(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 103 280***

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

(21) **N° d'enregistrement national :** **19 12893**

(51) Int Cl[8] : ***G 01 N 29/04*** *(2019.12), G 01 N 29/24*

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 19.11.19.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 21.05.21 Bulletin 21/20.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire :** *Se reporter à la fin du présent fascicule*

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

( ) **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technologique* — FR et *SAFRAN Société Anonyme à Directoire et Conseil de Surveillance* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** DUCOUSSO Mathieu Loïc, HODE Romain,Tony, Olivier, RAETZ Samuel et TOURNAT Vincent.

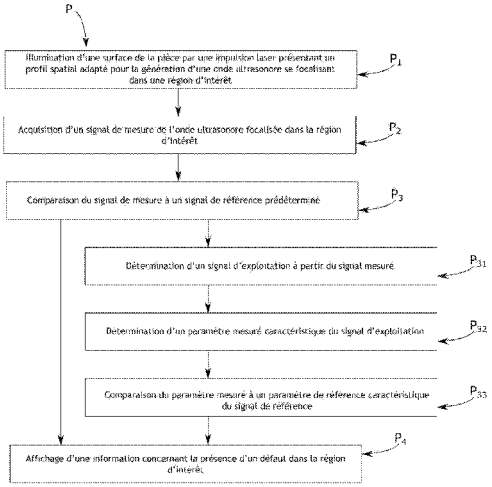
(73) **Titulaire(s) :** CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) Etablissement Public à Caractère Scientifique et Technologique, SAFRAN Société Anonyme à Directoire et Conseil de Surveillance.

(74) **Mandataire(s) :** REGIMBEAU.

(54) Procédé de détection de défaut par focalisation d'ondes ultrasonores générés par impulsion laser.

(57) La présente invention concerne un procédé (P) de détection d'un défaut dans une région d'intérêt d'une pièce comprenant les étapes suivantes : (P1) illumination d'une surface de la pièce par une impulsion laser présentant un profil spatial adapté pour la génération d'une onde ultrasonore se focalisant dans la région d'intérêt ;(P2) acquisition d'un signal de mesure de l'onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt ;l'impulsion laser étant adaptée pour générer un effet non linéaire sur l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt, le procédé comprenant en outre une étape : (P3) de comparaison du signal de mesure à un signal de référence, le signal de référence comprenant une estimation d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque la région d'intérêt ne contient pas de défaut.

Figure pour l'abrégé : Fig. 5



FR 3 103 280 - A1

Description

Titre de l'invention : Procédé de détection de défaut par focalisation d'ondes ultrasonores générés par impulsion laser

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention concerne un procédé de détection de défaut dans un milieu en utilisant des ondes ultrasonores focalisées et générées par impulsion laser.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Le contrôle qualité de pièces industrielles consiste à contrôler les structures fabriquées, vérifier que la matière formant la pièce est conforme au cahier des charges et ne présente pas de défauts. Le contrôle qualité peut être appliqué après différentes étapes de mise en forme de la matière comme le forgeage, la fonderie, ou le formage.

[0003] Il est important que le contrôle qualité d'une pièce soit non destructif c'est-à-dire qu'au cours du contrôle, il n'y ait pas de dégradation de la structure ou de la matière de la pièce contrôlée.

[0004] Il est connu d'utiliser des ondes élastiques pour sonder la matière d'une pièce, et imager des zones dans la pièce. En particulier dans le cas où la pièce industrielle comprend deux parties solidarisées par collage, la zone de collage peut être imagée en utilisant des ultrasons.

[0005] Les ondes élastiques peuvent être générées en plaçant des transducteurs mécaniques en contact direct avec la matière de la pièce ou en envoyant des impulsions laser sur la surface de la pièce.

[0006] En règle générale, selon l'intensité crête du rayonnement laser envoyé, la génération d'onde est réalisée dans la cadre d'un régime thermoélastique ou d'un régime ablatif. Seul le régime thermoélastique permet de mettre en œuvre un contrôle non destructif.

[0007] Une partie de l'énergie d'une impulsion laser est absorbée par la matière, la température de la pièce dans la zone illuminée s'élève soudainement, typiquement de quelques dizaines de degrés. La montée en température génère une dilatation thermoélastique locale qui crée un excès soudain de contraintes dans la zone illuminée. En raison de la rigidité du matériau qui entoure cette zone, il ne peut pas se produire une libre dilatation dans la direction radiale. Les contraintes mécaniques dans la zone illuminée se propagent au sein de la structure dans des directions privilégiées sous forme d'une onde ultrasonore. Les directions privilégiées peuvent être prédites formellement en fonction des caractéristiques du matériau éclairé.

[0008] Deux types d'onde élastique peuvent se propager. D'une part les ondes élastiques dites longitudinales ou de compression correspondent dans un milieu isotrope à un déplacement de la matière dans la direction de propagation. D'autre part les ondes

élastiques dites transversales ou de cisaillement correspondent dans un milieu isotrope à un déplacement de la matière dans le plan normal à la direction de propagation.

[0009] Pour un milieu isotrope et en considérant une hypothèse d'onde plane, l'amplitude d'une onde ultrasonore longitudinale varie selon la direction de propagation ou d'observation θ selon la relation suivante :

[0010] [Math.1]

$$A(\theta) = \frac{\sin(\theta)\sin(2\theta)\sqrt{\kappa^2 - \sin^2(\theta)}}{(\kappa^2 - 2\sin^2(\theta))^2 + 2\sin(\theta)\sin(2\theta)\sqrt{\kappa^2 - \sin^2(\theta)}}$$

[0011] où κ=cL/cT; cL et cT représentant respectivement les vitesses des ondes longitudinales et transverses dans le milieu considéré.

[0012] La figure 1, extraite de l'ouvrage « Laser ultrasonics techniques and applications » SCRUBY (C.B.) et DRAIN (L.E.)– 1990, Adam Hilger, est un diagramme de directivité des ondes longitudinales dans le cas de l'aluminium. La figure 1 représente la fonction A(θ). Une impulsion laser 3 est envoyée vers la surface S de la pièce à contrôler. La matière de la pièce à contrôler se trouve en dessous de la surface S représentée sur la figure 1. L'impulsion 3 illumine la surface S au point d'illumination 1. Un repère angulaire centré sur le point d'illumination 1 est représenté dans la figure 1. La direction N normale à la surface S correspond à un angle de direction de propagation nul, 0°. Vers la droite de la direction N, sont gradués les angles positifs jusqu'à l'angle 90° correspondant à la surface S. Vers la gauche de la direction N, sont gradués les angles négatifs jusqu'à l'angle -90° correspondant également à la surface S. La courbe 5 représente l'amplitude d'une onde ultrasonore longitudinale en fonction de l'angle de la direction de propagation pour une source laser surfacique et infiniment fine. L'amplitude d'une onde longitudinale est nulle pour un angle nul : il y a peu d'énergie élastique qui se propage selon la normale N à la surface S. L'amplitude d'une onde longitudinale est maximale dans les directions 7 et 9 proches respectivement de +64° et -64° dans le cas de l'aluminium. Cela signifie que l'onde ultrasonore longitudinale créée au point 1 se propage dans la matière globalement selon un cône dont le sommet est le point 1 et dont l'angle vaut environ 64°. Plus généralement, dans d'autres matériaux, les angles correspondant au maximum de l'amplitude d'une onde longitudinale dépendent du rapport κ=cL/cT.

[0013] Pour un milieu isotrope et en considérant une hypothèse d'onde plane, l'amplitude d'une onde ultrasonore transverse varie selon la direction de propagation ou d'observation θ selon la relation suivante :

[0014] [Math.2]

$$B(\theta) = \frac{\sin(2\theta)\cos(2\theta)}{\cos^2(2\theta) + 2\sin(\theta)\sin(2\theta)\sqrt{\kappa^2 - \sin^2(\theta)}}$$

[0015] La figure 2, extraite de l'ouvrage « Laser ultrasonics techniques and applications » SCRUBY (C.B.) et DRAIN (L.E.)– 1990, Adam Hilger, représente un diagramme de directivité des ondes transverses dans le cas de l'aluminium. La figure 2 représente la fonction B(θ). Une impulsion laser 3 est envoyée vers la surface S de la pièce à contrôler. La matière de la pièce à contrôler se trouve en dessous de la surface S représentée sur la figure 1. L'impulsion 3 illumine la surface S au point d'illumination 1. Un repère angulaire centré sur le point d'illumination 1 est représenté dans la figure 1. La direction N normale à la surface S correspond à un angle de direction de propagation nul, 0°. Vers la droite de la direction N, sont gradués les angles positifs jusqu'à l'angle 90° correspondant à la surface S. Vers la gauche de la direction N, sont gradués les angles négatifs jusqu'à l'angle -90° correspondant également à la surface S. La courbe 4 représente l'amplitude d'une onde ultrasonore transverse en fonction de l'angle de la direction de propagation pour une source laser surfacique et infiniment fine. L'amplitude d'une onde transverse est nulle pour un angle nul : il y a peu d'énergie élastique qui se propage selon la normale N à la surface S. L'amplitude d'une onde transverse est maximale dans les directions 6 et 8 proches respectivement de +30° et -30° dans le cas de l'aluminium. Plus généralement, les angles correspondant au maximum de l'amplitude d'une onde transverse dépendent du rapport k=cL/cT.

[0016] Il est possible de déterminer d'autres diagrammes de directivité en faisant varier la taille de la source laser, la fréquence ultrasonore considérée, la complexité du matériau, etc….

[0017] Le contrôle non destructif utilisant des ondes ultrasonores est limité par la puissance maximum des ondes produites : une puissance ultrasonore faible ne permet pas une sensibilité importante dans l'imagerie ultrasonore, diminuant alors la qualité du contrôle non-destructif.

[0018] Dans le cas d'ondes ultrasonores générées par impulsion laser, les diagrammes de directivité présentés plus haut montrent une propagation de l'onde selon des directions privilégiées par rapport à la surface. De plus, notamment pour des raisons d'atténuation élastique, plus la zone à imager dans la matière est éloignée de la surface et moins l'imagerie ultrasonore obtenue de la zone est sensible et révèle des détails.

[0019] Il existe dans l'art antérieur des techniques possibles pour focaliser des ondes ultrasonores. Ces techniques peuvent être effectuées avec des transducteurs mécaniques comme décrit dans WO2018189450A1 ou avec des illuminations laser comme décrit dans les articles « *Focused bulk ultrasonic waves generated by ring-shaped laser illumination and application to flaw detection* » Journal of Applied Physics **80**, 4274 (1996) ou « *Converging Laser Generated Ultrasonic Waves using Annular Patterns Irradiation* » S Zamiri et al 2014 J. Phys.: Conf. Ser. 520 012001.

[0020] Il est à noter que l'état de l'art concernant la focalisation ultrasonore est relativement vaste pour ce qui concerne les méthodes nécessitant des éléments piézoélectriques. Il est possible d'utiliser des mono-éléments qui produisent des ondes ultrasonores focalisées à une distance de l'émetteur fixée dès la conception. Il est aussi possible d'utiliser des multiéléments, par exemple des réseaux de transducteurs piézoélectriques pilotés électroniquement à la réception ou à l'émission et qui permettent, en appliquant aux différents éléments des retards électroniques calculés en fonction de l'objectif visé, de focaliser l'onde ultrasonore à différentes profondeurs du matériau inspecté.

[0021] Néanmoins, l'ensemble de ces techniques utilisant des éléments piézoélectriques nécessite un contact de l'émetteur avec la surface de la pièce à sonder et l'utilisation d'un couplant ultrasonore ou une immersion de la structure à inspecter. De plus, la gamme de fréquences accessible s'étend environ de 100 kHz à 20 MHz, limitant la résolution du contrôle.

[0022] La technique de focalisation ultrasonore utilisant des illuminations laser peut être présentée à partir des diagrammes de directivité présentés plus haut. Il est possible de mettre en œuvre une focalisation d'ondes ultrasonores sous la surface S en utilisant une impulsion laser présentant un profil spatial adapté. Si le profil spatial présente une géométrie particulière, les ondes ultrasonores générées en surface se propagent dans la matière et peuvent se rejoindre à des endroits particuliers dépendant du profil spatial utilisé.

[0023] Le profil spatial de l'impulsion lumineuse correspond au motif spatial de dépôt d'énergie laser à la surface de la structure illuminée.

[0024] Dans le cas d'un matériau isotrope, il est possible d'utiliser un profil spatial de l'impulsion laser en anneau. Le rayon r de l'anneau permet de définir la profondeur de focalisation e, selon la relation $e=r/\tan(\theta M)$.

[0025] θM représente la valeur absolue des angles correspondant au maximum de l'amplitude d'une onde longitudinale ou transverse. θM est l'inclinaison selon laquelle l'onde longitudinale ou transverse est générée le plus efficacement par laser, en régime thermoélastique. θM correspond à l'angle d'ouverture du cône évoqué plus haut. Par exemple dans le cas de l'aluminium illustré sur les figures 1 et 2, θM est autour de 64° pour les ondes longitudinales et de 30° pour les ondes transverses.

[0026] La figure 3A représente une illustration d'un profil spatial annulaire de l'impulsion laser. La matière de la pièce à analyser présente une surface S. Le point O de la surface S correspond au centre de l'anneau 32. La direction N correspond à la normale à la surface S passant par le point O. La matière de la pièce se situe en dessous de la surface S. Les points B et C de la surface S se situent sur l'anneau 32. Les diagrammes de directivité 34 et 35 sont représentés au niveau des points B et C. Les diagrammes 34

et 35 correspondent à une onde élastique transverse générée dans la matière de la pièce par une impulsion laser surfacique et infiniment fine envoyée aux points B et C.

[0027] Les diagrammes 34 et 35 présentent un point A de superposition qui se trouve sous le point O sur la normale N. Si la surface S est illuminée par un profil spatial de l'impulsion laser qui prend la forme de l'anneau 32, chaque point de l'anneau est le point de départ d'une onde ultrasonore qui passe par le point A. Ce faisant, une focalisation ultrasonore est ainsi réalisée au point A.

[0028] La figure 3B représente la géométrie de la focalisation dans un plan comprenant les points O, A et B. La distance OB correspond au rayon r de l'anneau 32. La distance OA correspond à la profondeur e de focalisation. L'angle θM entre les directions (OA) et (OB) correspond à l'angle du maximum d'amplitude d'une onde transverse. La profondeur de focalisation e est donnée par la relation $e=r/\tan(\theta M)$.

[0029] Dans le cas d'une onde transverse générée dans un matériau isotrope composé d'aluminium, $\theta M = 30°$. Si l'on souhaite proposer une focalisation à 2 mm sous la surface, il faut utiliser un anneau de 1,15 mm de rayon.

[0030] Dans le cas d'une onde longitudinale générée dans le même matériau, $\theta M = 64°$. Si l'on souhaite également proposer une focalisation à 2 mm sous la surface, il faut utiliser un anneau de 4,1 mm de rayon.

[0031] Le procédé de focalisation ainsi présenté permet alors d'améliorer les résolutions latérales des cartographies ultrasonores faites à la profondeur de focalisation.

[0032] Cette solution de focalisation d'onde ultrasonore générées par des impulsions laser permet de réaliser un système d'imagerie qui atteint une résolution supérieure à celle des systèmes d'imagerie sans focalisation. Cependant, la résolution atteinte reste limitée et il existe un besoin de détection de défaut atteignant une résolution supérieure.

Exposé de l'invention

[0033] Un but général de l'invention est de pallier les inconvénients des procédés de détection de défaut dans un milieu en utilisant des ondes ultrasonores de l'art antérieur.

[0034] Notamment, un but de l'invention est de proposer une solution d'imagerie utilisant la focalisation d'ultrasons générés par laser pour atteindre une résolution latérale supérieure à celle d'un système d'imagerie ultrasonore utilisant la focalisation d'ultrasons générés par laser.

[0035] Le but est atteint dans le cadre de la présente invention grâce à un procédé de détection d'un défaut dans une région d'intérêt d'une pièce comprenant les étapes suivantes :

[0036] illumination d'une surface de la pièce par une impulsion laser présentant un profil spatial adapté pour la génération d'une onde ultrasonore se focalisant dans la région

d'intérêt ;

[0037] acquisition d'un signal de mesure de l'onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt ;

[0038] l'impulsion laser étant adaptée pour générer un effet non linéaire sur l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt, et le procédé comprenant en outre une étape :

[0039] de comparaison du signal de mesure à un signal de référence, le signal de référence comprenant une estimation d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque la région d'intérêt ne contient pas de défaut.

[0040] La génération d'un effet non linéaire sur l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt, permet d'identifier de manière binaire et sans ambiguïté la présence ou l'absence d'un défaut dans la région d'intérêt. La résolution de la détection est améliorée.

[0041] Un tel procédé est avantageusement complété par les différentes caractéristiques ou étapes suivantes prises seules ou en combinaison :

[0042] une étape d'affichage d'une information concernant la présence du défaut dans la région d'intérêt en fonction du résultat de l'étape de comparaison ;

[0043] le signal de référence est obtenu par l'un au moins des moyens suivants :

simulation,

calcul théorique,

traitement d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque la région d'intérêt ne contient pas de défaut, et/ou

traitement d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque l'impulsion laser est adaptée pour ne pas générer un effet non linéaire dans l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt ;

[0044] le signal de mesure comprend une série temporelle de valeurs, l'étape de comparaison comprenant en outre les sous étapes suivantes :

détermination d'un signal d'exploitation à partir du signal de mesure, le signal d'exploitation étant choisi parmi la série temporelle de valeurs, une transformée de Fourrier de la série temporelle de valeurs, un spectre de Fourrier en amplitude de la série temporelle de valeurs et/ou un spectre de Fourrier en phase de la série temporelle de valeurs,

détermination d'un paramètre mesuré caractéristique du signal d'exploitation,

comparaison du paramètre mesuré à un paramètre de référence caractéristique du signal de référence ;

[0045] la pièce est formée d'un matériau isotrope et le profil spatial de l'impulsion laser est en forme d'anneau ;

[0046] L'invention porte également sur un procédé de détection d'un défaut situé sous un

point balise, le point balise étant situé à la surface d'une pièce, comprenant les étapes suivantes :

choix d'une pluralité de points d'étude situés dans la pièce sous le point balise ;

détermination pour chaque point d'étude d'un profil spatial d'une impulsion laser adaptée pour que l'illumination de la surface par l'impulsion laser génère une onde ultrasonore se focalisant dans une région d'intérêt centré sur le point d'étude ;

application pour chaque point d'étude du procédé de détection d'un défaut dans la région d'intérêt correspondante tel que présenté plus haut.

[0047] L'invention porte encore sur un procédé de détection parmi ceux que l'on a pu présenter plus haut et dans lequel la pièce est une pièce d'un moteur d'aéronef.

[0048] Enfin, l'invention porte sur un dispositif de détection d'un défaut dans une région d'intérêt d'une pièce comprenant une source laser impulsionnelle et un système optique adapté pour modifier le profil spatial de l'impulsion laser générée par la source, un système d'acquisition acoustique adapté pour mesurer une onde ultrasonore générée par l'illumination d'une surface de la pièce par l'impulsion laser, et un système de traitement du signal.

[0049] Avantageusement, mais facultativement, le système optique du dispositif de détection peut être adapté pour que l'impulsion laser présente un profil spatial d'anneau.

DESCRIPTION DES FIGURES

[0050] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui suit, laquelle est purement illustrative et non limitative, et doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

[0051] [fig.1]

[0052] [fig.2] les figures 1 et 2, déjà décrites, sont des représentations de diagramme de directivité d'ondes ultrasonores générées par laser ;

[0053] [fig.3A]

[0054] [fig.3B] les figures 3A et 3B, déjà décrites, représentent de manière schématique une focalisation d'ondes ultrasonores générées par laser.

[0055] [fig.4] la figure 4 représente de manière schématique un dispositif de détection d'un défaut par focalisation d'ondes ultrasonores générées par laser.

[0056] [fig.5] la figure 5 représente de manière schématique un procédé de détection d'un défaut par focalisation d'ondes ultrasonores générées par laser.

[0057] [fig.6] la figure 6 représente de manière schématique un procédé de détection d'un défaut sous un point balise par focalisation d'ondes ultrasonores générées par laser.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0058] *Dispositif de détection*

[0059] La figure 4 représente un dispositif 70 de détection d'un défaut par focalisation

d'ondes ultrasonores générées par laser

[0060] Le dispositif 70 permet de détecter un défaut dans une région d'intérêt 79 d'une pièce 77. Le dispositif 70 comprend tout d'abord une source laser impulsionnelle 71 et un système optique 73 adapté pour modifier le profil spatial d'une impulsion laser 72 générée par la source 71.

[0061] En particulier le système optique 73 est adapté pour modifier le profil spatial dans un plan particulier normal à la direction de propagation de l'impulsion laser 72.

[0062] En sortie du système optique 73, l'impulsion laser 74 présente un profil spatial 75 particulier dans le plan de la surface 76.

[0063] Le système optique 73 peut notamment générer des profils spatiaux 75 en forme d'anneau.

[0064] Le système optique 73 peut par exemple transformer un faisceau laser 72 présentant un profil spatial gaussien ou quasi gaussien en un faisceau 74 présentant un profil en forme d'anneau. Un axicon peut en particulier être employé au sein du système optique 73.

[0065] Le système optique 73 peut également être de type diffractif, c'est-à-dire présenter un fonctionnement fondé sur le caractère ondulatoire du faisceau laser produit par la source laser.

[0066] Le système optique 73 peut en particulier comprendre un modulateur spatial de lumière.

[0067] Le système optique 73 peut transformer un profil spatial de faisceau laser gaussien ou quasi gaussien en un faisceau présentant un profil spatial en anneau, en ellipse voire un profil spatial suivant un contour fermé plus complexe.

[0068] Le dispositif de détection 70 comprend un système d'acquisition acoustique 80 adapté pour mesurer une onde ultrasonore 78 se propageant dans la pièce 77. Il peut être utilisé une détection acoustique en réflexion c'est à dire du côté de la surface illuminée par le laser ou bien une détection acoustique en transmission c'est-à-dire de l'autre côté de la pièce par rapport à la surface illuminée. Le moyen de détection peut par exemple être indifféremment optique (laser par exemple), piézoélectrique ou électromagnétique (EMAT par exemple).

[0069] Le dispositif de détection 70 comprend un système de traitement du signal 81 adapté pour traiter le signal. Le système de traitement du signal 81 est adapté notamment pour déterminer à partir d'une série temporelle de valeurs une transformée de Fourrier, un spectre de Fourrier en amplitude, et un spectre de Fourrier en phase.

[0070] Le système de traitement du signal 81 est adapté pour calculer un paramètre à partir d'une série temporelle de valeurs, d'un spectre de Fourrier en amplitude ou en phase, pour comparer deux séries temporelles de valeurs, deux transformées de Fourrier entre elles, deux spectres de Fourrier en amplitude ou encore deux spectres de Fourrier en

phase.

[0071] Le dispositif de détection 70 comprend un système d'affichage 83 adapté pour afficher une information provenant du système de traitement.

[0072] *Procédé de détection*

[0073] Le fonctionnement du dispositif 70 peut être décrit en rapport avec la figure 5, qui représente un procédé P de détection d'un défaut dans une région d'intérêt 79 d'une pièce 77.

[0074] Au cours d'une première étape P1, la source laser impulsionnelle 71 génère une impulsion laser 72. Le profil spatial de l'impulsion est adapté par le système optique 73. En sortie du système optique 73 l'impulsion laser 74 est adaptée pour illuminer la surface 76 de la pièce 77 selon le profil spatial particulier 75. L'illumination de la surface 76 selon le profil spatial 75 génère dans la matière de la pièce 77 une onde ultrasonore 78 qui se focalise dans une région d'intérêt 79.

[0075] L'onde ultrasonore focalisée génère un maximum de contraintes dans la région d'intérêt. La présence à un instant donné d'un maximum de contrainte obtenu dans la région d'intérêt 79 située dans la pièce à analyser peut être suffisante pour générer des effets non linéaires dans l'onde ultrasonore.

[0076] Le maximum de contrainte élastique peut être réglé notamment à partir de l'énergie de l'impulsion laser 72 ou des paramètres de focalisation. Le maximum de contrainte élastique peut être réglé pour que la présence d'un défaut dans la région d'intérêt 79 génère des effets non linéaires alors que l'absence d'un défaut n'en génère pas.

[0077] Par exemple, il peut y avoir un enrichissement du spectre ultrasonore, c'est-à-dire que la puissance ultrasonore liée à une fréquence particulière du spectre de l'onde ultrasonore peut significativement augmenter en lien avec l'existence du maximum de contrainte élastique et la présence d'un défaut dans la région d'intérêt 79.

[0078] De nouveaux contrôles, comme par exemple de l'imagerie harmonique, peuvent être proposés.

[0079] Au cours d'une deuxième étape P2, les capteurs 80 mesurent l'onde ultrasonore 78. Les capteurs 80 produisent un signal de mesure électrique adapté pour être traité par le système de traitement du signal 81. L'étape P2 d'acquisition d'un signal de mesure de l'onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt peut être effectuée en réflexion c'est à dire du côté de la surface illuminée par le laser ou bien en transmission c'est-à-dire de l'autre côté de la pièce par rapport à la surface illuminée.

[0080] Au cours d'une troisième étape P3, le signal de mesure produit par les capteurs 80 est transmis au et exploité par le système de traitement du signal 81. Le système de traitement du signal 81 compare le signal de mesure à un signal de référence.

[0081] Le signal de référence comprend une estimation d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque la région d'intérêt ne contient pas

de défaut.

[0082] Le signal de référence peut être obtenu par différents moyens.

[0083] Le signal de référence peut être obtenu par simulation numérique ou par calcul théorique.

[0084] Le signal de référence peut également être obtenu à partir d'une mesure.

[0085] Un premier exemple d'une telle mesure est obtenu lorsque le dispositif 70 de détection est adapté pour focaliser une onde ultrasonore dans une région d'intérêt dont on est sûr qu'elle ne contient aucun défaut.

[0086] Un deuxième exemple d'une telle mesure est obtenu lorsque le dispositif 70 de détection est adapté pour focaliser une onde ultrasonore avec un maximum de contrainte élastique suffisamment faible pour ne pas générer un effet non linéaire dans l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt.

[0087] A partir du signal de mesure obtenu dans ces conditions particulières, il est possible de construire un signal de référence.

[0088] *Traitement du signal*

[0089] Le système de traitement du signal 81 est adapté pour effectuer une comparaison entre le signal de mesure au signal de référence.

[0090] Le signal de mesure comprend une série temporelle de valeurs transmises par les capteurs 80. Le signal de mesure peut comprendre en outre d'autres informations comme des paramètres d'acquisition ou d'échantillonnage, la date et l'heure à laquelle la mesure a été réalisée, etc…

[0091] Dans une première sous-étape P31, le système de traitement du signal 81 détermine un signal d'exploitation à partir du signal de mesure. Le signal d'exploitation peut être une transformation de la série temporelle de valeurs par exemple une transformée de Fourrier, un spectre de Fourrier en amplitude ou en phase. Le signal d'exploitation peut être la série temporelle de valeurs elle-même.

[0092] Dans une deuxième sous-étape P32, le système de traitement du signal 81 détermine un paramètre mesuré à partir du signal d'exploitation. De nombreux paramètres mesurés peuvent être utilisés.

[0093] Dans le cas où le signal d'exploitation est la série temporelle de valeurs, le paramètre de mesuré peut être une amplitude à un temps particulier, un paramètre de forme d'onde, un paramètre d'enveloppe, un paramètre d'ajustement, un paramètre de corrélation, un temps d'apparition d'une forme particulière dans le signal de mesure.

[0094] Dans le cas où le signal d'exploitation est un spectre de Fourrier en amplitude ou en phase, le paramètre de mesuré peut être une puissance sur un certaine gamme de fréquences, une intégrale ou une moyenne sur une certaine gamme de fréquences, un paramètre de forme d'onde, un paramètre d'enveloppe ou un paramètre d'ajustement.

[0095] Au cours d'une troisième sous-étape P33, le système de traitement du signal 81

compare le paramètre mesuré à un paramètre de référence caractéristique du signal de référence. La construction du paramètre de référence à partir du signal de référence est similaire à la construction du paramètre mesuré à partir du signal de mesure.

[0096] Le système de traitement du signal 81 peut comparer le paramètre mesuré à un paramètre de référence en utilisant un écart attendu. Cet écart attendu quantifie une variabilité d'une pluralité de paramètres de référence. Par exemple, une pluralité de signaux de référence peut être déterminée, et pour chaque signal de référence un paramètre de référence peut être calculé.

[0097] La variabilité ou la dispersion de la pluralité de paramètres de référence peut être quantifiée, par exemple par un écart-type.

[0098] L'écart attendu peut être pris supérieur ou égal à un écart-type ou égal à un multiple entier d'écart-type.

[0099] Si l'écart entre le paramètre mesuré et le paramètre de référence est supérieur à l'écart attendu, une alerte peut être générée.

[0100] Au cours d'une quatrième étape P4, le système d'affichage 83 affiche une information concernant la présence d'un défaut dans la région d'intérêt en fonction du résultat de l'étape P3 de comparaison. Le système d'affichage peut en particulier afficher l'alerte éventuelle, le paramètre retenu pour la comparaison, la valeur de la différence entre le paramètre mesuré et le paramètre de référence et l'écart attendu. Plus généralement, le résultat de l'étape de comparaison et les informations pertinentes se rapportant à l'étape de comparaison peuvent être acheminées du système de traitement du signal 81 vers le système d'affichage 83 pour être mis à la disposition d'un opérateur.

[0101] *Effets techniques - Avantages*

[0102] Le procédé tel qu'on l'a présenté plus haut se fonde sur la génération d'effets non linéaires dans l'onde ultrasonore lorsqu'un défaut est présent dans la région d'intérêt 79.

[0103] Cela peut être le cas pour les défauts au sein d'un collage d'une pièce. Si le collage ne présente pas de défaut, la réponse élastique de la région d'intérêt présente un spectre fréquentiel sans harmonique. Si au contraire le collage est dégradé par du PTFE ou un agent démoulant localement présent à l'interface du joint de colle, des harmoniques peuvent enrichir le spectre. Il est possible grâce au procédé de sonder la qualité d'un collage en augmentant la sollicitation élastique et en sondant ensuite le spectre du signal détecté. Si le collage présente des défauts d'interface, le spectre du signal de mesure est différent du spectre du signal de référence pour au moins une gamme de fréquences.

[0104] Plus la sollicitation élastique est importante et plus les effets non linéaires et notamment l'enrichissement de spectre sont importants. De cette manière, au-delà

d'une certaine valeur de contrainte élastique dans la zone de focalisation, le procédé tel que présente plus haut permet d'identifier de manière binaire et sans ambiguïté la présence ou l'absence de défaut dans la région d'intérêt. La sensibilité d'un tel procédé peut dépasser la sensibilité d'une solution d'imagerie ultrasonore linéaire.

[0105] L'utilisation du procédé peut être envisagé pour détecter d'autres types de défauts tels que des fissures, bulles de gaz, porosités, incrustations dans une structure monolithique, par exemple une structure métallique. La présence dans une structure d'une interface de type joint de grain entre deux phases cristallines pourrait également être révélée par un tel procédé.

[0106] Dans le procédé présenté ici, les ondes ultrasonores sont générées à partir d'une impulsion laser et ne nécessite pas le contact physique entre un émetteur et la surface de la pièce à sonder. Il n'y a pas de contact nécessaire quelle que soit la température de surface de la pièce, notamment une température importante à la fin d'un procédé de fabrication par fonderie. Par ailleurs, un tel procédé est parfaitement reproductible, facilement adaptable à des géométries même complexes et ne nécessite pas d'immerger la pièce à analyser ou de lui appliquer le couplant ultrasonore ou un transducteur piézo électrique.

[0107] Les ondes ultrasonores générées à partir d'impulsion laser peuvent s'élever à des fréquences acoustiques de quelques dizaines de MHz, correspondant à une sensibilité de la détection de défaut au moins aussi bonne que pour des systèmes utilisant des ondes ultrasonores de 100 kHz à 20 MHz.

[0108] Enfin, la zone morte, c'est-à-dire la zone située sous la surface de la pièce à analyser et pour laquelle l'application du procédé ne permet pas d'obtenir des mesures précises, est plus faible voire nulle dans le cas d'un procédé fondé sur des impulsions laser en comparaison à un procédé fondé sur des transducteurs mécaniques.

[0109] *Focalisation*

[0110] La région d'intérêt pour laquelle on souhaite établir la présence ou l'absence d'un défaut doit, au cours du procédé, correspondre au lieu de focalisation de l'onde ultrasonore. Il est donc nécessaire de contrôler le lieu de cette focalisation.

[0111] Dans le cas d'un matériau isotrope, il est possible d'illuminer la surface avec une impulsion laser présentant un profil spatial en forme d'anneau. La profondeur de focalisation est contrôlée par le rayon de l'anneau. La position dans le plan de la surface de la focalisation est contrôlée par la position du centre de l'anneau dans le plan de la surface.

[0112] Le rayon de l'anneau dépend de manière linéaire de la profondeur, le rayon pouvant également dépendre du type d'onde longitudinale ou transverse utilisée.

[0113] Dans le cas d'un matériau orthotrope ou à symétrie cubique, il est possible d'illuminer la surface avec une impulsion laser présentant un profil spatial plus

complexe, par exemple en forme d'ellipse. La profondeur de focalisation est contrôlée par le petit axe et le grand axe de l'ellipse. La position dans le plan de la surface de la focalisation est contrôlée par la position du centre de l'ellipse dans le plan de la surface.

[0114] La forme du profil spatial utilisée peut également dépendre du type d'onde longitudinale ou transverse, de l'atténuation, ou autre.

[0115] Dans le cas d'un matériau anisotrope, la surface peut être illuminée avec une impulsion laser présentant un profil spatial plus complexe. Ce profil spatial peut notamment suivre un contour fermé et peut être calculé numériquement à partir des caractéristiques du matériau anisotrope.

[0116] *Procédé de sondage d'un défaut sous un point*

[0117] Il peut être intéressant de sonder la matière sous un point particulier de la surface et d'établir à diverses profondeurs la présence éventuelle d'un défaut.

[0118] Il est proposé à cet effet un procédé T, représenté sur la figure 6, de détection d'un défaut situé sous un point balise, le point balisé étant situé à la surface d'une pièce. Le procédé comprend une première étape T1 de choix d'une pluralité de points d'étude situés dans la pièce sous le point balise. Les points d'étude sont situés sur la normale N à la surface passant par le point balise, à différentes distances du point balise.

[0119] Dans une deuxième étape T2 il est déterminé pour chaque point d'étude un profil spatial d'une impulsion laser adaptée pour que l'illumination de la surface par l'impulsion laser génère une onde ultrasonore se focalisant dans une région d'intérêt centré sur le point d'étude. Chaque point d'étude est au centre d'une région d'intérêt situé sous le point balise à une certaine profondeur. Compte-tenu de ce qui a été présenté précédemment, il est possible de choisir un profil spatial particulier d'une impulsion laser de sorte que si cette impulsion illumine la surface, une onde ultrasonore est créée et se propage en se focalisant au niveau de ladite région d'intérêt. Il est possible d'adapter le choix de la pluralité de points d'étude en fonction d'une étendue de la région d'intérêt. Notamment il est possible de choisir une pluralité de points de sorte que les étendues de détection correspondantes sont juxtaposées les unes contre les autres sans superposition ni espace entre elles.

[0120] Dans une troisième étape T3 il est appliqué pour chaque point d'étude le procédé de détection d'un défaut dans la région d'intérêt correspondante selon la présentation qui a été donnée plus haut. De cette manière, la présence ou l'absence d'un défaut est déterminée pour chaque point de la pluralité de point. Il est ainsi possible d'établir la présence d'un défaut sous un point balise de la surface de la pièce et sa profondeur si le défaut est détecté.

[0121] Les procédés que l'on a présentés peuvent être mis en œuvre pour le contrôle non destructif d'une pièce d'un moteur d'aéronef, et la validation de cette pièce avant

qu’elle ne soit assemblée au sein du moteur.

Revendications

[Revendication 1] Procédé (P) de détection d'un défaut dans une région d'intérêt d'une pièce comprenant les étapes suivantes :
(P1) illumination d'une surface de la pièce par une impulsion laser présentant un profil spatial adapté pour la génération d'une onde ultrasonore se focalisant dans la région d'intérêt ;
(P2) acquisition d'un signal de mesure de l'onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt ;
le procédé (P) étant caractérisé en ce que l'impulsion laser est adaptée pour générer un effet non linéaire sur l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt, et en ce que le procédé comprend en outre une étape :
(P3) de comparaison du signal de mesure à un signal de référence, le signal de référence comprenant une estimation d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque la région d'intérêt ne contient pas de défaut.

[Revendication 2] Procédé selon la revendication 1 comprenant en outre une étape (P4) d'affichage d'une information concernant la présence du défaut dans la région d'intérêt en fonction du résultat de l'étape de comparaison.

[Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2 dans lequel le signal de référence est obtenu par l'un au moins des moyens suivants :
simulation,
calcul théorique,
traitement d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque la région d'intérêt ne contient pas de défaut, et/ou
traitement d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque l'impulsion laser est adaptée pour ne pas générer un effet non linéaire dans l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt.

[Revendication 4] Procédé (P) de détection selon l'une des revendications 1 à 3 dans lequel le signal de mesure comprend une série temporelle de valeurs, l'étape (P3) de comparaison comprenant en outre les sous étapes suivantes :
(P31) détermination d'un signal d'exploitation à partir du signal de mesure, le signal d'exploitation étant choisi parmi la série temporelle de valeurs, une transformée de Fourrier de la série temporelle de valeurs, un spectre de Fourrier en amplitude de la série temporelle de valeurs et/

ou un spectre de Fourrier en phase de la série temporelle de valeurs,
(P32) détermination d'un paramètre mesuré caractéristique du signal d'exploitation,
(P33) comparaison du paramètre mesuré à un paramètre de référence caractéristique du signal de référence.

[Revendication 5] Procédé (P) de détection selon l'une des revendications 1 à 4 dans lequel la pièce est formée d'un matériau isotrope et le profil spatial de l'impulsion laser est en forme d'anneau.

[Revendication 6] Procédé (T) de détection d'un défaut situé sous un point balise, le point balise étant situé à la surface d'une pièce, comprenant les étapes suivantes :
(T1) choix d'une pluralité de points d'étude situés dans la pièce sous le point balise ;
(T2) détermination pour chaque point d'étude d'un profil spatial d'une impulsion laser adaptée pour que l'illumination de la surface par l'impulsion laser génère une onde ultrasonore se focalisant dans une région d'intérêt centré sur le point d'étude ;
(T3) application pour chaque point d'étude du procédé de détection d'un défaut dans la région d'intérêt correspondante selon l'une des revendications 1 à 5.

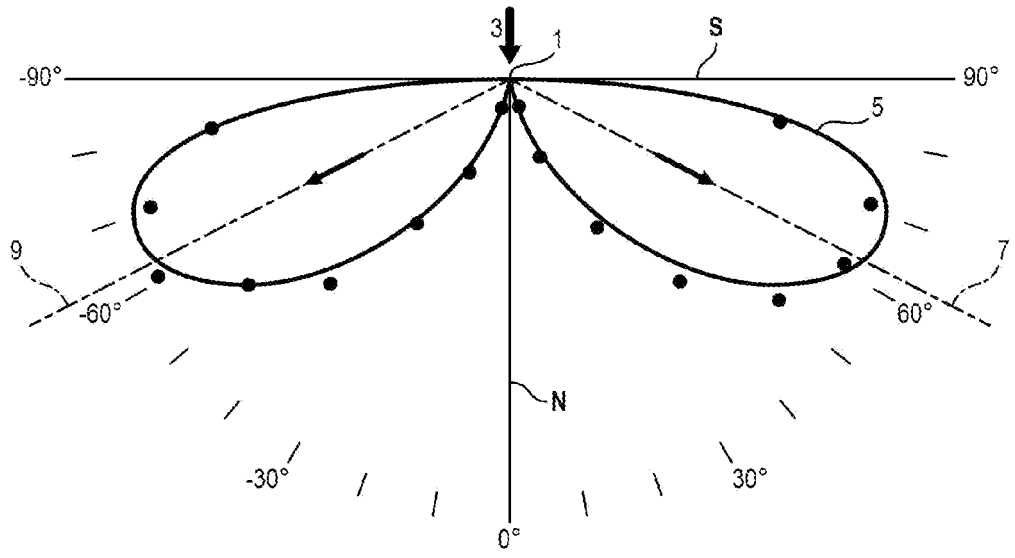
[Revendication 7] Procédé de détection selon l'une des revendications 1 à 6 dans lequel la pièce est une pièce d'un moteur d'aéronef.

[Revendication 8] Dispositif de détection d'un défaut dans une région d'intérêt d'une pièce comprenant
une source laser impulsionnelle adaptée pour générer une impulsion laser et un système optique adapté pour modifier le profil spatial de l'impulsion laser générée par la source, l'impulsion laser illuminant une surface de la pièce, le profil spatial étant adapté pour la génération d'une onde ultrasonore se focalisant dans la région d'intérêt
un système d'acquisition acoustique adapté pour mesurer l'onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt,
l'impulsion laser étant adaptée pour générer un effet non linéaire sur l'onde ultrasonore si le défaut est présent dans la région d'intérêt, et
un système de traitement du signal adapté pour comparer le signal de mesure à un signal de référence, le signal de référence comprenant une estimation d'un signal acquis d'une onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt lorsque la région d'intérêt ne contient pas de défaut.

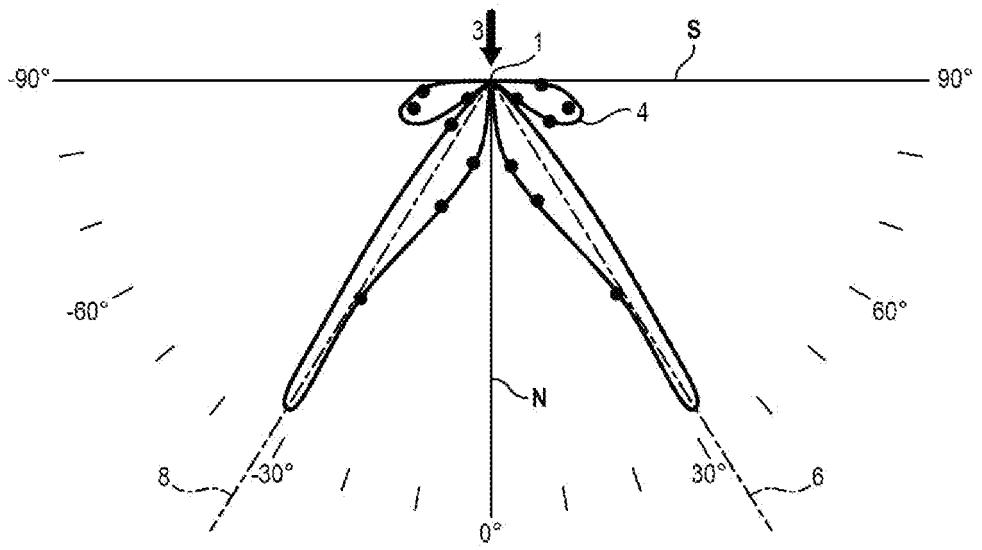
[Revendication 9] Dispositif de détection selon la revendication 8 dans lequel le système

optique est adapté pour que l'impulsion laser présente un profil spatial d'anneau.

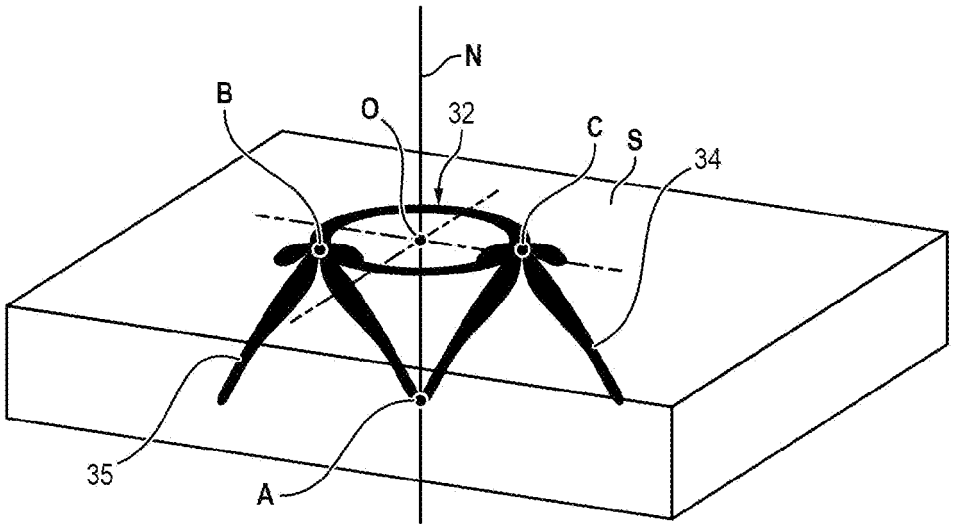
[Fig. 1]



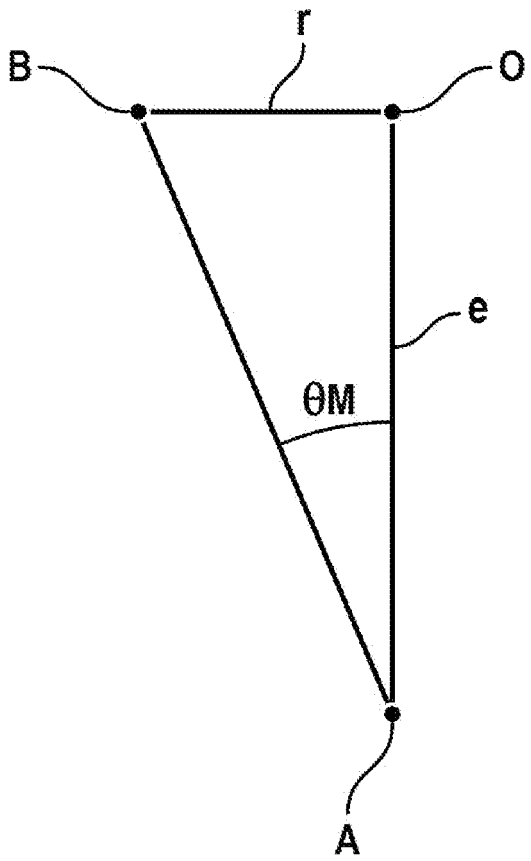
[Fig. 2]



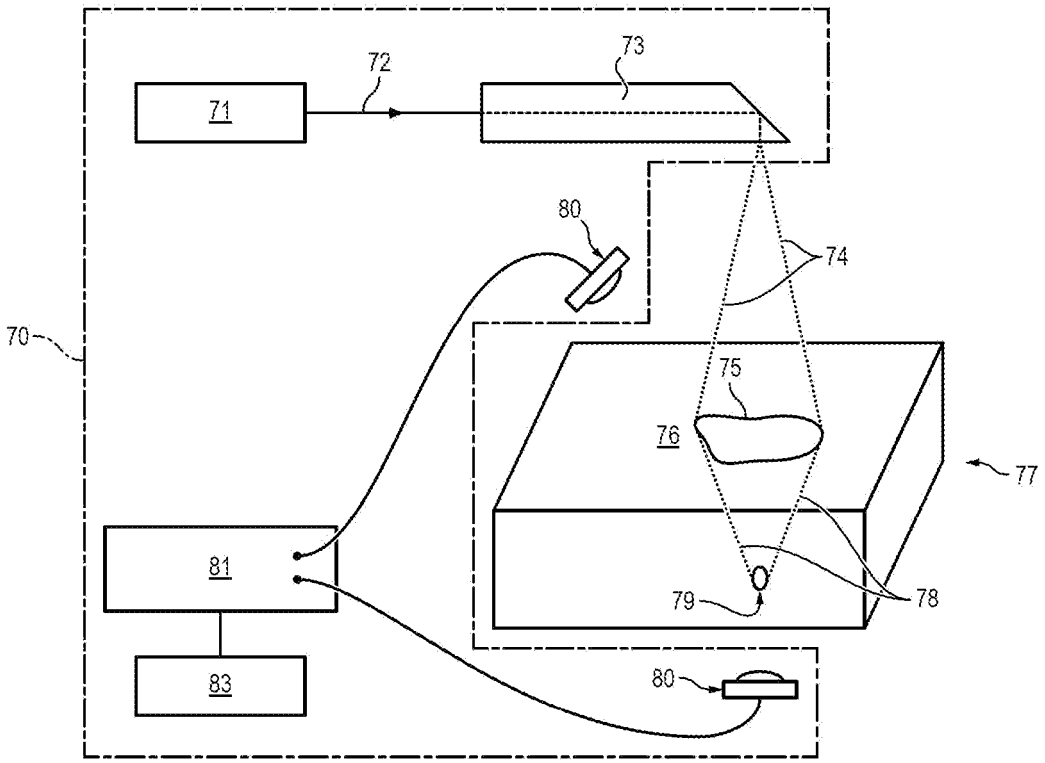
[Fig. 3A]



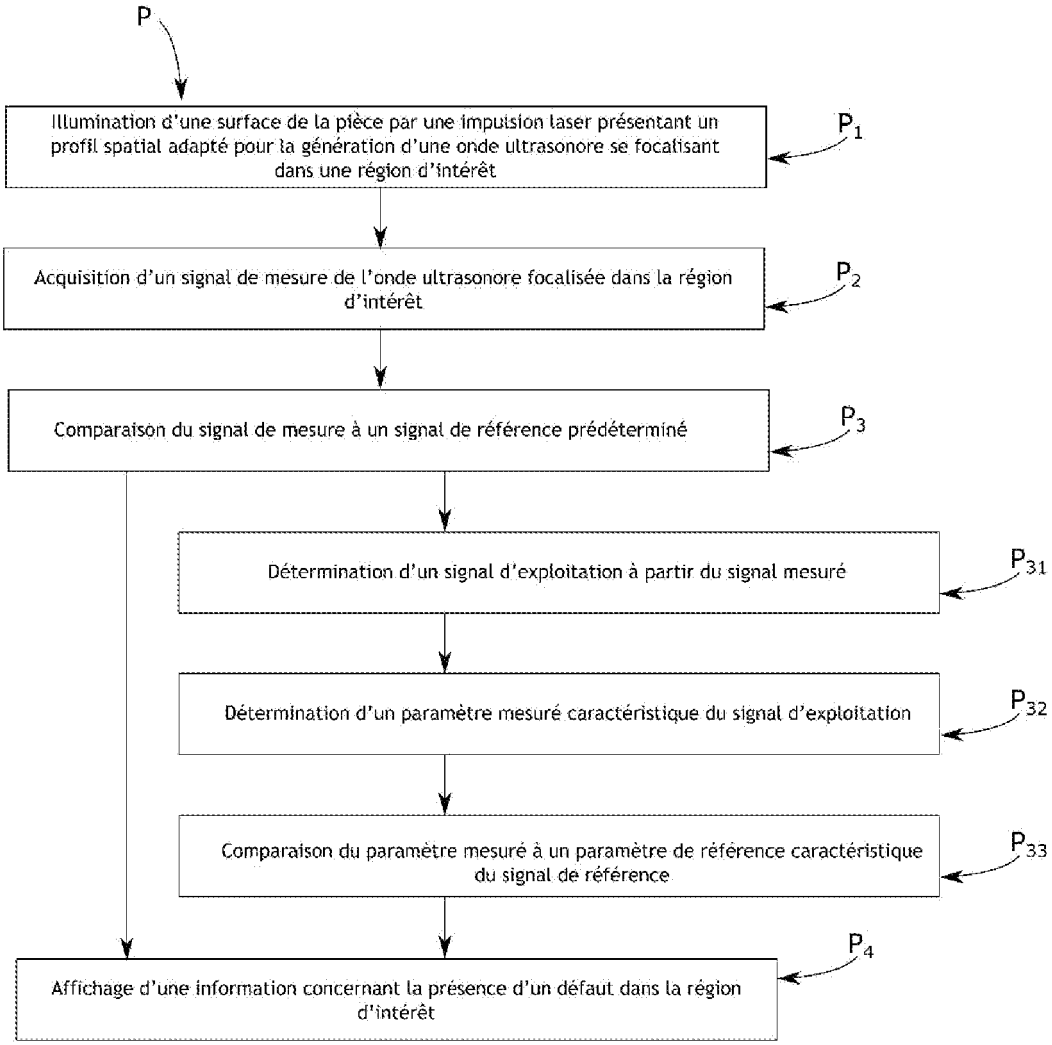
[Fig. 3B]



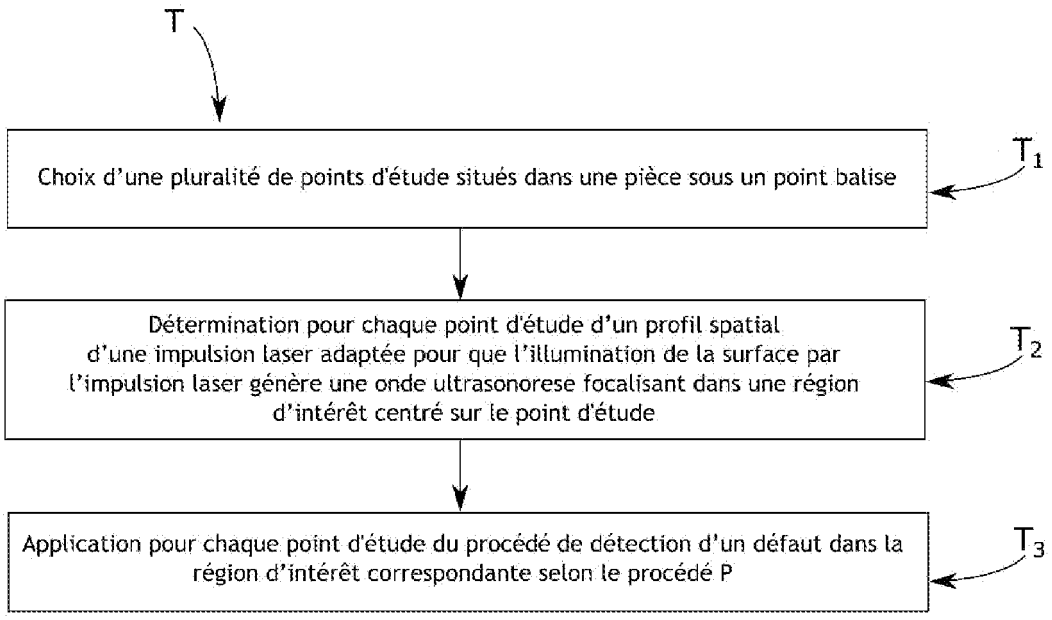
[Fig. 4]



[Fig. 5]


P
Illumination d'une surface de la pièce par une impulsion laser présentant un profil spatial adapté pour la génération d'une onde ultrasonore se focalisant dans une région d'intérêt
P1
Acquisition d'un signal de mesure de l'onde ultrasonore focalisée dans la région d'intérêt
P2
Comparaison du signal de mesure à un signal de référence prédéterminé
P3
Détermination d'un signal d'exploitation à partir du signal mesuré
P31
Détermination d'un paramètre mesuré caractéristique du signal d'exploitation
P32
Comparaison du paramètre mesuré à un paramètre de référence caractéristique du signal de référence
P33
Affichage d'une information concernant la présence d'un défaut dans la région d'intérêt
P4

[Fig. 6]


T
Choix d'une pluralité de points d'étude situés dans une pièce sous un point balise
T1
Détermination pour chaque point d'étude d'un profil spatial d'une impulsion laser adaptée pour que l'illumination de la surface par l'impulsion laser génère une onde ultrasonorese focalisant dans une région d'intérêt centré sur le point d'étude
T2
Application pour chaque point d'étude du procédé de détection d'un défaut dans la région d'intérêt correspondante selon le procédé P
T3

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement national

FA 882076
FR 1912893

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	EP 0 702 230 A2 (TEXTRON DEFENSE SYSTEMS [US]) 20 mars 1996 (1996-03-20) * colonne 9, ligne 46 - colonne 10, ligne 59 * * colonne 14, lignes 32-43 * * colonne 17, ligne 39 - colonne 18, ligne 55 * * colonne 20; figures 1-8b * -----	1-5,8,9	G01N29/04 G01N29/24
X	US 5 585 921 A (PEPPER DAVID M [US] ET AL) 17 décembre 1996 (1996-12-17) * colonne 4, ligne 31 - colonne 5, ligne 53 * * colonne 16, ligne 48 - colonne 18, ligne 59 * * colonne 19, ligne 53 - colonne 21, ligne 11 * * figures 3-8 * -----	1-3,5,6, 8,9	
X	US 5 608 166 A (MONCHALIN JEAN-PIERRE [CA] ET AL) 4 mars 1997 (1997-03-04) * colonne 7, lignes 32-35 * * colonne 8, lignes 52-65; figure 6 * -----	1,7,8	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G01N
X	US 4 541 280 A (CIELO PAOLO G [CA] ET AL) 17 septembre 1985 (1985-09-17) * colonne 2, ligne 26 - colonne 5, ligne 19; figures 1-6 * -----	1-3,8	

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
29 septembre 2020	Roetsch, Patrice

CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons

.....

& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1912893 FA 882076

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 29-09-2020
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 0702230 A2	20-03-1996	EP 0702230 A2	20-03-1996
		JP H08184581 A	16-07-1996
		US 5604592 A	18-02-1997
		US 5638396 A	10-06-1997
		US 5781304 A	14-07-1998
		US 5793489 A	11-08-1998
		US 5798835 A	25-08-1998
		US 5956143 A	21-09-1999
US 5585921 A	17-12-1996	AUCUN	
US 5608166 A	04-03-1997	DE 19641653 A1	17-04-1997
		FR 2739934 A1	18-04-1997
		US 5608166 A	04-03-1997
US 4541280 A	17-09-1985	AUCUN	

EPO FORM P0465