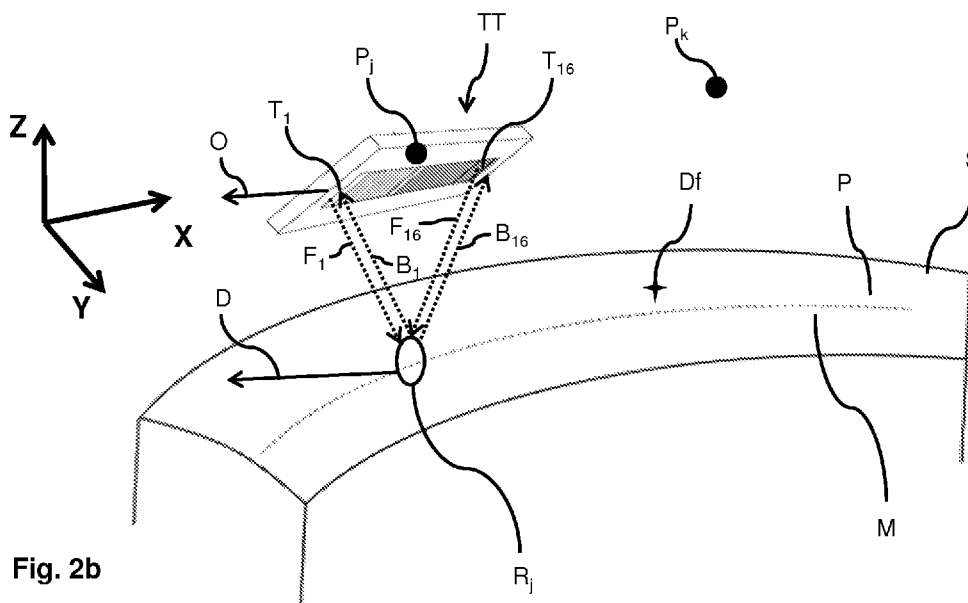


Fig. 2b

(57) Abstract: The present invention relates to a method for nondestructively testing a part (P) comprising an elongate microstructure (M), said method being characterised in that it includes the following steps: moving a linear transducer (TT) to a plurality of positions ($\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$) located facing a surface (S) of said part, said linear transducer comprising a plurality of transducer elements ($\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$) that are aligned along a main direction (O); emitting a plurality of elementary ultrasonic beams ($\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$), each of said plurality of elementary ultrasonic beams being emitted by each of said plurality of transducer elements in the direction of said surface; measuring a plurality of echo signals ($\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$) and a plurality of structural noises ($\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$), each of said plurality of echoes signals and each of said plurality of structural noises

(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, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

Publiée:

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

being measured by each of said plurality of transducer elements, each of said echo signals resulting from the backscatter of the elementary ultrasonic beams by a defect (Df) under the surface of the part, and each of said structural noises resulting from the backscatter of the elementary ultrasonic beams by said elongate microstructure; and determining a direction (D) of elongation of the elongate microstructure when an amplitude of one among the plurality of measured structural noises is minimal in said plurality of positions. The present invention furthermore relates to a non-destructive testing system for implementing said testing method.

(57) **Abstrégé :** La présente invention concerne un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce (P) comprenant une microstructure (M) allongée, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes : -déplacement d'un transducteur linéaire (TT) en une pluralité de positions ($\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$) situées en regard d'une surface (S) de ladite pièce, ledit transducteur linéaire comprenant une pluralité d'éléments transducteurs ($\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$) alignés le long d'une direction principale (O); - émission d'une pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires ($\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$), chacun de ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires étant émis par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs en direction de ladite surface; -mesure d'une pluralité de signaux ($\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$) d'écho et d'une pluralité de bruits ($\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$) de structure, chacun de ladite pluralité de signaux d'écho et chacun de ladite pluralité de bruits de structure étant mesurés par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs, chacun desdits signaux d'écho résultant de la rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par un défaut (Df) sous la surface de la pièce, et chacun desdits bruits de structure résultant de la rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par ladite microstructure allongée; - détermination d'une direction (D) d'allongement de la microstructure allongée lorsqu'une amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits de structure mesurés est minimale selon ladite pluralité de positions. La présente invention concerne en outre un système de contrôle non-destructif pour mettre en œuvre ledit procédé de contrôle.

PROCEDE ET DISPOSITIF DE CONTROLE DE PIECES PAR ULTRASONS MULTIELEMENTS

5 Arrière-plan de l'invention

La présente invention se rapporte au domaine général des transducteurs ultrasonores à éléments multiples. En particulier, la présente invention s'applique au contrôle non-destructif de pièces comprenant une microstructure allongée.

10

Dans le domaine de l'aéronautique, il est important de contrôler l'intégrité de pièces forgées destinées à être montées dans un aéronef. Ces pièces sont constituées d'un matériau, par exemple du titane ou un alliage de titane, comportant une structure cristalline et une microstructure. Par définition, la structure cristalline
15 d'une pièce définit la structure de cette pièce à une échelle de l'ordre d'un dixième de nanomètre. La microstructure d'une pièce définit la structure de cette pièce à une échelle comprise entre un nanomètre et un centimètre.

La structure cristalline d'une pièce est contrôlée à l'aide de méthodes reposant sur la diffraction d'ondes électromagnétiques, par exemple la diffraction de rayons X.

20 La microstructure d'une pièce est contrôlée à l'aide de méthodes reposant sur la réflexion, sur la diffusion, et/ou sur la rétrodiffusion d'ondes acoustiques, par exemple des ultrasons.

Ainsi, il est connu des procédés de contrôle par ultrasons destinés à détecter des défauts dans une pièce. Un défaut peut comprendre, par exemple, des
25 laminages situés entre deux couches formant la pièce, ou encore des discontinuités surfaciques ou volumiques de ladite pièce. Ces procédés consistent à produire un faisceau ultrasonore en direction d'une pièce à contrôler, et à analyser les signaux réfléchis, diffusés et rétrodiffusés par les défauts situés dans cette pièce.

30 Des procédés connus de contrôle par ultrasons utilisent une pluralité de transducteurs ultrasonores, configurés pour détecter des défauts situés à différentes profondeurs d'une pièce. Le document F. J. Margetan, J. Umbach, R. Roberts et al., « Inspection Development for Titanium Forgings », NTIS, 2007 propose ainsi

plusieurs types de transducteurs ultrasonores de géométrie annulaire ou sectorielle, déposables sur la surface de la pièce à contrôler.

5 Le document WO 2005/06895 décrit une méthode et un appareil pour examiner le matériau à l'intérieur d'un objet en utilisant la réflexion ou la diffraction d'ultrasons.

10 Le document US9488573 B2 décrit un système d'imagerie d'un objet utilisant des ondes acousto-électromagnétiques pour étudier les propriétés physiques d'un objet.

Le document CN104280455 A décrit une méthode de détection de défauts dans une pièce en utilisant la diffusion d'ultrasons.

15 Cependant, ces procédés et ces dispositifs ne permettent pas de détecter une microstructure allongée se situant dans une pièce à contrôler.

20 En effet, une pièce à contrôler peut comprendre une ou plusieurs microstructures allongées. C'est le cas notamment de pièces réalisées à partir d'une billette cylindrique en titane ou en alliage de titane. Lors de la réalisation de ces pièces, par exemple lors d'un forgeage, une ou plusieurs microstructures allongées se forment dans ces pièces.

25 Or, un inconvénient d'une pièce comprenant une microstructure allongée est que, lors d'un contrôle de cette pièce par un faisceau ultrasonore, la rétrodiffusion du faisceau ultrasonore avec cette microstructure allongée produit un bruit, dit bruit de structure. Ce bruit de structure interfère avec les signaux issus de la réflexion, de la diffusion et/ou de la rétrodiffusion du faisceau ultrasonore par les défauts situés dans la pièce, et masque une partie des signaux mesurés lors d'un contrôle de la pièce.

30

Cet inconvénient est d'autant plus notable lorsque la pièce à contrôler comporte une forme complexe ou une structure interne anisotrope. C'est notamment le cas de pièces de forme axisymétrique, ou de pièces réalisées en matériaux métalliques forgés en titane, ou en alliage de titane.

De manière surprenante, les inventeurs ont montré que l'amplitude du bruit de structure dépend de la position relative et de l'orientation relative du transducteur ultrasonore utilisé pour contrôler la pièce.

5

Par ailleurs, les inventeurs ont montré que la géométrie des transducteurs ultrasonores connus ne permet pas de détecter avec précision la présence d'une microstructure allongée se situant dans une pièce à contrôler.

10

Objet et résumé de l'invention

Pour pallier les inconvénients susmentionnés, un objet de l'invention est de proposer un procédé de contrôle ultrasonore d'une pièce pour déterminer une direction d'allongement d'une microstructure allongée se situant dans une pièce.

15

Corrélativement, un autre objet de l'invention est de proposer un dispositif de contrôle ultrasonore d'une pièce, ledit dispositif étant configuré pour détecter et localiser avec précision des défauts et des microstructures allongées se situant dans une pièce.

20

Dans la présente description et les revendications annexées, l'expression « position » est utilisée pour désigner simultanément la localisation spatiale et l'orientation d'un élément dans l'espace. En particulier, l'homme de métier comprendra que la position d'un élément dans l'espace peut se définir à l'aide de six degrés de liberté ($X, Y, Z, \Psi, \theta, \varphi$), les trois coordonnées (X, Y, Z) désignant la localisation spatiale de cet élément en coordonnées cartésiennes dans un repère orthonormé (X, Y, Z), et les trois angles (Ψ, θ, φ) désignant l'orientation de cet élément en coordonnées angulaires.

25

30

Un objet de l'invention est ainsi de proposer un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce comprenant une microstructure allongée, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- déplacement d'un transducteur linéaire en une pluralité de positions situées en regard d'une surface de ladite pièce, ledit transducteur linéaire comprenant une pluralité d'éléments transducteurs alignés le long d'une direction principale dudit transducteur linéaire ;
- 5 - émission d'une pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires, chacun de ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires étant émis par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs en direction de ladite surface ;
- mesure d'une pluralité de signaux d'écho et d'une pluralité de bruits de structure, chacun de ladite pluralité de signaux d'écho et chacun de ladite
- 10 pluralité de bruits de structure étant mesurés par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs, chacun desdits signaux d'écho résultant de la rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par un défaut sous la surface de la pièce, et chacun desdits bruits de structure résultant de la rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par ladite
- 15 microstructure allongée ;
- détermination d'une direction d'allongement de la microstructure allongée lorsqu'une amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits de structure mesurés est minimale selon ladite pluralité de positions.

20 Avantageusement, ce procédé de contrôle permet de détecter et de localiser avec précision une microstructure allongée se situant dans une pièce.

Avantageusement, ce dispositif de contrôle permet de contrôler une pièce en minimisant le bruit de structure généré par la rétrodiffusion de faisceaux ultrasonores

25 avec une microstructure allongée dans une pièce.

Avantageusement, ce procédé de contrôle ne nécessite pas, avant sa mise en œuvre, de connaître la forme de la pièce.

30 Avantageusement, ce procédé de contrôle est simple à mettre en œuvre, efficace et économique.

Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires émise en chacune de la pluralité de positions est focalisée pour former une région focale.

5 Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, ladite direction d'allongement de la microstructure allongée est déterminée selon une direction parallèle à ladite direction principale.

Corrélativement, un objet de l'invention est de proposer un système de
10 contrôle non-destructif d'une pièce comprenant une microstructure allongée, ledit système étant caractérisé en ce qu'il comporte :

- un transducteur linéaire, ledit transducteur linéaire comprenant une pluralité d'éléments transducteurs alignés le long d'une direction principale dudit transducteur linéaire, chaque élément transducteur de
15 ladite pluralité d'éléments transducteurs étant apte à émettre un faisceau ultrasonore ;
- un dispositif de contrôle comportant :
 - des moyens de déplacement du transducteur linéaire en une pluralité de positions situées en regard d'une surface de ladite pièce ;
 - 20 • des moyens d'émission d'une pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires, chacun de ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires étant émis par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs en direction de ladite surface ; et
 - des moyens de mesure d'une pluralité de signaux d'écho et d'une pluralité de
25 bruits de structure, chacun de ladite pluralité de signaux d'écho et chacun de ladite pluralité de bruits de structure étant mesurés par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs, chacun desdits signaux d'écho résultant de la rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par un défaut sous la surface de la pièce, et chacun desdits bruits de structure résultant de la
30 rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par ladite microstructure allongée ;

- des moyens de détermination d'une direction d'allongement de la microstructure allongée lorsqu'une amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits de structure mesurés est minimale selon ladite pluralité de positions.

5 Avantageusement, ce système de contrôle permet de contrôler efficacement et rapidement une pièce, ladite pièce comprenant des défauts et des microstructures allongées.

10 Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, ladite pluralité d'éléments transducteurs présente une forme sensiblement rectangulaire comprenant une grande dimension et une petite dimension, lesdits éléments transducteurs étant disposés de manière contiguë les uns par rapport aux autres le long de la grande dimension.

15 Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, lesdits moyens d'émission comprennent des moyens de focalisation pour focaliser ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires émise en chacune de la pluralité de positions pour former une région focale.

20 Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs comprend une lentille de préfocalisation disposée le long de la grande dimension.

25 Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, lesdits moyens de déplacement sont configurés pour déplacer ledit transducteur linéaire en translation le long de trois axes orthogonaux et en rotation autour de trois axes orthogonaux.

30 Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, la fréquence d'émission de chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs est supérieure ou égale à 1 MHz et inférieure ou égale à 20 MHz.

 Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, le nombre d'éléments transducteurs est choisi parmi : 16, 64, 96, ou 128.

Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, la grande dimension et la petite dimension de chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs sont égales à A mm et à B mm, respectivement.

5

Brève description des dessins

Dans la suite de la description, on adoptera par convention et à titre non limitatif, des orientations longitudinale, transversale et verticale en référence au trièdre (X, Y, Z) représenté sur les figures. La direction verticale est utilisée à titre de
10 référence géométrique sans rapport avec la direction de la gravité terrestre.

L'invention et ses caractéristiques techniques seront mieux comprises à la lecture de la description qui suit, accompagnée de plusieurs figures représentant :

- 15 - les **figures 1a** et **1b**, respectivement, plusieurs vues schématiques de profil d'un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce selon un mode de réalisation de l'invention ;
- les **figures 2a** et **2b**, respectivement, plusieurs vues schématiques en perspective d'un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce selon un
20 mode de réalisation de l'invention ;
- la **figure 3**, sous forme d'organigramme, un exemple d'étapes d'un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce selon un mode de réalisation de l'invention ;
- les **figures 4a** et **4b**, respectivement, une vue schématique en vue de
25 dessus d'un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce à l'aide d'un transducteur linéaire déplacé en une première position et une évolution temporelle de l'amplitude d'un bruit de structure mesuré par ce transducteur linéaire en cette première position selon un mode de réalisation de l'invention ;
- 30 - les **figures 5a** et **5b**, respectivement, une vue schématique en vue de dessus d'un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce à l'aide d'un transducteur linéaire déplacé en une deuxième position et une évolution temporelle de l'amplitude d'un bruit de structure mesuré par ce transducteur

linéaire en cette deuxième position selon un mode de réalisation de l'invention ;

- les **figures 6a, 6b et 6c**, respectivement, une vue en section dans un plan XY, une vue en section dans un plan XZ et une vue en section dans un plan YZ d'un transducteur linéaire utilisé pour mettre en œuvre un mode de réalisation de l'invention ;

- la **figure 7**, sous forme d'organigramme, un exemple de moyens utilisés pour mettre en œuvre un dispositif de contrôle non-destructif d'une pièce selon un mode de réalisation de l'invention;

- la **figure 8**, une vue schématique en perspective d'un transducteur linéaire utilisé pour mettre en œuvre un mode de réalisation de l'invention.

Naturellement, pour satisfaire des besoins spécifiques, une personne compétente dans le domaine de la technique pourra appliquer des modifications dans la description suivante. Bien qu'elle se réfère à différents modes de réalisation, la présente invention n'est pas limitée à ces modes de réalisation spécifiques, et toutes modifications propres au champ d'application de la présente invention peuvent être considérées comme évidentes pour une personne versée dans l'art de la technique correspondant.

Description détaillée d'un mode de réalisation

Dans la suite de la description, des éléments présentant une conception ou des fonctions identiques, similaires ou analogues seront désignés par une même référence.

Les **figures 1a, 1b, 2a et 2b** représentent des vues schématiques d'un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce **P** à l'aide d'un transducteur linéaire **TT** selon un mode de réalisation de l'invention. Dans les exemples représentés, la pièce **P** comprend une microstructure **M** allongée et un défaut **Df** qui se situent sous une surface **S** de ladite pièce **P**. En outre, la pièce **P** est une billette forgée en titane, de forme cylindrique, qui comporte une structure interne anisotrope donnant lieu à une microstructure **M** allongée le long d'une direction **D**.

De manière non limitative, la pièce **P** peut être tout type de pièce, de forme et de composition quelconques. Par exemple, la pièce **P** peut être une pièce métallique, une pièce en matériau composite comprenant des fibres métalliques, ou encore une pièce comprenant un renforcement unidirectionnel orienté le long d'une direction.

5 Selon d'autres exemples, la pièce **P** peut être une pièce de forme axisymétrique, un solide de révolution, ou encore une pièce de forme symétrique.

Sur les **figures 1a** et **1b**, la pièce **P** est immergée dans un liquide **L**, par exemple de l'eau contenue dans une cuve **CC**. Cette configuration permet de mettre
10 en œuvre un procédé de contrôle ultrasonore en immersion de la pièce **P**, à l'aide d'un transducteur linéaire **TT** positionné à distance de la pièce **P**.

En variante, un procédé de contrôle selon un autre mode de réalisation de l'invention peut être appliqué en l'absence de liquide **L**. Pour mettre en œuvre un procédé de contrôle ultrasonore de la pièce **P** sans réaliser d'immersion, un
15 transducteur linéaire **TT** peut être déposé directement sur une surface **S** de la pièce **P**.

En variante, un transducteur linéaire **TT** peut être déposé sur une surface **S** de la pièce **P** via un relais, par exemple un polymère thermoplastique ou un polymère transparent, tel que du plexiglas. Un couplant, par exemple un gel
20 composite ou une huile lubrifiante, peut aussi être placé entre le transducteur linéaire **TT** et la surface **S** de la pièce **P** pour faciliter le déplacement du transducteur linéaire **TT** entre deux positions.

En variante, un transducteur linéaire **TT** peut être placé et déplacé à distance d'une surface **S** de la pièce **P**, sans utiliser de liquide **L**. Un contrôle de la pièce **P**
25 peut notamment être réalisé dans l'air, sans utiliser de couplant.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le transducteur linéaire **TT** est un transducteur acoustique comprenant une pluralité d'éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$. Le transducteur linéaire **TT** comprend un nombre entier **n** d'éléments
30 transducteurs.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le nombre **n** d'éléments transducteurs est choisi parmi : 16, 64, 96, ou 128. De manière non limitative, les

figures illustrent un exemple de transducteur linéaire **TT** comprenant 16 éléments transducteurs, soit à définir **n** comme étant égal à 16.

5 Les éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ sont disposés le long d'une direction principale **O** du transducteur linéaire **TT**. La direction de la direction principale **O** définit la direction d'orientation dudit transducteur linéaire **TT** dans le référentiel **(X, Y, Z)**.

10 Selon un mode de réalisation de l'invention, le transducteur linéaire **TT** est adapté pour être déplacé en translation selon trois premiers axes orthogonaux. Par exemple, lesdits trois premiers axes orthogonaux peuvent correspondre aux direction du référentiel **(X, Y, Z)**. En outre, le transducteur linéaire **TT** est adapté pour être déplacé en rotation selon trois autres axes orthogonaux. Par exemple, et de manière non limitative, lesdits trois autres axes orthogonaux sont parallèles auxdits trois
15 premiers axes orthogonaux.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le transducteur linéaire **TT** est déplaçable en translation le long de la direction longitudinale **X**, de la direction transversale **Y** et/ou de la direction verticale **Z**. En outre, le transducteur linéaire **TT** peut être déplacé en rotation autour d'un axe de roulis **A ψ** , autour d'un axe de tangage **A θ** , et/ou autour d'un axe de lacet **A ϕ** pouvant être parallèle à la direction **Z**.
20 Sur les figures, l'axe de roulis **A ψ** est identique à la direction longitudinale **X**, l'axe de tangage **A θ** est identique à la direction transversale **Y**, et l'axe de lacet **A ϕ** est identique à la direction verticale **Z**.

25 Selon un mode de réalisation de l'invention, chacun desdits éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ comprend un élément piézoélectrique, par exemple un résonateur piézoélectrique, qui est placé à l'intérieur ou sur l'une des surfaces du transducteur linéaire **TT**.

30 Chacun des éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ est apte à vibrer et à émettre une onde acoustique, en particulier un faisceau ultrasonore, lorsque ledit élément piézoélectrique est soumis à une impulsion électrique. Ainsi, le transducteur linéaire **TT** est configuré pour générer des faisceaux ultrasonores à partir d'éléments transducteurs excitables électriquement, et indépendamment les uns des autres. Les faisceaux ultrasonores élémentaires peuvent comprendre des ondes planes, des

ondes sphériques, ou encore tout type d'ondes adaptées au contrôle d'une pièce par ultrasons.

Selon un mode de réalisation de l'invention, chacun desdits éléments
5 transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ est configuré pour émettre un faisceau ultrasonore
élémentaire en direction d'une surface S d'une pièce P . A chaque élément
transducteur correspond ainsi l'émission d'un faisceau ultrasonore élémentaire. A
l'élément transducteur T_1 correspond l'émission d'un faisceau ultrasonore
élémentaire F_1 , à l'élément transducteur T_2 correspond l'émission d'un faisceau
10 ultrasonore élémentaire F_2 ; et ainsi de suite jusqu'à l'émission d'un faisceau
élémentaire F_{16} par un dernier élément transducteur T_{16} .

Selon un mode de réalisation de l'invention, la fréquence d'émission des
faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ peut être choisie dans une
15 gamme comprise entre 20 kHz et 20 MHz. En particulier, la fréquence d'émission
des faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ peut être choisie comme
étant supérieure ou égale à 1 MHz et inférieure ou égale à 20 MHz.

Selon un mode de réalisation de l'invention, la fréquence d'émission des
20 faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ de chacun de la pluralité
d'éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ est choisie dans une gamme permettant
d'avoir une résolution suffisante des signaux mesurés par ceux-ci.

Selon un mode de réalisation de l'invention, l'émission de faisceaux
25 élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ par les éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ peut
s'effectuer de manière successive ou de manière simultanée.

Selon un mode de réalisation de l'invention, les faisceaux ultrasonores
élémentaires peuvent être focalisés à l'aide de l'application d'une loi de retard ou de
30 plusieurs lois de retard. Cette loi de retard, ou ces lois de retard, permettent de
diriger lesdits faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ de manière
spécifique dans la pièce P .

En particulier, une mise en forme dynamique des faisceaux ultrasonores peut
être réalisée en appliquant des retards aux signaux électriques utilisés pour exciter

chaque élément transducteur. Le choix de retards adaptés permet ainsi de modifier les caractéristiques des faisceaux ultrasonores émis, notamment leur direction ou leur orientation.

5 Sur la **figure 1a**, un transducteur linéaire **TT** est placé en une position **P_i**. La position **P_i** est une position choisie parmi une pluralité de positions **{P₁, P₂, ..., P_m}** situées en regard d'une surface **S** de la pièce et en lesquelles le transducteur linéaire **TT** est déplaçable.

10 En cette position **P_i**, la position du transducteur linéaire **TT** est définie par six coordonnées **(X_i, Y_i, Z_i, Ψ_i, θ_i, φ_i)**, les trois coordonnées **X_i, Y_i** et **Z_i** localisant la position spatiale **P_i** du transducteur linéaire **TT** dans l'espace défini par les trois directions du repère orthonormé **(X, Y, Z)**, et les trois coordonnées angulaires **Ψ_i, θ_i** et **φ_i** localisant l'orientation angulaire du transducteur linéaire **TT** par rapport à trois directions orthogonales, éventuellement parallèles aux directions dudit repère
15 orthonormé **(X, Y, Z)**.

Sur la figure **1b**, le transducteur linéaire **TT** est déplacé en une autre position **P_j**, différente de la position **P_i**. On comprendra que le transducteur linéaire **TT** est déplaçable en un nombre **m** de positions parmi la pluralité de positions **{P₁, P₂, ..., P_m}**. Selon les applications faites d'un mode de réalisation de la présente invention,
20 le nombre **m** de positions peut être choisi entre 1 et 10000, et est de préférence égal à 100. Par exemple, le transducteur linéaire **TT** peut être déplacé en rotation sur un intervalle de 180°. La précision obtenue d'une mesure effectuée sur cet intervalle sera donc égal à 180° divisé par la valeur de **m**.

25

Selon un mode de réalisation de l'invention, les éléments transducteurs **{T₁, T₂, ..., T_n}** sont configurés pour être simultanément émetteurs et récepteurs de signaux.

Selon un mode de réalisation de l'invention, chacun des éléments
30 transducteurs **{T₁, T₂, ..., T_n}** est configuré pour émettre un faisceau élémentaire et recevoir un signal d'écho ou un bruit de structure. Plusieurs transducteurs linéaires peuvent être utilisés simultanément. En outre, les éléments transducteurs d'au moins un transducteur linéaire **TT** peuvent être utilisés en tant qu'émetteurs, tandis que des

éléments transducteurs d'au moins un autre transducteur linéaire peuvent être utilisés pour mesurer des signaux d'écho ou des bruits de structure.

En variante, différentes configurations peuvent être utilisées pour la mise en œuvre d'un mode de réalisation de l'invention : une configuration en transmission pour laquelle un transducteur émetteur et un transducteur récepteur sont placés de part et d'autre de la pièce **P** à contrôler ; une configuration en mode tandem pour laquelle un transducteur émetteur et un transducteur récepteur sont placés l'un devant l'autre, ou encore une configuration pour laquelle un transducteur linéaire émetteur et un transducteur linéaire récepteur sont disposés côte à côte et en regard d'une surface **S** de la pièce **P**.

Ainsi, les éléments transducteurs peuvent mesurer, en une position choisie parmi une pluralité de positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, un signal d'écho donné parmi une pluralité de signaux $\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ d'écho, et/ou un bruit de structure parmi une pluralité de bruits $\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ de structure. Les signaux $\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ d'écho mesurés définissent des signatures d'un défaut **Df** rencontré par les faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$.

Selon un mode de réalisation de l'invention, la pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires est focalisée pour former une région focale. Sur la **figure 1a**, le transducteur linéaire **TT** est placé en la position **P_i**, et les faisceaux ultrasonores élémentaires émis $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ sont focalisés pour former une région focale **R_i**. Sur la **figure 1b**, le transducteur linéaire **TT** est déplacé en la position **P_j**, et les faisceaux ultrasonores élémentaires émis $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ sont focalisés pour former une région focale **R_j**.

Selon un mode de réalisation de l'invention, la position de chaque région focale peut être modifiée en focalisant chaque faisceau élémentaire en une position de focalisation, et selon une orientation choisie. Pour ce faire, une focalisation précise des faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ peut être obtenue en soumettant chaque élément transducteur du transducteur linéaire **TT** à un signal électrique retardé par rapport aux autres éléments piézoélectriques.

Selon un mode de réalisation de l'invention, la focalisation de chaque faisceau ultrasonore élémentaires peut être modifiée en modifiant la loi de retard appliquée à chacun des éléments transducteurs.

Ainsi, l'application de différents lois de retard aux signaux électriques appliqués aux éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ permet de réaliser un contrôle en profondeur de la pièce **P**. Cette mise en forme dynamique du faisceau ultrasonore permet de modifier les caractéristiques du faisceau ultrasonore émis par chaque élément transducteur, et donc de réaliser précisément la focalisation du faisceau en une région focale R_i correspondant à la position P_i du transducteur linéaire **TT**.

Par déplacement du transducteur linéaire **TT** parmi la pluralité de positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, il est ainsi possible de former une pluralité de régions focales $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ à l'intérieur desquelles la présence d'une microstructure **M** allongée peut être déterminée, ou encore la présence d'un défaut **Df** de la pièce **P**.

Sur la figure **2a**, un transducteur linéaire **TT** comprenant n éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, par exemple 16 éléments transducteurs, est déplacé en une position P_k . Les faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ forment une région focale R_k qui comprend un défaut **Df** situé sous la surface **S** de la pièce **P**.

Selon un mode de réalisation de l'invention, chacun des éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ est configuré pour recevoir et mesurer un signal d'écho résultant de la rétrodiffusion d'un faisceau ultrasonore élémentaire par un défaut **Df** situé sous une surface **S** de la pièce **P**. Par exemple, suivant l'émission d'un faisceau ultrasonore élémentaire F_1 , l'élément transducteur T_1 mesure un signal E_1 d'écho résultant de la rétrodiffusion dudit faisceau ultrasonore élémentaire F_1 avec le défaut **Df**. De même, suivant l'émission d'un faisceau ultrasonore élémentaire F_{16} tel qu'illustré, l'élément transducteur T_{16} mesure un signal E_{16} d'écho résultant de la rétrodiffusion de F_{16} avec le défaut **Df**.

Sur la figure **2b**, le transducteur linéaire **TT** est déplacé en une position P_j . Les faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ forment une région focale R_j qui comprend une partie de la microstructure **M** allongée située sous la surface **S** de la pièce **P**.

Selon un mode de réalisation de l'invention, chacun des éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ est configuré pour recevoir et mesurer un bruit de structure résultant de la rétrodiffusion d'un faisceau ultrasonore élémentaire par une microstructure **M** allongée située sous la surface **S** de la pièce **P**. Successivement à l'émission d'un faisceau ultrasonore élémentaire **F₁**, l'élément transducteur **T₁** mesure un bruit **B₁** de structure résultant de la rétrodiffusion dudit faisceau ultrasonore élémentaire **F₁** avec la microstructure **M** allongée. De même, suivant l'émission d'un faisceau ultrasonore élémentaire **F₁₆** tel qu'illustré, l'élément transducteur **T₁₆** mesure un bruit **B₁₆** de structure résultant de la rétrodiffusion de **F₁₆** avec la microstructure **M** allongée.

En référence à la **figure 3**, on décrit ici les étapes d'un procédé de contrôle non-destructif d'une pièce **P** comprenant une microstructure **M** allongée selon un mode de réalisation de l'invention.

Ledit procédé de contrôle comprend une étape **E_{Ai}**, dite étape de déplacement en une position **P_i** de coordonnées $(X_i, Y_i, Z_i, \Psi_i, \theta_i, \phi_i)$ choisie parmi la pluralité de positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ où le transducteur linéaire **TT** est déplacé.

Lorsque le transducteur linéaire **TT** est déplacé en la position **P_i**, le procédé de contrôle met en œuvre une étape **E_{Bi}**, dite étape d'émission en la position **P_i**, au cours de laquelle chacun des éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ émet un faisceau ultrasonore élémentaire en direction de la surface **S**.

Successivement à l'étape **E_{Bi}**, le procédé de contrôle met en œuvre une étape **E_{Ci}**, dite étape de mesure en la position **P_i**, au cours de laquelle chacun des éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ mesure un signal **E_i** d'écho et/ou un bruit **B_i** de structure.

Successivement à l'étape **E_{Ci}**, le procédé de contrôle met en œuvre une étape **E_{Aj}**, dite étape de déplacement en la position **P_j**, au cours de laquelle le transducteur **TT** est déplacé depuis la position **P_i** jusqu'en la position **P_j**, de coordonnées $(X_j, Y_j, Z_j, \Psi_j, \theta_j, \phi_j)$. Cette position **P_j** est choisie parmi la pluralité de positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, et diffère de la position **P_i** en ce qu'au moins l'une des coordonnées $(X_j, Y_j, Z_j, \Psi_j, \theta_j, \phi_j)$ de la position **P_j** diffère de l'une des coordonnées $(X_i, Y_i, Z_i, \Psi_i, \theta_i, \phi_i)$ de la position **P_i**. Par exemple, l'étape **E_{Aj}** peut consister à déplacer le transducteur linéaire **TT** selon la direction **X** par rapport à la position **P_i**. En variante, ladite étape **E_{Aj}** peut consister à tourner le transducteur linéaire **TT** d'un

angle Ψ , θ , ou φ par rapport à l'orientation du transducteur linéaire **TT** en la position **P_i**.

Lorsque le transducteur linéaire **TT** est déplacé en la position **P_j**, le procédé de contrôle met en œuvre une étape **EB_j**, dite étape d'émission en la position **P_j**, au cours de laquelle chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs **{T₁, T₂, ..., T_n}** émet à nouveau un faisceau ultrasonore élémentaire en direction de la surface **S**.

Successivement à l'étape **EB_j**, le procédé de contrôle met en œuvre une étape **EC_j**, dite étape de mesure en la position **P_j**, au cours de laquelle chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs **{T₁, T₂, ..., T_n}** mesure un signal **E_j** d'écho et/ou un bruit **B_j** de structure.

Au terme de l'étape **EC_j**, le procédé de contrôle a ainsi permis de mesurer un signal **E_i** d'écho et/ou un bruit **B_i** de structure en la position **P_i** et un signal **E_j** d'écho et/ou un bruit **B_j** de structure en la position **P_j**.

Successivement à l'étape **EC_j**, le procédé de contrôle met en œuvre une étape **ED_{ij}**, dite étape de comparaison entre la position **P_i** et la position **P_j**, pour comparer les amplitudes **B_i** et **B_j** des bruits de structure mesurés respectivement lors des étapes **EC_i** et **EC_j**.

Si l'amplitude du bruit de structure **B_j** est supérieure à l'amplitude du bruit de structure **B_i**, le procédé de contrôle remet en œuvre, successivement, les étapes **EA_j**, **EB_j**, **EC_j** et **ED_{ij}**.

Si l'amplitude du bruit de structure **B_j** est strictement inférieure à l'amplitude du bruit de structure **B_i**, le procédé de contrôle détermine, en la position du transducteur linéaire **TT**, une direction **D** d'allongement de la microstructure **M** allongée. Ainsi, en analysant les signaux reçus par le transducteur linéaire **TT**, le procédé de contrôle permet de déterminer une direction **D** d'allongement d'une microstructure **M** allongée dans une pièce **P**, en identifiant les positions pour lesquelles l'amplitude du bruit de structure est minimale.

Selon un mode de réalisation de l'invention, la pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires **{F₁, F₂, ..., F_n}** émise en chacune de la pluralité de positions **{P₁, P₂, ..., P_m}** est focalisée pour former une région focale **{R₁, R₂, ..., R_m}**.

De manière surprenante, les inventeurs ont montré que le bruit de structure rétrodiffusé par une microstructure **M** allongée dans une pièce **P** est anisotrope. Il en

découle que l'amplitude des signaux de bruits de structure mesurés par un transducteur linéaire **TT** en déplacement dans un plan orthogonal à la direction de la microstructure **M** allongée est beaucoup plus fluctuante que l'amplitude de signaux de bruits de structure mesurés par ce même transducteur linéaire **TT** en
5 déplacement dans un plan contenant ladite direction de la microstructure **M** allongée.

Ainsi, la meilleure approximation d'une direction **D** d'allongement de la microstructure **M** allongée est déterminée comme étant parallèle à la direction principale **O** du transducteur linéaire **TT** lorsque l'amplitude du bruit de structure
10 mesuré est minimale sur l'ensemble des positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ en lesquelles ledit transducteur linéaire **TT** est déplacé. Selon un mode de réalisation de l'invention, la direction principale **O** peut être parallèle à la direction longitudinale **X** d'un référentiel (X, Y, Z) dont l'origine est située sur le transducteur linéaire **TT**.

15 Les figures **4a**, **4b**, **5a** et **5b** illustrent la mise en œuvre de l'étape **EDij** pour déterminer une direction **D** d'allongement d'une microstructure **M** allongée dans la pièce **P**. Cette direction **D** d'allongement est déterminée lorsqu'une amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits $\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ de structure mesurés est minimale en une position parmi la pluralité de positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$. Ladite direction **D**
20 d'allongement peut être déterminée de manière approximative, ou encore de manière itérative, en mettant œuvre les étapes **EAj**, **EBj**, **ECj** et **EDij** autant de fois que souhaité en déplaçant le transducteur linéaire **TT** parmi la pluralité de positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$.

25 La **figure 4a** représente un transducteur linéaire **TT** déplacé en une première position **P_i** selon un mode de réalisation de l'invention. En particulier, le transducteur linéaire **TT** et la pluralité d'éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ est déplacée dans un plan parallèle au plan **XY** et passant par la première position **P_i**. Cette première position **P_i** se situe à la verticale d'une microstructure **M** allongée dans une pièce **P**.
30 La direction principale **O** dudit transducteur linéaire **TT** n'est pas parallèle à la direction **D** d'allongement de la microstructure **M** allongée en la première position **P_i**. Un angle θ_i définissant l'angle entre la direction principale **O** et la direction **D** d'allongement en la première position **P_i** est donc non-nul.

La **figure 4b** représente l'évolution de l'amplitude **A** d'un premier bruit **B_i** de structure au cours du temps **T**, ledit premier bruit **B_i** de structure étant la somme des bruits de structure mesurés par chacun de la pluralité d'éléments transducteurs **{T₁, T₂, ..., T_n}** lorsque le transducteur linéaire **TT** est déplacé en ladite première position **P_i**. L'amplitude dudit premier bruit **B_i** de structure mesuré est égale à **A_i**.

Sur la **figure 5a**, le transducteur linéaire **TT** est déplacé en une deuxième position **P_j** selon un mode de réalisation de l'invention. En particulier, le transducteur linéaire **TT** est déplacé dans un plan parallèle au plan **XY** et passant par la deuxième position **P_j**. Cette deuxième position **P_j** se situe à la verticale d'une microstructure **M** allongée dans une pièce **P**. En la position **P_j**, la direction principale **O** du transducteur linéaire **TT** n'est pas parallèle à la direction **D** d'allongement de la microstructure **M** allongée lorsque ledit transducteur linéaire **TT** était déplacé en la première position **P_i**. L'angle **θ_j** définissant l'angle entre ladite direction principale **O** et ladite direction **D** d'allongement en la deuxième position **P_j** est non nul, et cet angle **θ_j** est inférieur à l'angle **θ_i**.

Par conséquent, la direction principale **O** dudit transducteur linéaire **TT** présente un parallélisme plus important avec la direction d'allongement **D** de la microstructure **M** allongée en la deuxième position **P_j** qu'en la première position **P_i**.

La **figure 5b** représente l'évolution de l'amplitude **A** d'un deuxième bruit **B_j** de structure au cours du temps **T**, ledit premier bruit **B_j** de structure étant la somme des bruits de structure mesurés par chacun de la pluralité d'éléments transducteurs **{T₁, T₂, ..., T_n}** lorsque le transducteur linéaire **TT** est déplacé en ladite deuxième position **P_j**. L'amplitude dudit deuxième bruit **B_j** de structure mesuré est égale à **A_j**.

Lorsque l'étape **EDij** est mise en œuvre, le procédé de contrôle selon un mode de réalisation de l'invention compare les deux amplitudes **A_i** et **A_j**. Par comparaison avec la **figure 4b**, ladite amplitude **A_j** est inférieure à l'amplitude **A_i** du premier bruit **B_i** de structure mesuré.

Dans le cas où l'amplitude **A_j** du bruit **B_j** de structure est supérieure ou égale à l'amplitude **A_i** du bruit **B_i** de structure, ce qui correspond à la situation représentée sur les **figures 4a, 4b, 5a et 5b**, la direction principale **O** du transducteur linéaire **TT** déplacé en la deuxième position **P_j** présente un parallélisme plus faible que lorsque

ledit transducteur linéaire **TT** était déplacé en la première position **P_i**. Dans ce cas, le transducteur est déplacé en une nouvelle position parmi la pluralité de positions **{P₁, P₂, ..., P_m}**, par la répétition des étapes successives **EA_j**, **EB_j**, **EC_j** et **ED_{ij}**.

Si l'amplitude **A_j** du bruit **B_j** de structure est inférieure à l'amplitude **A_i** du bruit **B_i** de structure, il en découle que la direction principale **O** du transducteur linéaire **TT** en la deuxième position **P_j** présente un parallélisme plus grand que lorsque ledit transducteur linéaire **TT** était déplacé en la première position **P_i**. Dans ce cas, la direction principale **O** du transducteur linéaire **TT** fournit une bonne approximation d'une direction **D** d'allongement de la microstructure **M** allongée.

Sur base de la réalisation de l'étape **ED_{ij}**, des déplacements du transducteur linéaire **TT** jusqu'en une position où l'amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits **{B₁, B₂, ..., B_m}** de structure mesurés est minimale permet d'aligner la direction principale **O** dudit transducteur linéaire **TT** avec une direction **D** d'allongement de la microstructure **M** allongée. La connaissance de la direction principale **O** dudit transducteur linéaire **TT** permet alors d'en déduire la direction **D** d'allongement de la microstructure **M** allongée.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le transducteur linéaire **TT** est déplacé uniquement en translation selon des positions choisies parmi la pluralité de positions **{P₁, P₂, ..., P_m}** jusqu'en une position optimale où l'amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits **{B₁, B₂, ..., B_m}** de structure mesurés est minimale. Le transducteur linéaire **TT** est ensuite déplacé uniquement en rotation, par exemple sur un intervalle de 180°, jusqu'à ce que l'amplitude du bruit de structure mesuré soit minimale.

Les **figures 6a**, **6b** et **6c** représentent des vues en section d'un transducteur linéaire **TT** utilisé pour mettre en œuvre un mode de réalisation de l'invention.

La **figure 6a** est une vue en section dudit transducteur linéaire **TT** dans un plan **XY**. Ce transducteur linéaire **TT** peut être utilisé dans un dispositif de contrôle pour mettre en œuvre l'invention, et comprend par exemple 16 éléments transducteurs **{T₁, T₂, ..., T₁₆}** disposés le long de la direction principale **O**.

Selon un mode de réalisation de l'invention, chacun des éléments transducteurs présente une forme rectangulaire comprenant une grande dimension **a** et une petite dimension **b**, lesdits éléments transducteurs étant disposés de manière contiguë les uns aux autres le long de la grande dimension **a**.

5

Sur la **figure 6a**, la grande dimension **a** et la petite dimension **b** sont, respectivement, la longueur et la largeur de chaque élément transducteur dans le plan **XY**. Le transducteur linéaire **TT**, comprenant 16 éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_{16}\}$, présente donc également une forme rectangulaire, avec une longueur **La** et une largeur **Lb**. En particulier, la longueur **La** est la longueur du plus grand côté du transducteur linéaire **TT** dans le plan **XY**, et la largeur **Lb** est la longueur du plus petit côté du transducteur linéaire **TT** dans le plan **XY**.

10

Selon un mode de réalisation de l'invention, la grande dimension **a** et la petite dimension **b** de chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ sont égales à **10** mm et à **0.4** mm, respectivement.

15

Un dispositif non rectangulaire, par exemple un dispositif circulaire ou annulaire, ou encore un dispositif mono-éléments comprenant un seul élément transducteur, n'a pas de direction principale. De tels dispositifs sont donc différents du cas d'un transducteur linéaire **TT** présentant une forme rectangulaire est une direction principale **O**. Un dispositif non rectangulaire ou mono-éléments ne permet pas de déterminer la direction d'une microstructure **M** allongée dans une pièce **P**.

20

La **figure 6b** est une vue en section du transducteur linéaire **TT** dans un plan **XZ**. La **figure 6c** est une vue en section du transducteur linéaire **TT** dans un plan **YZ**, sur laquelle sont uniquement visibles l'élément transducteur **T₁₆** et une lentille de préfocalisation **L₁₆** disposée en contact avec l'élément transducteur **T₁₆**.

25

Selon un mode de réalisation de l'invention, chacun des éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_{16}\}$ comprend une lentille de préfocalisation disposée le long d'une grande dimension **a**. On comprendra qu'une lentille de préfocalisation parmi une pluralité de lentilles de préfocalisation $\{L_1, L_2, \dots, L_{16}\}$ est ainsi disposée

30

sous chaque élément transducteur parmi la pluralité d'éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_{16}\}$.

Selon un mode de réalisation, chaque lentille de préfocalisation permet de focaliser un faisceau ultrasonore élémentaire parmi ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ pour former une région focale $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ située sous une surface **S** de la pièce **P**.

En référence à la **figure 7**, l'invention vise également un dispositif **DD** de contrôle non-destructif d'une pièce **P** comprenant une microstructure **M** allongée.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le dispositif **DD** comprend :

- des moyens de déplacement **MA**, comprenant par exemple un bras robotique ou un support mobile sur lequel est disposé un transducteur linéaire **TT**, et configurés pour mettre en œuvre les étapes **EAI** et **EAJ** ;
- des moyens **MB** d'émission d'une pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, comprenant par exemple des éléments transducteurs ou des capteurs piézoélectriques, et configurés pour mettre en œuvre les étapes **EBi** et **EBj** ;
- des moyens **MC** de mesure d'un signal **E_i** d'écho et/ou d'un bruit **B_i** de structure, comprenant par exemple lesdits éléments transducteurs ou lesdits capteurs piézoélectriques des moyens **MB** d'émission, et configurés pour mettre en œuvre les étapes **ECi** et **ECj** ;
- des moyens **MD** de détermination d'une direction **D** d'allongement d'une microstructure **M** allongée, comprenant par exemple un système de traitement de l'information un périphérique, un micro-ordinateur, un poste de travail ou encore un terminal mobile de télécommunication, et configurés pour mettre en œuvre l'étape **EDij**.

Selon un mode de réalisation de l'invention, les moyens **MD** de détermination sont configurés pour traiter les signaux détectés par chacun des éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, et pour comparer ces signaux détectés avec d'autres signaux, ou des signaux de référence.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le dispositif **DD** comprend en outre des moyens **ME** de focalisation, comprenant par exemple une pluralité de lentilles de préfocalisation pour focaliser une pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$. Lesdits faisceaux ultrasonores élémentaires sont émis
5 par les éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ en chacune de la pluralité de positions $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$.

Selon un mode de réalisation de l'invention, lesdits moyens **ME** de préfocalisation sont configurés pour former une région focale $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ sous
10 une surface **S** de la pièce **P**.

La **figure 8** est une vue en perspective d'un transducteur linéaire **TT** utilisé pour mettre en œuvre un mode de réalisation de l'invention. Ledit transducteur linéaire **TT** peut être déplacé dans l'espace et autour de la pièce **P** à l'aide de
15 moyens **MA** de déplacement, par exemple un support mobile ou un bras robotique.

Selon un mode de réalisation de l'invention, les moyens de déplacement **MA** sont configurés pour déplacer le transducteur linéaire **TT** en translation le long de trois axes orthogonaux **X**, **Y** et **Z** et en rotation autour de trois axes orthogonaux **A ψ** , **A θ** et **A ϕ** . On comprendra que les axes orthogonaux **X**, **Y** et **Z** peuvent correspondre
20 aux directions d'un référentiel (**X**, **Y**, **Z**) dont l'origine est située sur le transducteur linéaire **TT**.

Selon un mode de réalisation de l'invention, les trois axes orthogonaux **A ψ** , **A θ** et **A ϕ** sont parallèles aux trois axes orthogonaux **X**, **Y** et **Z**.

Selon un mode de réalisation de l'invention, les moyens de déplacement **MA**
25 peuvent comprendre des moyens de codage en coordonnées cartésiennes, en coordonnées polaires et/ou en coordonnées sphériques.

De manière non limitative, l'homme de métier comprendra que les modes de réalisation de l'invention peuvent également être appliqués dans le domaine médical
30 pour le contrôle d'organes ou de tissus, par exemple des tissus mous, pouvant s'assimiler à une pièce **P** comprenant une microstructure **M** allongée.

Revendications

1. Procédé de contrôle non-destructif d'une pièce (P) comprenant une
5 microstructure (M) allongée, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il
comporte les étapes suivantes :
- a) déplacement d'un transducteur linéaire (TT) en une pluralité de positions
($\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$) situées en regard d'une surface (S) de ladite pièce, ledit
transducteur linéaire comprenant une pluralité d'éléments transducteurs
10 ($\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$) alignés le long d'une direction principale (O) dudit
transducteur linéaire ;
- b) émission d'une pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires ($\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$), chacun de ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires étant
émis par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs en direction de
15 ladite surface ;
- c) mesure d'une pluralité de signaux ($\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$) d'écho et d'une pluralité
de bruits ($\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$) de structure, chacun de ladite pluralité de
signaux d'écho et chacun de ladite pluralité de bruits de structure étant
mesurés par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs, chacun
20 desdits signaux d'écho résultant de la rétrodiffusion des faisceaux
ultrasonores élémentaires par un défaut (Df) sous la surface de la pièce, et
chacun desdits bruits de structure résultant de la rétrodiffusion des
faisceaux ultrasonores élémentaires par ladite microstructure allongée ;
- d) détermination d'une direction (D) d'allongement de la microstructure
allongée lorsqu'une amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits de
25 structure mesurés est minimale selon ladite pluralité de positions.
2. Procédé de contrôle selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite
30 pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires ($\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$) émise en
chacune de la pluralité de positions ($\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$) est focalisée pour former
une région focale ($\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$).

3. Procédé de contrôle selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que ladite direction (D) d'allongement de la microstructure (M) allongée est déterminée selon une direction parallèle à ladite direction principale (O).

5

4. Système de contrôle non-destructif d'une pièce (P) comprenant une microstructure (M) allongée, ledit système étant caractérisé en ce qu'il comporte :

10

- un transducteur linéaire (TT), ledit transducteur linéaire comprenant une pluralité d'éléments transducteurs ($\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$) alignés le long d'une direction principale (O) dudit transducteur linéaire, chaque élément transducteur de ladite pluralité d'éléments transducteurs étant apte à émettre un faisceau ultrasonore ;

15

- un dispositif de contrôle comportant :

20

- des moyens (MA) de déplacement du transducteur linéaire (TT) en une pluralité de positions ($\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$) situées en regard d'une surface (S) de ladite pièce ;
- des moyens (MB) d'émission d'une pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires ($\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$), chacun de ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires étant émis par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs en direction de ladite surface ;

25

- des moyens (MC) de mesure d'une pluralité de signaux ($\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$) d'écho et d'une pluralité de bruits ($\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$) de structure, chacun de ladite pluralité de signaux d'écho et chacun de ladite pluralité de bruits de structure étant mesurés par chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs, chacun desdits signaux d'écho résultant de la rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par un défaut (Df) sous la surface de la pièce, et chacun desdits bruits de structure résultant de la rétrodiffusion des faisceaux ultrasonores élémentaires par ladite microstructure allongée ; et

30

- des moyens (MD) de détermination d'une direction (D) d'allongement de la microstructure allongée lorsqu'une amplitude de l'un parmi la pluralité des bruits de structure mesurés est minimale selon ladite pluralité de positions.

5

5. Système de contrôle selon la revendication 4, caractérisé en ce que chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs ($\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$) présente une forme sensiblement rectangulaire comprenant une grande dimension (a) et une petite dimension (b), lesdits éléments transducteurs étant disposés de manière contiguë les uns par rapport aux autres le long de la grande dimension (a).
- 10
6. Système de contrôle selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce que lesdits moyens (MB) d'émission comprennent des moyens (ME) de focalisation pour focaliser ladite pluralité de faisceaux ultrasonores élémentaires ($\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$) émise en chacune de la pluralité de positions ($\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$) pour former une région focale ($\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$).
- 15
7. Système de contrôle selon la revendication 6, dans lequel chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs ($\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$) comprend une lentille de préfocalisation disposée le long de la grande dimension (a).
- 20
8. Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que lesdits moyens de déplacement (MA) sont configurés pour déplacer ledit transducteur linéaire (TT) en translation le long de trois axes orthogonaux ($\{X, Y, Z\}$) et en rotation autour de trois axes orthogonaux ($\{A\psi, A\theta, A\phi\}$).
- 25
- 30

9. Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la fréquence d'émission de chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs est supérieure ou égale à 1 MHz et inférieure ou égale à 20 MHz.

5

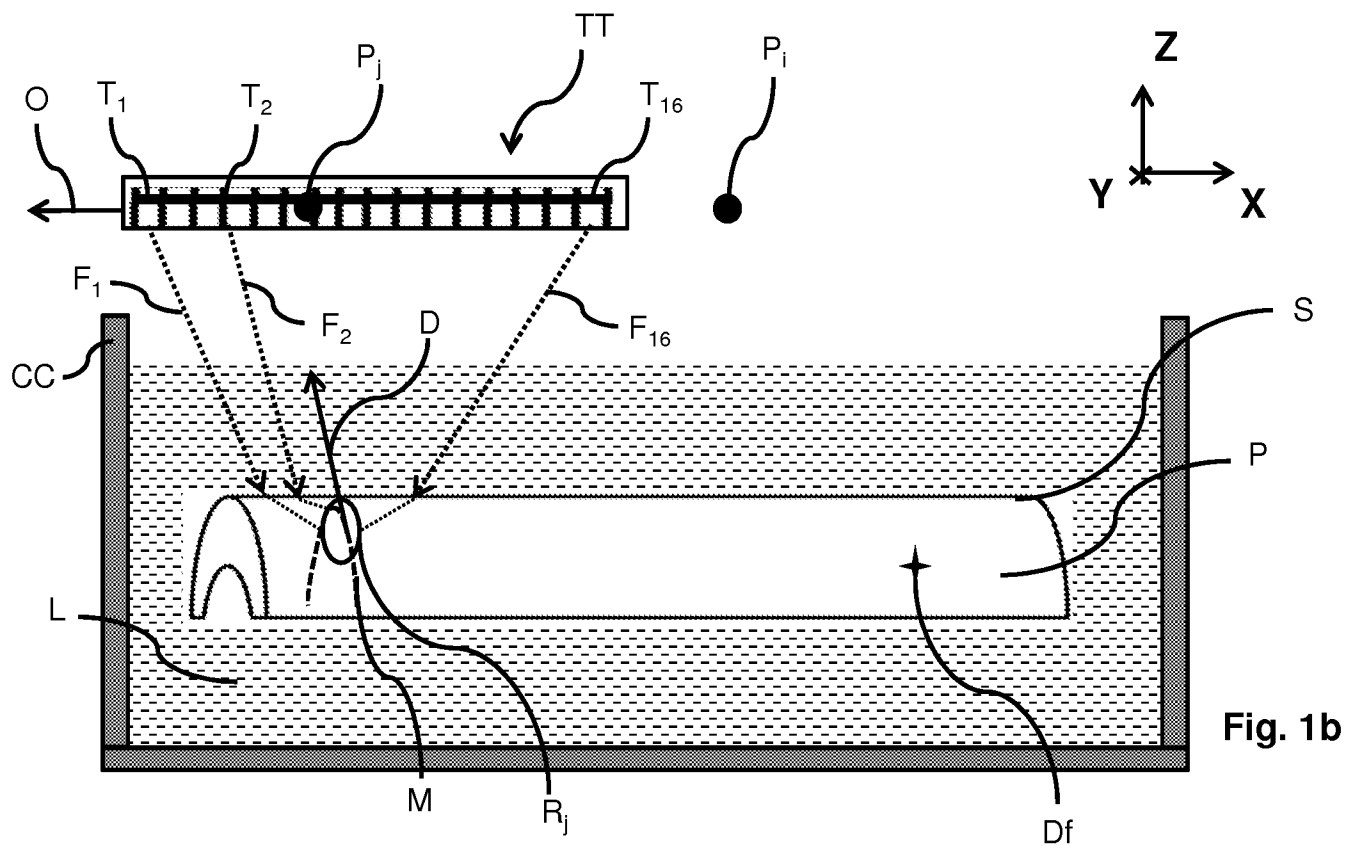
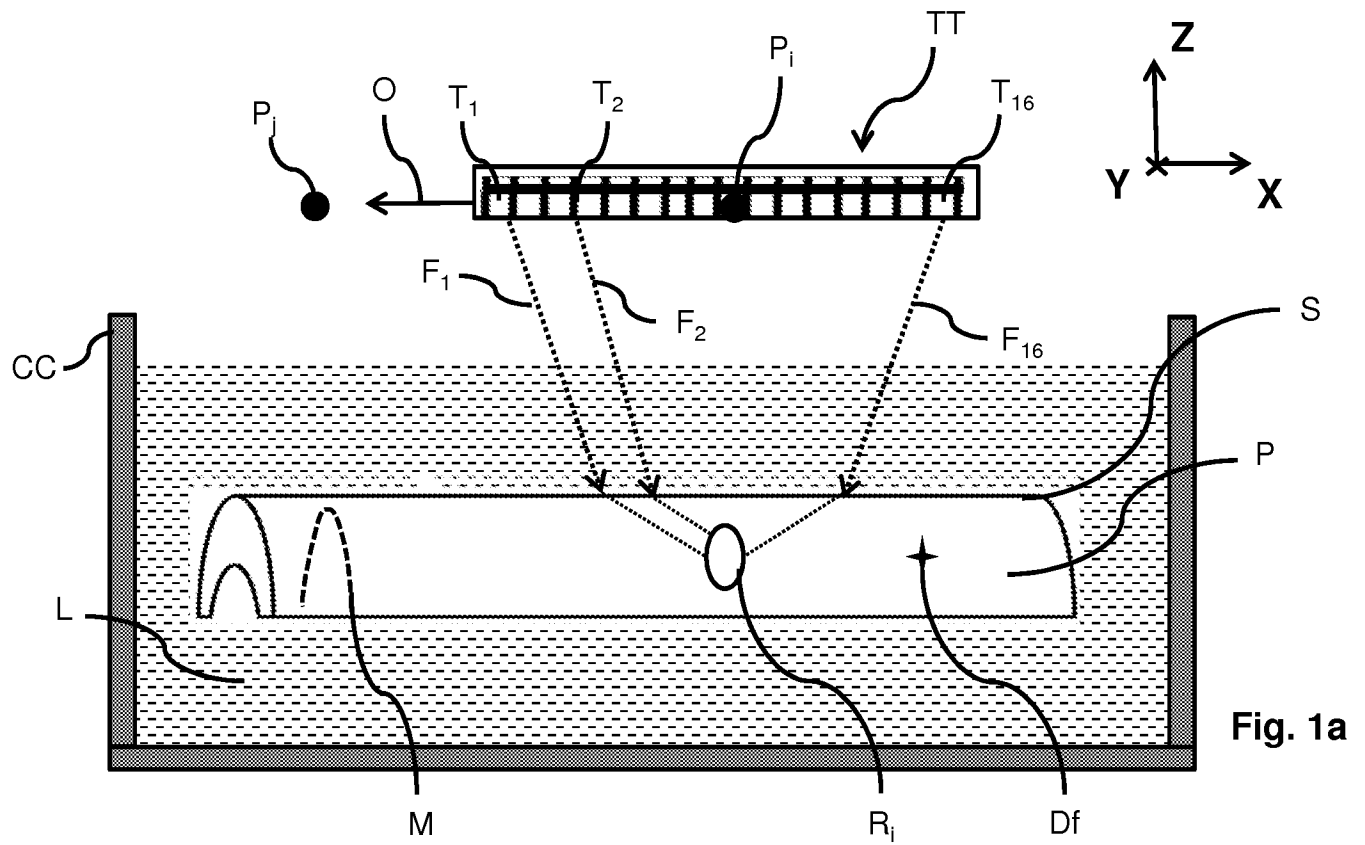
10. Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le nombre d'éléments transducteurs est choisi parmi : 16, 64, 96, ou 128.

10

11. Système de contrôle selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la grande dimension (a) et la petite dimension (b) de chacun de ladite pluralité d'éléments transducteurs $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ sont égales à 10 mm et à 0.4 mm, respectivement.

15

1/6



2/6

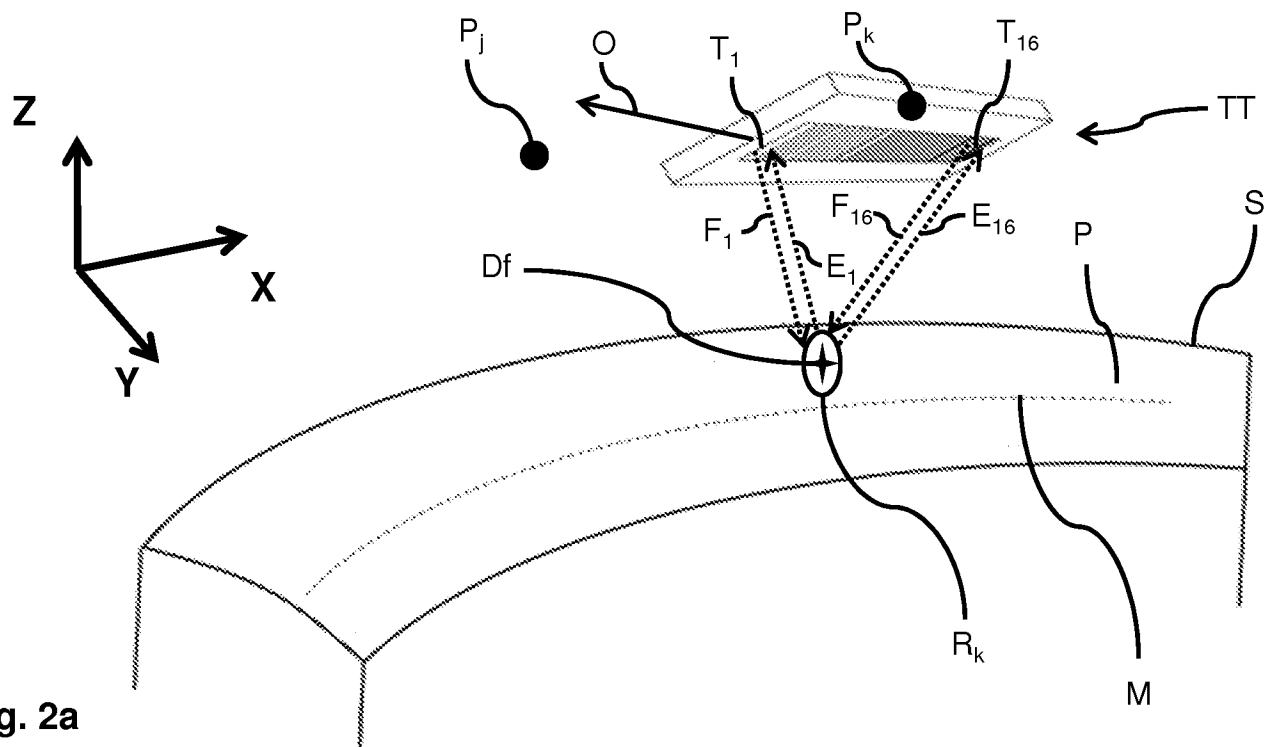


Fig. 2a

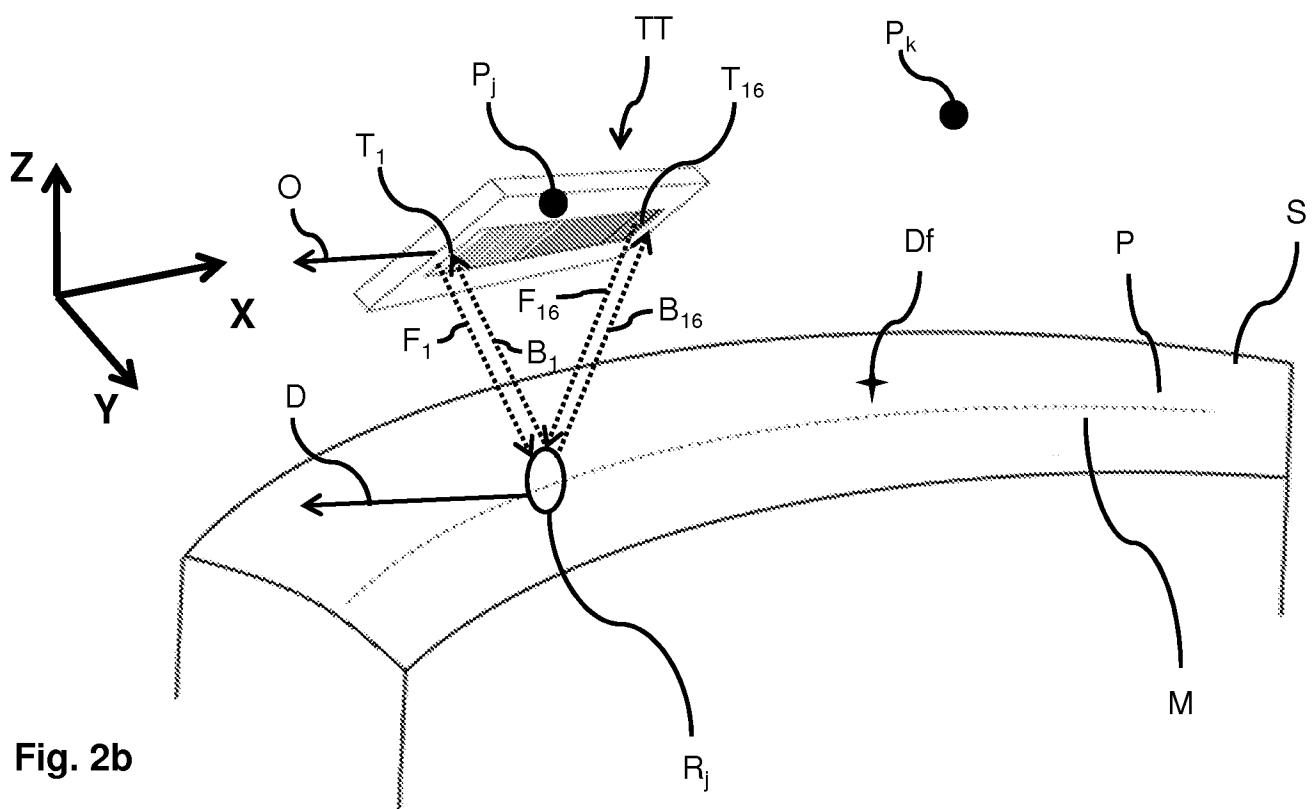


Fig. 2b

3/6

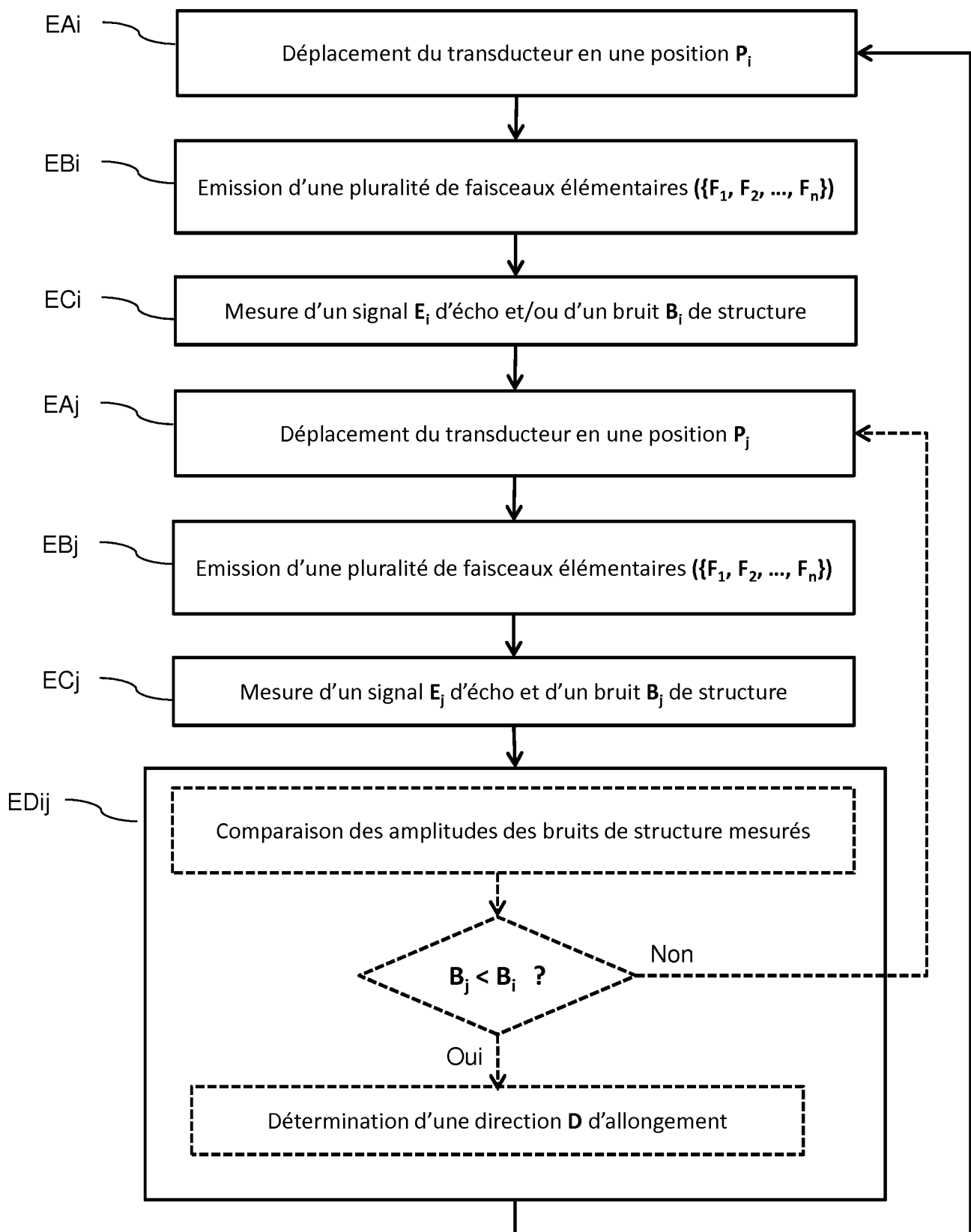
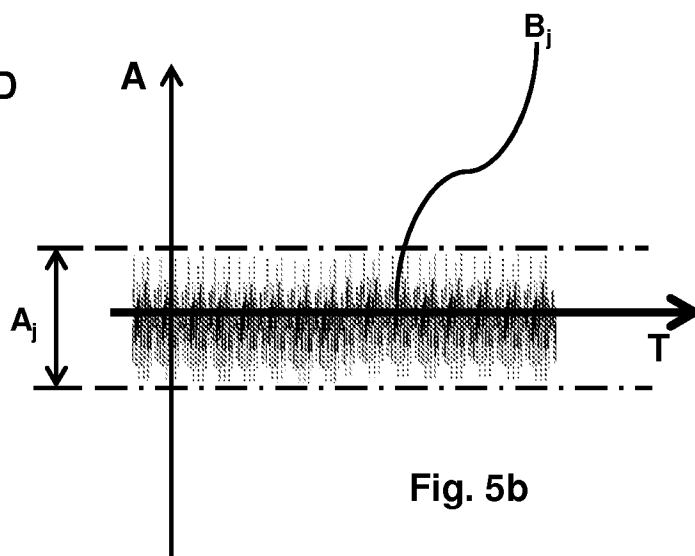
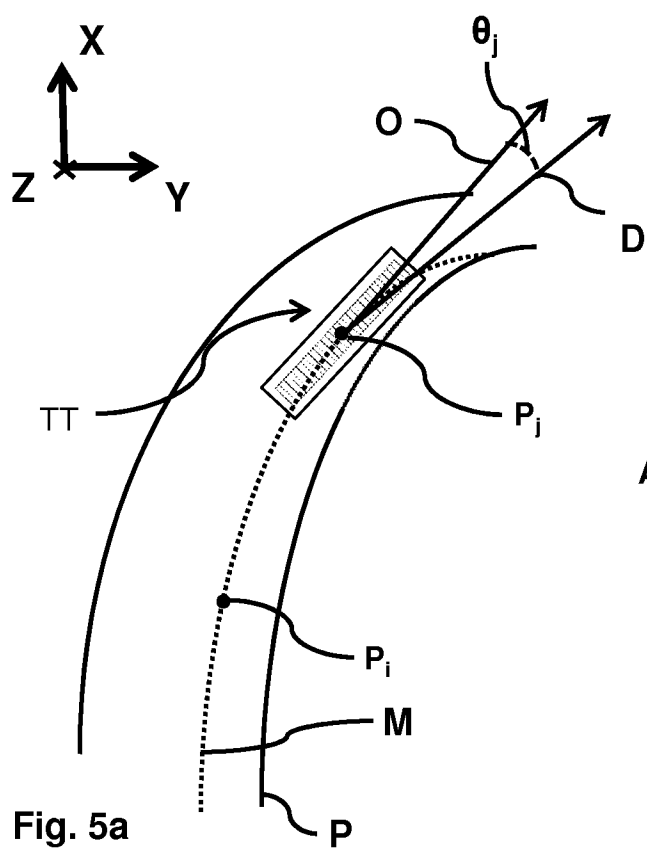
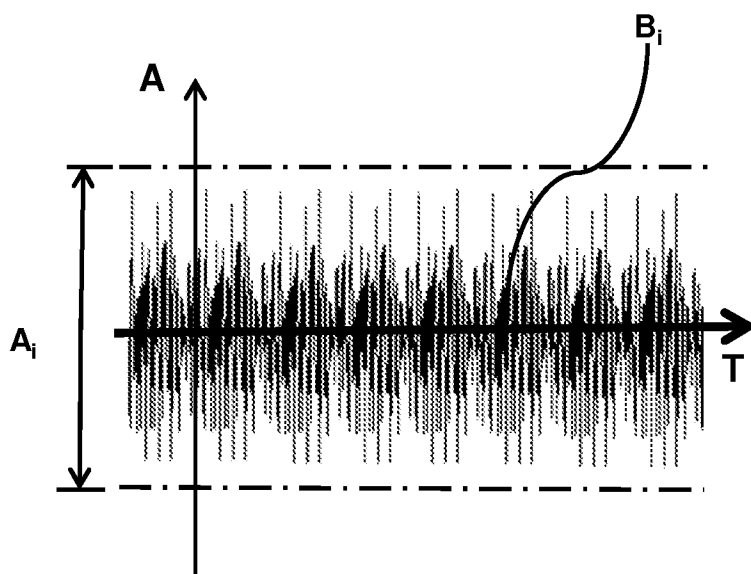
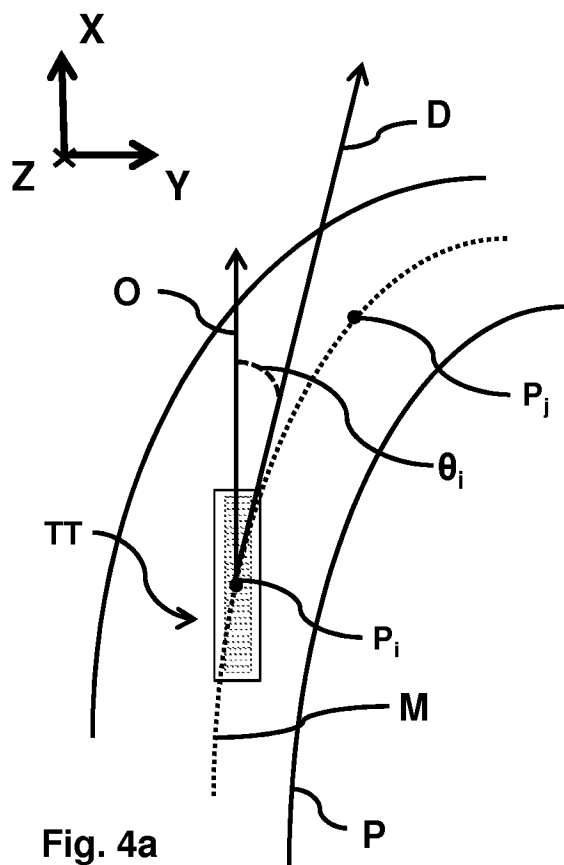
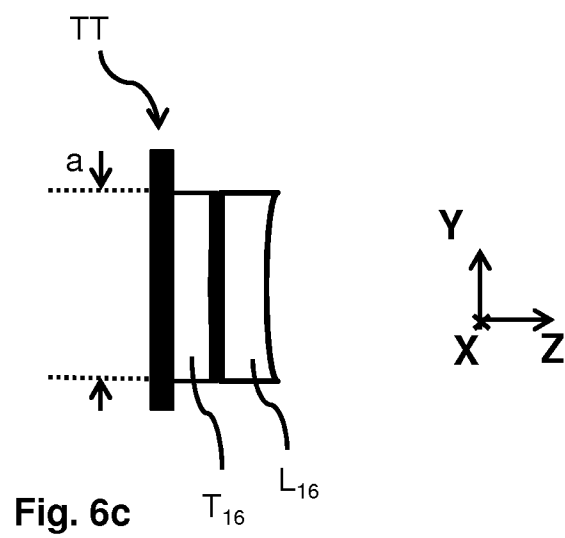
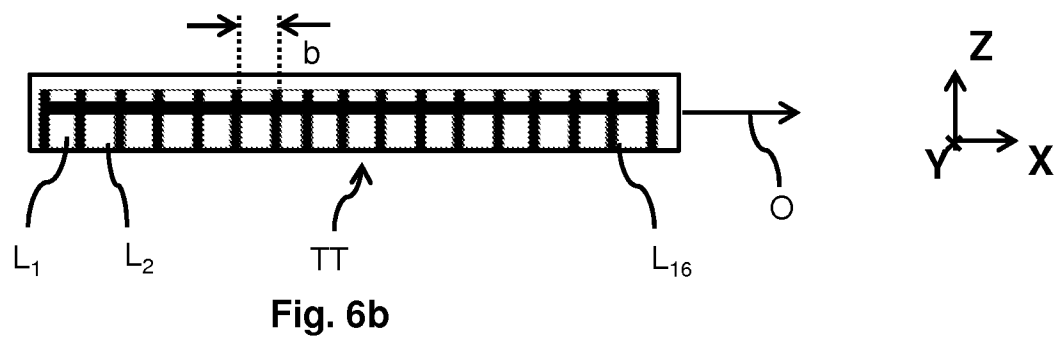
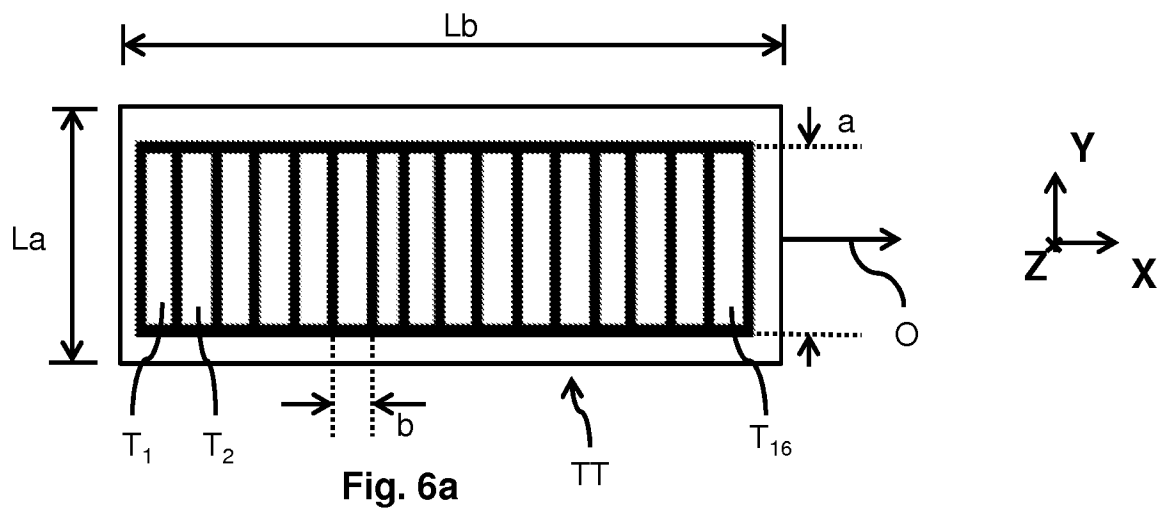


Fig. 3

4/6



5/6



6/6

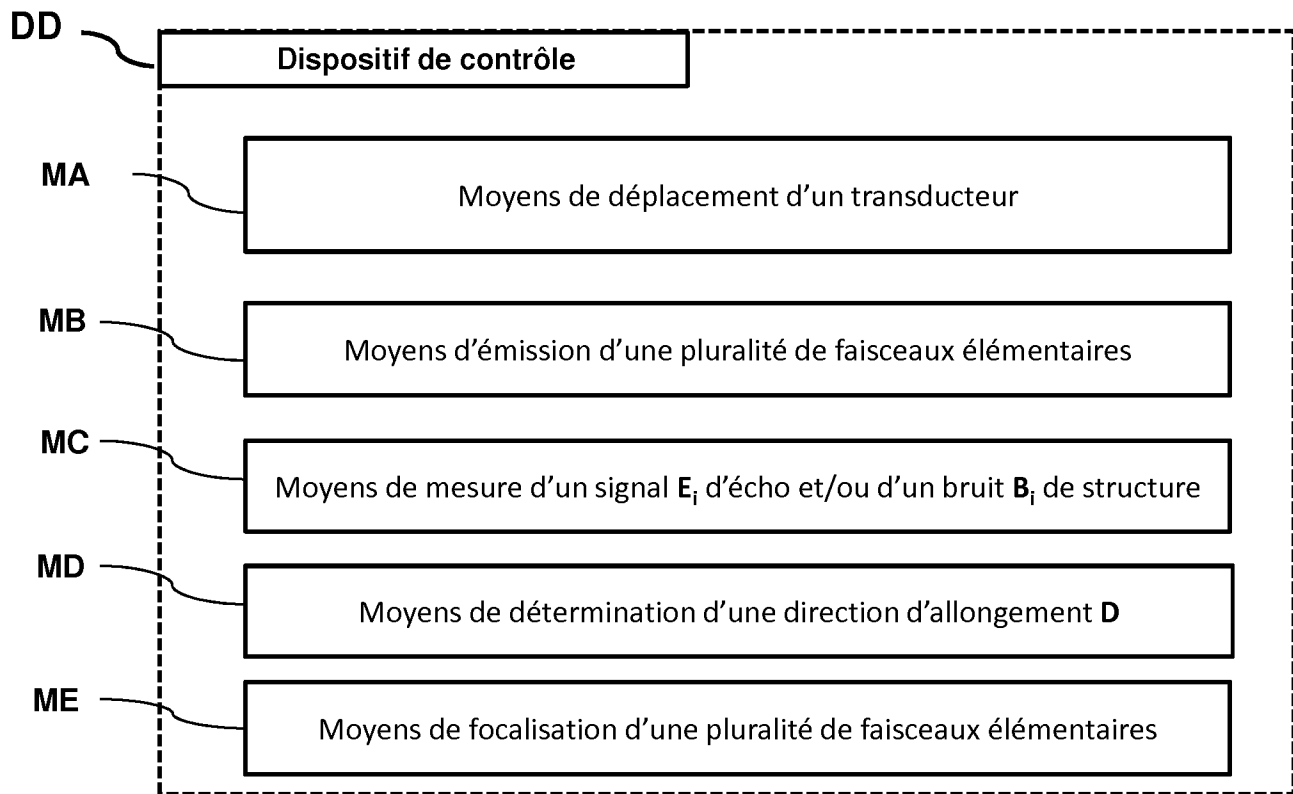


Fig. 7

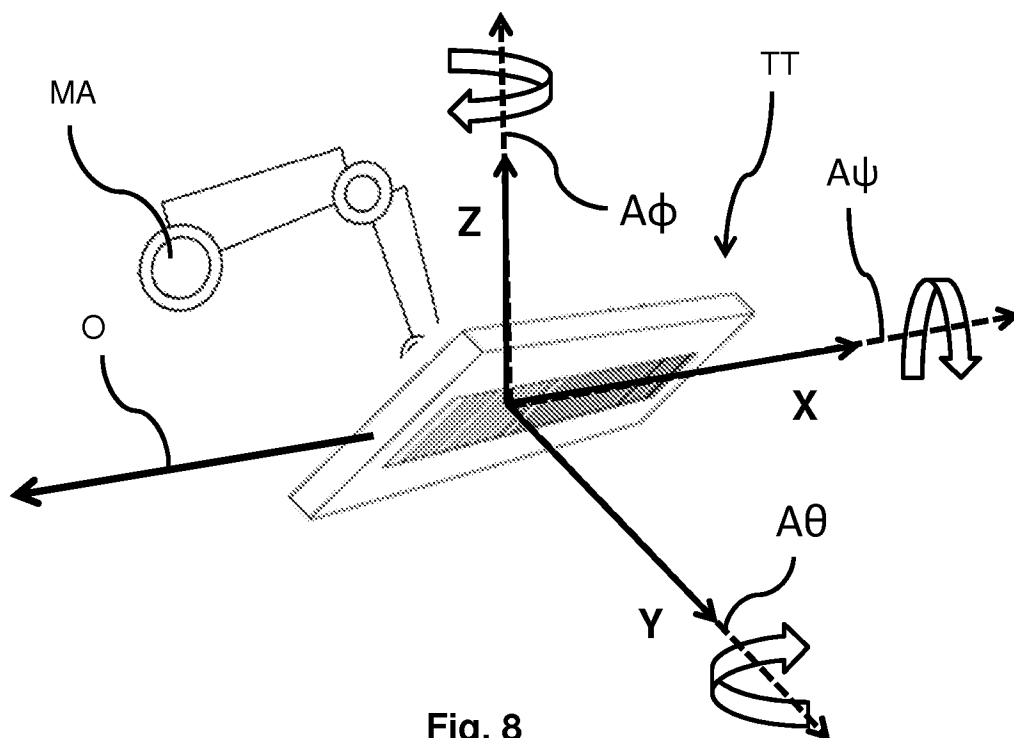


Fig. 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2018/050154

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
INV.	G01N29/04	G01N29/11 G01N29/22 G01N29/24 G01N29/265
	G01N29/48	
ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
G01N G01S		
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.
X	WO 2005/068995 A1 (ROENTGEN TECH DIENST BV [NL]; UNIV DELFT TECH [NL]; POERTZGEN NIELS [N] 28 July 2005 (2005-07-28)	4,5,9-11
Y	abstract; figure 3a page 7, line 1 - page 10, line 17; figures 1-2	6,7
X	US 9 488 573 B2 (EDWARDS DAVID JOHN [GB] ET AL) 8 November 2016 (2016-11-08) abstract; figure 1 column 6, line 50 - column 8, line 29; figure 1 column 16, line 46 - column 20, line 31; figure 7	4-11
	----- -/--	
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents : "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report
20 March 2018		29/03/2018
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 Meltaus, Johanna

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2018/050154

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 104 280 455 A (UNIV BEIJING TECHNOLOGY) 14 January 2015 (2015-01-14)	4,5,9-11
Y	paragraph [0006] - paragraph [0022];	6,7
A	figures 1,3	1-3
A	----- LOBKIS O I ET AL: "Ultrasonic backscattering in polycrystals with elongated single phase and duplex microstructures", ULTRASONICS, vol. 52, no. 6, 1 January 2012 (2012-01-01), pages 694-705, XP028923585, ISSN: 0041-624X, DOI: 10.1016/J.ULTRAS.2011.12.002 abstract; figure 8 Chapître 5.1 et la première alinéa du chapître 5.2; page 701 - page 702; figures 7,8	1-3
A	----- THOMPSON R B ET AL: "Scattering of elastic waves in simple and complex polycrystals", WAVE MOTION, NORTH-HOLLAND, AMSTERDAM, NL, vol. 45, no. 5, 1 April 2008 (2008-04-01), pages 655-674, XP022603837, ISSN: 0165-2125, DOI: 10.1016/J.WAVEMOTI.2007.09.008 [retrieved on 2007-10-17] abstract; figure 8 Chapître 5, pages 663-664; page 663 - page 664; figures 6-8	1-3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2018/050154

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2005068995	A1	28-07-2005	AT 450792 T 15-12-2009
		AU 2005204901 A1	28-07-2005
		CA 2553340 A1	28-07-2005
		EP 1709418 A1	11-10-2006
		ES 2337269 T3	22-04-2010
		NL 1025267 C2	19-07-2005
		US 2007277611 A1	06-12-2007
		WO 2005068995 A1	28-07-2005

US 9488573	B2	08-11-2016	CN 103858021 A 11-06-2014
		EP 2758800 A1	30-07-2014
		US 2014224021 A1	14-08-2014
		WO 2013041856 A1	28-03-2013

CN 104280455	A	14-01-2015	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2018/050154

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01N29/04 G01N29/11 G01N29/22 G01N29/24 G01N29/265 G01N29/48 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) G01N G01S		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	WO 2005/068995 A1 (ROENTGEN TECH DIENST BV [NL]; UNIV DELFT TECH [NL]; POERTZGEN NIELS [N] 28 juillet 2005 (2005-07-28) abrégé; figure 3a	4,5,9-11
Y	page 7, ligne 1 - page 10, ligne 17; figures 1-2	6,7
X	----- US 9 488 573 B2 (EDWARDS DAVID JOHN [GB] ET AL) 8 novembre 2016 (2016-11-08) abrégé; figure 1 colonne 6, ligne 50 - colonne 8, ligne 29; figure 1 colonne 16, ligne 46 - colonne 20, ligne 31; figure 7 ----- -/-	4-11
☒ 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 20 mars 2018	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 29/03/2018	
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 Meltaus, Johanna	

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	CN 104 280 455 A (UNIV BEIJING TECHNOLOGY)	4,5,9-11
Y	14 janvier 2015 (2015-01-14)	6,7
A	alinéa [0006] - alinéa [0022]; figures 1,3	1-3
A	----- LOBKIS O I ET AL: "Ultrasonic backscattering in polycrystals with elongated single phase and duplex microstructures", ULTRASONICS, vol. 52, no. 6, 1 janvier 2012 (2012-01-01), pages 694-705, XP028923585, ISSN: 0041-624X, DOI: 10.1016/J.ULTRAS.2011.12.002 abrégé; figure 8 Chapître 5.1 et la première alinéa du chapitre 5.2; page 701 - page 702; figures 7,8 -----	1-3
A	----- THOMPSON R B ET AL: "Scattering of elastic waves in simple and complex polycrystals", WAVE MOTION, NORTH-HOLLAND, AMSTERDAM, NL, vol. 45, no. 5, 1 avril 2008 (2008-04-01), pages 655-674, XP022603837, ISSN: 0165-2125, DOI: 10.1016/J.WAVEMOTI.2007.09.008 [extrait le 2007-10-17] abrégé; figure 8 Chapître 5, pages 663-664; page 663 - page 664; figures 6-8 -----	1-3

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2018/050154

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2005068995 A1	28-07-2005	AT 450792 T AU 2005204901 A1 CA 2553340 A1 EP 1709418 A1 ES 2337269 T3 NL 1025267 C2 US 2007277611 A1 WO 2005068995 A1	15-12-2009 28-07-2005 28-07-2005 11-10-2006 22-04-2010 19-07-2005 06-12-2007 28-07-2005
US 9488573 B2	08-11-2016	CN 103858021 A EP 2758800 A1 US 2014224021 A1 WO 2013041856 A1	11-06-2014 30-07-2014 14-08-2014 28-03-2013
CN 104280455 A	14-01-2015	AUCUN	