

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

11 N° de publication : **3 138 525**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)  
21 N° d'enregistrement national : **22 07753**  
51 Int Cl<sup>8</sup> : **G 01 N 29/44 (2022.01), G 01 N 29/04**

12 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION** A1

22 Date de dépôt : 28.07.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 02.02.24 Bulletin 24/05.

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) : Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives Etablissement public — FR.

72 Inventeur(s) : CHATILLON Sylvain, IAKOVLEVA Ekaterina et DEMALDENT Edouard.

73 Titulaire(s) : Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives Etablissement public.

74 Mandataire(s) : ATOUT PI LAPLACE.

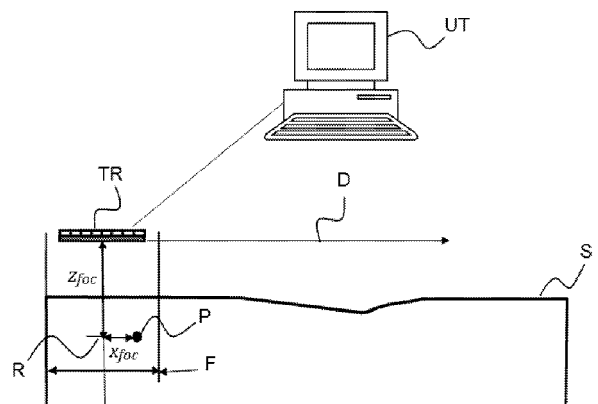
54 Méthode et dispositif d'imagerie par ultrasons à complexité de traitement réduite.

57 L'invention porte sur une méthode et un dispositif de calcul trajets ultrasonores pour déterminer des lois de focalisation ou réaliser une imagerie par ultrasons à complexité de traitement réduite.

Un objectif de l'invention est de proposer une nouvelle méthode moins complexe qui permet d'éviter les résolutions numériques itératives nécessaires aux calculs des points d'impacts.

L'invention résout le problème précité en exploitant une base de données dans laquelle sont sauvegardées des valeurs pré calculées des points d'impacts et/ou des temps de vol des ondes ultrasonores pour différents modèles de surface de pièces. Pour imager une nouvelle pièce, la méthode consiste alors à interroger la base de données afin de sélectionner les modèles de surface qui approchent au mieux la nouvelle surface de la pièce à imager et en déduire les valeurs des points d'impact et des temps de vol par simple interrogation de la base ou au moyen d'une interpolation de plusieurs valeurs de la base.

Figure 1



FR 3 138 525 - A1



## Description

### **Titre de l'invention : Méthode et dispositif d'imagerie par ultrasons à complexité de traitement réduite**

- [0001] L'invention concerne le domaine des ultrasons et s'applique en particulier au contrôle non destructif de pièces par méthode ultrasonore ou à la thérapie par ultrasons focalisés ou à l'imagerie ultrasonore cérébrale transcranienne.
- [0002] L'invention porte plus précisément sur une méthode et un dispositif de calcul trajets ultrasonores pour déterminer des lois de focalisation ou réaliser une imagerie par ultrasons à complexité de traitement réduite.
- [0003] Les techniques de contrôle non-destructif par ultrasons visent à détecter et à caractériser (localiser, dimensionner) des défauts dans des pièces ou installations industrielles. Les transducteurs multi-éléments sont de plus en plus utilisés dans le domaine industriel en raison de leur flexibilité d'utilisation et de la richesse des données auxquelles ils donnent accès. L'exploitation optimale de ces données pour la détection et la caractérisation des défauts nécessite la mise en œuvre de nouvelles techniques d'imagerie a posteriori. Parmi celles-ci, la méthode dite de *Focalisation en Tous Points* (FTP) consiste en une focalisation synthétique des champs émis et reçus par sommation cohérente des données issues d'une acquisition du type *Full Matrix Capture* (FMC) ou matrice inter-éléments. Dans le domaine de la santé, cette méthode s'applique également à l'imagerie ou à la thérapie cérébrale au travers de la paroi crânienne.
- [0004] Les méthodes d'imagerie par ultrasons nécessitent en général un calcul du trajet de l'onde ultrasonore depuis le centre de chaque élément jusqu'au point d'intérêt, point focal ou point à imager ou plus généralement jusqu'au plan d'onde, en respectant les principes de transmission aux différentes interfaces qui séparent les différents milieux homogènes que traversent l'onde.
- [0005] Ces calculs génériques sont notamment utilisés pour calculer des lois de retards permettant de générer un faisceau dont les caractéristiques sont maîtrisées après le franchissement des différentes interfaces ou dans les processus d'imagerie multi-éléments tels que l'imagerie FTP décrite dans [1] ou l'imagerie du type « Plane Wave Imaging » PWI décrite dans [2].
- [0006] Ces algorithmes nécessitent la connaissance des milieux traversés (géométrie et propriétés acoustiques). Pour un point d'intérêt donné (point focal ou point à imager), le calcul des trajets issus du centre de chaque élément est ensuite exploité soit pour assurer une focalisation au point souhaité (génération d'un faisceau focalisé pour du contrôle non-destructif ou thérapie), soit pour assurer une sommation cohérente des

signaux obtenus (processus d'imagerie).

- [0007] Un objectif est de décrire la propagation bidimensionnelle ou tridimensionnelle d'ondes ultrasonores transitant entre un point source (l'émetteur ultrasonore) et un point d'observation (le point de la structure à imager), entre lesquels se trouve une structure présentant une ou plusieurs interfaces diffractantes. Les interfaces diffractantes peuvent engendrer des hétérogénéités de propagation ultrasonore et inclure des défauts de structure. La modélisation des trajets des ondes prend en compte notamment le principe de Huygens-Fresnel selon lequel chaque point d'une interface atteint par une onde se comporte comme une source de diffraction secondaire et la théorie géométrique de la diffraction qui repose sur le principe de Fermat selon lequel une onde se propage d'un point à un autre sur des trajectoires, de types tracés de rayons, telles que la durée du parcours est localement stationnaire, c'est-à-dire en pratique minimale.
- [0008] Cependant, un inconvénient est que les calculs nécessaires pour déterminer le point d'impact de l'onde ultrasonore sur chaque interface de diffraction sont coûteux car ils nécessitent une résolution numérique itérative pour résoudre un système non linéaire basé sur les lois de Snell-Descartes (voir référence [2] pour plus de détails).
- [0009] Ces opérations sont d'autant plus coûteuses qu'elles sont réalisées pour chaque élément du transducteur, pour chaque point de la zone à imager mais aussi pour différentes positions du transducteur lorsque celui-ci est mobile et se déplace sur la surface de la pièce ou autour du patient.
- [0010] Un objectif de l'invention est de proposer une nouvelle méthode moins complexe qui permet d'éviter les résolutions numériques itératives nécessaires aux calculs des points d'impacts.
- [0011] L'invention résout le problème précité en exploitant une base de données dans laquelle sont sauvegardées des valeurs pré calculées des points d'impacts et/ou des temps de vol des ondes ultrasonores pour différents modèles de surface de pièces. Pour imager une nouvelle pièce, la méthode consiste alors à interroger la base de données afin de sélectionner les modèles de surface qui approchent au mieux la nouvelle surface de la pièce à imager et en déduire les valeurs des points d'impact et des temps de vol par simple interrogation de la base ou au moyen d'une interpolation de plusieurs valeurs de la base.
- [0012] L'invention s'applique au domaine du contrôle non destructif de pièces ou structures notamment pour des applications nucléaires (inspection d'une cuve de réacteur), aéronautiques (contrôle d'intégrité de la structure d'un avion), de transport ou de métallurgie.
- [0013] L'invention s'applique également au domaine de la thérapie et de l'imagerie cérébrale transcrânienne. De nos jours, ce type d'imagerie s'effectue principalement

par imagerie à résonance magnétique (IRM) ou par tomographie rayons X (CT). Cependant, ces méthodes sont coûteuses et nécessitent des équipements complexes. Les méthodes d'échographie ultrasonores sont moins coûteuses, moins volumineuses en termes d'équipements, plus rapides et moins invasives, ce qui permet leur utilisation en milieu pré-hospitalier.

[0014] L'invention porte sur une méthode de détermination de trajets d'ondes ultrasonores à l'aide d'un dispositif comprenant au moins un transducteur émetteur multi-éléments comprenant une pluralité d'éléments aptes à émettre un signal ultrasonore dans une zone d'une pièce et au moins un transducteur récepteur multi-éléments comprenant une pluralité d'éléments aptes à recevoir l'un des signaux ultrasonores provenant de la pièce, le transducteur émetteur et le transducteur récepteur étant mobiles par rapport à la pièce, la méthode comprenant les étapes de :

- Recevoir une base de données comprenant, pour différentes positions relatives d'un élément ultrasonore par rapport à une pièce de référence, un modèle d'au moins une surface de la pièce de référence dans une zone d'intérêt prédéterminée sous la forme d'une fonction continue donnant les coordonnées de la surface dans un repère lié à l'élément ultrasonore, la base de données comprenant en outre pour chaque modèle de surface, une estimation des coordonnées d'au moins un point d'impact, sur l'au moins une surface de la pièce, d'une onde ultrasonore se propageant depuis/vers l'élément ultrasonore vers/depuis un point de la pièce de référence prédéfini et/ou une estimation d'un temps de vol correspondant au trajet de la dite onde ultrasonore,
- Pour différentes positions du dispositif par rapport à la pièce:
  - i. Déterminer un modèle de la surface de la pièce dans la même zone d'intérêt sous la forme d'une fonction continue donnant les coordonnées de la surface dans un repère lié au dispositif,
  - ii. Déterminer, à partir de la base de données, un modèle de surface le plus proche du modèle de surface de la pièce et en déduire, à partir des points d'impact sauvegardés dans la base de données et/ou des temps de vol associés, un point d'impact et/ou un temps de vol d'une onde ultrasonore se propageant depuis/vers un élément du transducteur émetteur/récepteur vers/depuis un point de la pièce à imager de même coordonnées que le point P,
  - iii. Déterminer, à partir du point d'impact et/ou du temps de vol, un trajet de l'onde ultrasonore associé au point P.

[0015] Selon un aspect particulier de l'invention, l'étape de déterminer, à partir de la base de données, un modèle de surface le plus proche du modèle de surface de la pièce, est réalisée en recherchant dans la base de données la fonction continue la plus proche,

dans la zone d'intérêt, du modèle de la surface de la pièce puis en sélectionnant le point d'impact et/ou le temps de vol associé dans la base de données.

- [0016] Selon un aspect particulier de l'invention, l'étape de déterminer, à partir de la base de données, un modèle de surface le plus proche du modèle de surface de la pièce, est réalisée en sélectionnant dans la base de données les N fonctions continues les plus proches dans la zone d'intérêt avec N un entier strictement supérieur à 1, puis à déterminer le point d'impact ou le temps de vol par une interpolation des points d'impacts ou des temps de vols associés aux N fonctions continues sélectionnées.
- [0017] Selon un aspect particulier de l'invention, la fonction continue est une fonction polynômiale.
- [0018] Selon un aspect particulier de l'invention, les modèles de surface contenus dans la base de données sont générés aléatoirement ou à partir d'un échantillon de points appartenant à une surface de référence.
- [0019] Selon un aspect particulier de l'invention, la pièce comporte plusieurs surfaces correspondant à plusieurs interfaces entre différents milieux de propagation et la base de données comporte plusieurs modèles de surface pour un trajet entre un élément du dispositif et un point P de la pièce
- [0020] Selon un aspect particulier de l'invention, la zone d'intérêt de la pièce correspond à une fenêtre glissante de taille fixe qui se déplace sur la surface de la pièce avec le déplacement des transducteurs mobiles.
- [0021] Selon un aspect particulier de l'invention, la détermination d'une image de la pièce à imager à partir des temps de vol déterminés pour une pluralité de points P de ladite pièce à l'aide d'une méthode d'imagerie du type Focalisation en Tous Points FTP ou « Plane Wave Imaging » PWI.
- [0022] Dans une variante de réalisation, la méthode selon l'invention comprend en outre la détermination d'une loi de focalisation d'un faisceau en au moins un point P de la pièce à partir des temps de vol déterminés pour ledit point P.
- [0023] L'invention a aussi pour objet un dispositif de détermination de trajets d'ondes ultrasonores, le dispositif comprenant au moins un transducteur ultrasonore émetteur comprenant au moins un élément ultrasonore apte à émettre un signal ultrasonore dans une pièce et au moins un transducteur ultrasonore récepteur comprenant au moins un élément ultrasonore apte à recevoir l'un des signaux ultrasonores provenant de la pièce, les transducteurs étant mobiles par rapport à la pièce, le dispositif comprenant des moyens de stockage et des moyens de calcul configurés ensemble pour mettre en œuvre les étapes de la méthode selon l'invention.
- [0024] Selon un aspect particulier de l'invention, le transducteur ultrasonore émetteur et le transducteur ultrasonore récepteur sont réalisés par un seul et même transducteur.
- [0025] Dans une variante de réalisation, le dispositif selon l'invention comprend en outre

des moyens d'affichage de l'image de la pièce obtenue.

- [0026] L'invention a encore pour objet une méthode, mise en œuvre par ordinateur, de génération d'une base de données de trajets ultrasonores comprenant les étapes de :
- Déterminer, pour différentes positions relatives d'un élément ultrasonore par rapport à une pièce de référence, un modèle d'au moins une surface de la pièce de référence dans une zone d'intérêt prédéterminée sous la forme d'une fonction continue donnant les coordonnées de la surface dans un repère lié à l'élément ultrasonore,
  - Calculer, pour chaque trajet ultrasonore entre l'élément ultrasonore et un point de la pièce de référence à imager, les coordonnées d'au moins un point d'impact sur l'au moins une surface de la pièce de référence et/ou une estimation d'un temps de vol correspondant au trajet de la dite onde ultrasonore,
  - Construire une base de données comprenant pour chaque position relative d'un élément ultrasonore par rapport à une pièce de référence, le modèle d'au moins une surface de la pièce de référence, les coordonnées de l'au moins un point d'impact et/ou l'estimation du temps de vol.
- [0027] L'invention a encore pour objet un programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour la mise en œuvre de la méthode selon l'invention, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.
- [0028] L'invention a encore pour objet un support d'enregistrement lisible par ordinateur ou téléchargeable sur lequel est enregistré le programme d'ordinateur selon l'invention.
- [0029] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit en relation aux dessins annexés suivants.
- [0030] [Fig.1] représente un schéma d'un système d'inspection ultrasonore selon un mode de réalisation de l'invention,
- [0031] [Fig.2] représente un schéma illustrant un trajet d'une onde ultrasonore émise par un élément d'un transducteur,
- [0032] [Fig.3] représente un organigramme décrivant les étapes d'une méthode de génération d'une base de données de trajets ultrasonores selon un mode de réalisation de l'invention,
- [0033] [Fig.4a] représente un exemple de modélisation de différentes surfaces par des polynômes de degrés 3,
- [0034] [Fig.4b] représente un tableau des plages de variations des coefficients des polynômes de la [Fig.4a],
- [0035] [Fig.5] représente un organigramme décrivant les étapes d'une méthode d'imagerie ultrasonore selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0036] La [Fig.1] schématise un système d'inspection ultrasonore selon un mode de réalisation de l'invention. Un tel système est apte à mettre en œuvre un procédé

d'imagerie ultrasonore, selon l'invention, d'une structure S tridimensionnelle. Le système comprend au moins un transducteur comprenant un ou plusieurs éléments étant chacun apte à émettre des ondes ultrasonores. Le système comprend également au moins un transducteur comprenant un ou plusieurs éléments étant chacun apte à recevoir un trajet réfléchi de ces ondes sur la structure S. Dans la majorité des cas, ces deux transducteurs sont confondus, mais pour certaines applications ils peuvent être distincts. Dans d'autres cas d'applications, il peut y avoir plus d'un transducteur émetteur et/ou plus d'un transducteur récepteur. Sur la [Fig.1], on a représenté un cas d'application avec un seul transducteur TR. Les transducteurs peuvent être des transducteurs mono ou multi-éléments. Ils peuvent présenter différentes géométries de découpage, par exemple il peut s'agir d'un capteur linéaire, matriciel, annulaire ou sectoriel. Chaque élément du transducteur ultrasonore peut être réalisé au moyen d'un capteur piézo-électrique ou tout autre type de capteur apte à émettre et recevoir une onde ultrasonore.

- [0037] Le ou les transducteurs TR peuvent être positionnés au contact de la structure S à imager ou séparés de celle-ci par un coupleur, par exemple un liquide tel que de l'eau. Ils peuvent aussi être placés sur un sabot ayant une géométrie donnée qui sert de coupleur entre le capteur et la pièce.
- [0038] Le ou les transducteurs TR sont mobiles par rapport à la structure S et se déplacent selon un déplacement prédéfini, par exemple selon la direction D sur l'exemple de la [Fig.1]. Lorsque deux transducteurs sont utilisés respectivement pour l'émission et la réception des ondes ultrasonores, ils peuvent être liés mécaniquement ou non. Autrement dit, la distance entre les deux transducteurs peut être fixe ou variable selon le type de défaut à imager et la profondeur de la zone à imager.
- [0039] Le ou les transducteurs TR sont reliés à une unité de traitement couplée à une base de données pour mettre en œuvre le procédé d'imagerie selon l'invention.
- [0040] Le système d'inspection ultrasonore est configuré pour imager la structure S en différents points P situés dans une zone d'intérêt F qui se déplace avec le ou les transducteurs TR. Les points P sont repérés par leurs coordonnées (x,z) dans un repère fixe lié au transducteur pour un fonctionnement en deux dimensions ou (x,y,z) pour un fonctionnement en trois dimensions.
- [0041] La structure S peut être une pièce homogène et isotrope mais aussi une pièce hétérogène et/ou anisotrope.
- [0042] La zone d'intérêt F correspond à une fenêtre d'inspection glissante qui se déplace avec le transducteur TR de manière à balayer la surface de la structure à imager. La zone d'intérêt F est donc fixe dans le repère R lié au transducteur TR.
- [0043] Le déplacement D des capteurs peut être un déplacement rectiligne ou un déplacement plus complexe qui dépend de la géométrie de la pièce.

- [0044] La [Fig.2] schématise un trajet d'une onde ultrasonore émise par un élément  $E_i$  d'un transducteur TR situé à une hauteur  $z$  de la surface  $S$  d'une pièce à imager. Le trajet de l'onde entre l'émetteur  $E_i$  et un point  $P_j$  situé sur la ligne de focalisation  $L$  passe par un point d'impact  $I_j$  sur la surface  $S$  de la pièce qui constitue une interface de diffraction.
- [0045] Pour calculer le temps de vol de l'onde entre le point d'émission et le point à imager, il est nécessaire de calculer la distance parcourue par l'onde selon les segments  $[E_i I_j]$  et  $[I_j P_j]$  et donc au préalable de déterminer les coordonnées du point d'impact  $I_j$ . Ce calcul, basé sur la recherche du minimum du temps de vol entre le point d'émission et le point à imager nécessite une résolution analytique par itérations qui est complexe à mettre en œuvre.
- [0046] L'invention propose une nouvelle méthode permettant d'éviter de réaliser ce calcul coûteux pour chaque point de la structure à imager.
- [0047] Le procédé selon l'invention comporte deux phases : une première phase de construction d'une base de données de trajets ultrasons pour une structure  $S$  ou une pièce ayant une forme prédéfinie pour cette première phase, puis une seconde phase d'imagerie ultrasonore appliquée à une nouvelle pièce à imager, à partir des données sauvegardées dans la base de données pendant la première phase. Ainsi, lors de la seconde phase, il n'est pas nécessaire de réaliser un calcul complet des trajets ultrasonores pour tous les points à imager de la nouvelle pièce.
- [0048] La [Fig.3] schématise, sur un organigramme, les étapes de mise en œuvre d'une méthode de construction d'une base de données de trajets ultrasonores selon la première phase de l'invention.
- [0049] Dans cette première phase, on choisit une pièce ou une structure de référence ou de calibration à l'aide de laquelle la base de données de trajets ultrasonores est construite.
- [0050] On définit également une zone d'intérêt d'imagerie pour le transducteur, cette zone ayant des dimensions prédéfinies. Par exemple, si le transducteur est linéaire et effectue un déplacement rectiligne et que la structure à imager est invariante selon un axe, la zone d'intérêt peut consister en une fenêtre glissante  $F$  de dimension donnée qui se déplace avec le déplacement du capteur au-dessus de la pièce de sorte que la fenêtre d'intérêt est fixe dans un repère lié au capteur.
- [0051] Au contraire, si la structure est plus complexe et présente une surface qui varie selon trois dimensions, et que le ou les transducteurs présentent des découpages 2D (matriciel ou sectoriel), la zone d'intérêt  $F$  peut être une zone en trois dimensions, par exemple un cube ou un pavé de dimensions prédéfinies selon la dimension de la zone que l'on souhaite imager ou la résolution de l'imagerie. Les points  $P$  sont repérés par leurs coordonnées  $(x,y,z)$  dans un repère fixe lié au transducteur.
- [0052] La zone d'intérêt délimite la zone de la pièce à imager pour une position donnée du capteur.

- [0053] Sur la [Fig.2], on a représenté la zone d'intérêt F pour un élément  $E_i$  d'un transducteur. La phase de construction de la base de données illustrée à la [Fig.3] ne nécessite pas de mesures à partir d'un transducteur et d'une pièce, cette phase peut être entièrement réalisée par simulation. Pour cela, on considère un unique élément  $E_i$  dont la position bouge dans la zone d'intérêt F.
- [0054] La première étape 301 consiste à déterminer une description de la surface de la structure dans la zone d'intérêt dans le repère lié à l'élément  $E_i$ . Ainsi, pour chaque position de l'élément dans la zone d'intérêt, la description de la surface est différente car exprimée dans un repère différent. Cette description est réalisée en estimant une ou plusieurs fonctions qui permettent de définir la surface dans un repère lié au capteur. Par exemple, la fonction est une fonction polynomiale dont le degré dépend de la complexité de la structure. Par exemple, la fonction est un polynôme de degré  $n$  qui est défini par la relation suivante,  $n$  est un entier strictement positif par exemple égal à 3 :
- [0055] 
$$f(x) = \sum_{i=0}^n c_i x^i$$
- [0056] La fonction  $f(x)$  peut être obtenue par une régression polynomiale à l'aide d'un algorithme du type « Moving Least Square » ou MLS, tel que décrit dans la référence [5], qui prend en entrée un ensemble de points de la surface de la structure définis par leurs coordonnées dans un repère lié au capteur et dont l'origine se situe sur le premier élément du capteur.
- [0057] Si la surface à estimer est invariante selon l'axe  $y$ , un seul polynôme est nécessaire pour modéliser cette surface dans le plan  $(0,x,z)$ , ce polynôme étant identique pour toutes les valeurs de  $y$ . Si au contraire la surface ne présente pas de symétrie 2D de révolution ou d'extrusion, il est nécessaire d'introduire deux zones d'intérêt  $F_x$  et  $F_y$  (deux fenêtres glissantes) selon l'axe  $x$  et  $y$  et définir une fonction polynomiale de degré  $n$  du type :  $f(x, y) = \sum_{i,j=0}^n c_{ij} x^i y^j$
- [0058] A l'étape 302, on calcule, pour un ensemble de points d'intérêts  $P_j$  (point focal ou point à imager) de la pièce, un point d'impact  $I_{ij}$  et un trajet ultrasonore entre l'élément ultrasonore  $E_i$  et ledit point  $P_j$ .
- [0059] Ce calcul peut être réalisé par toute méthode connue de l'art antérieur, par exemple au moyen d'un algorithme itératif de Newton-Raphson décrit dans la référence [6] ou la méthode de force brute décrite dans la référence [7].
- [0060] Enfin, à l'étape 302, on stocke dans la base de données les coefficients du ou des polynôme(s) qui décrivent la surface de la pièce dans la zone d'intérêt pour chaque position de l'élément ultrasonore, les coordonnées de chaque point d'intérêt de la zone à imager, les coordonnées du point d'impact et le temps de vol du trajet pour chaque couple associant un émetteur à un point d'intérêt.
- [0061] Toutes les coordonnées des différents points sont exprimées dans un repère fixe lié à

l'élément ultrasonore. Ces étapes sont réitérées en déplaçant l'élément ultrasonore et la zone d'intérêt au-dessus de la pièce afin de couvrir toute la surface de la pièce.

- [0062] Dans une variante de réalisation, l'étape 301 n'est plus réalisée à partir d'une structure connue pour laquelle on dispose de coordonnées de points de la surface mais les polynômes décrivant une surface sont générés aléatoirement, par exemple en faisant varier les coefficients des polynômes dans des plages de valeurs prédéfinies. Autrement dit, les polynômes correspondent à une combinaison linéaire d'une base polynômiale qui permet de représenter exactement l'ensemble des polynômes décrivant la surface régulière de la pièce.
- [0063] A titre d'exemple, la [Fig.4a] représente un ensemble de polynômes obtenus à l'étape 301 pour différentes positions d'un élément ultrasonore E dans une fenêtre glissante F. Le capteur est disposé à une hauteur H de la surface et séparé de celle-ci par de l'eau. La [Fig.4b] donne un exemple de valeurs minimale et maximale des coefficients des polynômes de la [Fig.4a] qui sont de degrés 3 pour différentes positions de l'élément E, les polynômes étant tous représentés dans un repère lié à l'élément E.
- [0064] Dans une variante de réalisation, la méthode décrite ci-dessus est appliquée à l'identique pour plusieurs surfaces superposées dans le cas où l'on souhaite imager une structure composée de plusieurs milieux séparés par des interfaces. Par exemple dans le cas de l'imagerie transcrânienne, un crâne humain peut être modélisé par plusieurs couches correspondant à des milieux de propagation différents et séparés par des interfaces.
- [0065] Dans ce scénario, chaque surface est modélisée par une ou plusieurs fonctions et on calcule un trajet entre l'élément E et un point à imager, ce trajet traversant chaque surface en un point d'impact distinct, il y a donc autant de points d'impacts à calculer que de surfaces traversées par l'onde ultrasonore, chaque surface étant diffractante.
- [0066] La [Fig.5] représente les étapes d'une méthode d'imagerie selon un mode de réalisation de l'invention. Cette méthode correspond à la seconde phase de l'invention et exploite le contenu de la base de données construite lors de la première phase précédente.
- [0067] La méthode d'imagerie a pour objectif d'imager une pièce ou une structure tridimensionnelle ou un cerveau après traversée d'un crâne humain au moyen d'un transducteur mono élément ou multi éléments.
- [0068] Dans une première étape 501, on détermine une description de la ou des surface (s) de la pièce à imager à partir d'un échantillon de points appartenant à cette surface de la même manière qu'à l'étape 301 de la méthode décrite à la [Fig.3].
- [0069] Ensuite, on exploite la base de données BD déterminée lors de la première phase pour réaliser l'imagerie de la pièce avec une complexité de calcul réduite.
- [0070] Avantagusement, la pièce à imager présente une surface proche de celle utilisée

pour construire la base de données BD mais cela n'est pas obligatoire.

- [0071] A l'étape 502, on recherche, pour chaque point de la pièce à imager les éléments de la base de données BD les plus proches de la configuration recherchée. Autrement dit, on exprime les coordonnées du point d'intérêt dans le repère local lié au transducteur, puis on recherche dans la base BD, le point d'intérêt le plus proche. On recherche également, dans la base BD, le polynôme ou la combinaison polynomiale dont les coefficients sont les plus proches de ceux définissant la nouvelle surface tels qu'obtenus à l'étape 501.
- [0072] A l'étape 503, on extrait de la base de données le ou les point(s) d'impact(s) qui ont été précalculés pour le point d'intérêt et la surface identifié à l'étape 502. On peut extraire également directement le temps de vol associé précalculé.
- [0073] A partir du temps de vol obtenu, on réalise une étape d'imagerie 504 à l'aide d'une méthode connue par exemple du type focalisation en tous points FTP ou imagerie par onde plan (plane wave imaging PWI).
- [0074] Dans une variante de réalisation, l'étape d'imagerie 504 est remplacée par une étape de calcul de loi de retards pour générer un faisceau focalisé en un point de la zone ou en un nombre de points limités.
- [0075] Dans le cas d'une application de contrôle non destructif d'une pièce, la génération d'un faisceau focalisé en un point d'une zone permet d'éviter d'imager une zone entière d'une pièce lorsque des informations a priori sont disponibles sur l'emplacement du défaut.
- [0076] Dans le cas d'une application de thérapie par ultrasons, la génération d'un faisceau focalisé permet par exemple de focaliser des ultrasons de haute intensité pour chauffer et détruire certains tissus en un point précis.
- [0077] Dans tous les cas l'étape 504 consiste à calculer des lois de retards pour un ou plusieurs points d'une zone à partir des temps de vol calculés à l'étape 503.
- [0078] Les étapes 502 et 503 peuvent être réalisées de différentes manières. Par exemple, une interpolation peut être utilisée pour calculer un point d'impact à partir de plusieurs points d'impacts stockés dans la base de données BD et correspondant à plusieurs fonctions décrivant plusieurs surfaces les plus proches de la surface de la nouvelle pièce à imager. La proximité entre deux surfaces peut être déterminée en comparant les coefficients des fonctions polynomiales au moyen d'un critère d'erreur, par exemple un critère d'erreur quadratique ou un critère d'erreur terme à terme.
- [0079] Le point d'impact calculé par interpolation peut encore être affiné en recherchant le point appartenant réellement à la nouvelle surface telle que décrite à l'étape 501 et qui est le plus proche du point d'impact interpolé. Une fois le point d'impact calculé, on en déduit le temps de vol entre l'émetteur et le point d'intérêt par simple construction géométrique et à partir de la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde dans les

milieux traversés.

- [0080] L'interpolation utilisée peut être une interpolation linéaire ou bilinéaire, cubique ou bicubique ou encore une interpolation multivariée de type RBF ou Krigage tel que décrit dans les références [3], [4].
- [0081] La description de la surface de la nouvelle pièce obtenue à l'étape 501 ainsi que les calculs de points d'impacts et de temps de vol obtenus à l'étape 503 peuvent être utilisés pour enrichir la base de données BD avec ces nouveaux éléments.
- [0082] Alternativement, l'interpolation peut être appliquée directement aux valeurs de temps de vol stockées dans la base de données pour différentes surfaces les plus proches de la surface de la nouvelle pièce.
- [0083] La méthode décrite à la [Fig.5] peut être mise en œuvre au moyen du dispositif décrit à la [Fig.1].

### Références

- [0084] [1] C. Holmes, B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox, *Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-recvie array data for non-destructive evaluation*, NDT&E international, Vol. 38, pp. 701-711, 2005.
- [0085] [2] L. Le Jeune, S. Robert, E. Lopez Villaverde, C. Prada, "Plane Wave Imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging", *Ultrasonics* 64, 128-138 (2016). [DOI:10.1016/j.ultras.2015.08.008].
- [0086] [3] R. Miorelli, X. Artusi and C. Reboud, "An efficient adaptive database sampling strategy with applications to eddy current signals", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 80, January 2018, Pages 75-88.
- [0087] [4] S. Bilicz, M. Lambert and Sz. Gyimothy, "Kriging-based generation of optimal databases as forward and inverse surrogate models," *Inverse Problems*, 26 (2010), 074012.
- [0088] [5] H. ZHANG, C. GUO, X. SU, AND C. ZHU, « Measurement Data Fitting Based on Moving Least Squares Method », *Mathematical Problems in Engineering*, (2015).
- [0089] [6] « Outils d'optimisation pour la logistique théorie et pratique », Jean-Michel Réveillac, 2015
- [0090] [7] *Algorithme de Newton* : livre « Décomposition-coordination en optimisation déterministe et stochastique », Pierre Carpentier, Guy Cohen · 2017

## Revendications

[Revendication 1] Méthode de détermination de trajets d'ondes ultrasonores à l'aide d'un dispositif comprenant au moins un transducteur émetteur multi-éléments comprenant une pluralité d'éléments aptes à émettre un signal ultrasonore dans une zone d'une pièce et au moins un transducteur récepteur multi-éléments comprenant une pluralité d'éléments aptes à recevoir l'un des signaux ultrasonores provenant de la pièce, le transducteur émetteur et le transducteur récepteur étant mobiles par rapport à la pièce, la méthode comprenant les étapes de :

- Recevoir une base de données (BD) comprenant, pour différentes positions relatives d'un élément ultrasonore ( $E_i$ ) par rapport à une pièce de référence, un modèle d'au moins une surface (S) de la pièce de référence dans une zone d'intérêt prédéterminée (F) sous la forme d'une fonction continue donnant les coordonnées de la surface (S) dans un repère lié à l'élément ultrasonore ( $E_i$ ), la base de données (BD) comprenant en outre pour chaque modèle de surface, une estimation des coordonnées d'au moins un point d'impact ( $I_{i,j}$ ), sur l'au moins une surface (S) de la pièce, d'une onde ultrasonore se propageant depuis/vers l'élément ultrasonore ( $E_i$ ) vers/ depuis un point ( $P_j$ ) de la pièce de référence prédéfini et/ou une estimation d'un temps de vol correspondant au trajet de la dite onde ultrasonore,
- Pour différentes positions du dispositif par rapport à la pièce:
  - i. Déterminer (501) un modèle de la surface de la pièce dans la même zone d'intérêt sous la forme d'une fonction continue donnant les coordonnées de la surface dans un repère lié au dispositif,
  - ii. Déterminer (502), à partir de la base de données (BD), un modèle de surface le plus proche du modèle de surface de la pièce et en déduire (503), à partir des points d'impact sauvegardés dans la base de données et/ou des temps de vol associés, un point d'impact et/ou un temps de vol d'une onde ultrasonore se propageant depuis/vers un élément du transducteur émetteur/récepteur vers/ depuis un point de la pièce à imager de même coordonnées que le point P,

- iii. Déterminer (504), à partir du point d'impact et/ou du temps de vol, un trajet de l'onde ultrasonore associé au point P.

- [Revendication 2] Méthode selon la revendication 1 dans laquelle l'étape de déterminer (502), à partir de la base de données (BD), un modèle de surface le plus proche du modèle de surface de la pièce, est réalisée en recherchant dans la base de données (BD) la fonction continue la plus proche, dans la zone d'intérêt, du modèle de la surface de la pièce puis en sélectionnant (503) le point d'impact et/ou le temps de vol associé dans la base de données.
- [Revendication 3] Méthode selon la revendication 1 dans laquelle l'étape de déterminer (502), à partir de la base de données (BD), un modèle de surface le plus proche du modèle de surface de la pièce, est réalisée en sélectionnant dans la base de données (BD) les N fonctions continues les plus proches dans la zone d'intérêt avec N un entier strictement supérieur à 1, puis à déterminer (503) le point d'impact ou le temps de vol par une interpolation des points d'impacts ou des temps de vols associés aux N fonctions continues sélectionnées.
- [Revendication 4] Méthode selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle la fonction continue est une fonction polynômiale.
- [Revendication 5] Méthode selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle les modèles de surface contenus dans la base de données sont générés aléatoirement ou à partir d'un échantillon de points appartenant à une surface de référence.
- [Revendication 6] Méthode selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle la pièce comporte plusieurs surfaces correspondant à plusieurs interfaces entre différents milieux de propagation et la base de données comporte plusieurs modèles de surface pour un trajet entre un élément du dispositif et un point P de la pièce
- [Revendication 7] Méthode selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle la zone d'intérêt (F) de la pièce correspond à une fenêtre glissante de taille fixe qui se déplace sur la surface de la pièce avec le déplacement des transducteurs mobiles.
- [Revendication 8] Méthode selon l'une quelconque des revendications précédentes comprenant en outre la détermination (504) d'une image de la pièce à imager à partir des temps de vol déterminés pour une pluralité de points

- P de ladite pièce à l'aide d'une méthode d'imagerie du type Focalisation en Tous Points FTP ou « Plane Wave Imaging » PWI.
- [Revendication 9] Méthode selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 comprenant en outre la détermination d'une loi de focalisation d'un faisceau en au moins un point P de la pièce à partir des temps de vol déterminés pour ledit point P.
- [Revendication 10] Dispositif de détermination de trajets d'ondes ultrasonores, le dispositif comprenant au moins un transducteur ultrasonore émetteur comprenant au moins un élément ultrasonore apte à émettre un signal ultrasonore dans une pièce et au moins un transducteur ultrasonore récepteur comprenant au moins un élément ultrasonore apte à recevoir l'un des signaux ultrasonores provenant de la pièce, les transducteurs étant mobiles par rapport à la pièce, le dispositif comprenant des moyens de stockage et des moyens de calcul (UT) configurés ensemble pour mettre en œuvre les étapes de la méthode selon l'une quelconque des revendications précédentes.
- [Revendication 11] Dispositif selon la revendication 10 dans lequel le transducteur ultrasonore émetteur et le transducteur ultrasonore récepteur sont réalisés par un seul et même transducteur (TR).
- [Revendication 12] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 10 ou 11 comprenant en outre des moyens d'affichage de l'image de la pièce obtenue.
- [Revendication 13] Méthode, mise en œuvre par ordinateur, de génération d'une base de données (BD) de trajets ultrasonores comprenant les étapes de :
- Déterminer (301), pour différentes positions relatives d'un élément ultrasonore ( $E_i$ ) par rapport à une pièce de référence, un modèle d'au moins une surface (S) de la pièce de référence dans une zone d'intérêt prédéterminée (F) sous la forme d'une fonction continue donnant les coordonnées de la surface (S) dans un repère lié à l'élément ultrasonore ( $E_i$ ),
  - Calculer (302), pour chaque trajet ultrasonore entre l'élément ultrasonore ( $E_i$ ) et un point ( $P_j$ ) de la pièce de référence à imager, les coordonnées d'au moins un point d'impact sur l'au moins une surface de la pièce de référence et/ou une estimation d'un temps de vol correspondant au trajet de la dite onde ultrasonore,
  - Construire (302) une base de données (BD) comprenant pour

chaque position relative d'un élément ultrasonore par rapport à une pièce de référence, le modèle d'au moins une surface de la pièce de référence, les coordonnées de l'au moins un point d'impact et/ou l'estimation du temps de vol.

[Revendication 14] Programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour la mise en œuvre de la méthode selon la revendication 13, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[Revendication 15] Support d'enregistrement lisible par ordinateur ou téléchargeable sur lequel est enregistré le programme d'ordinateur selon la revendication 14.

[Fig. 1]

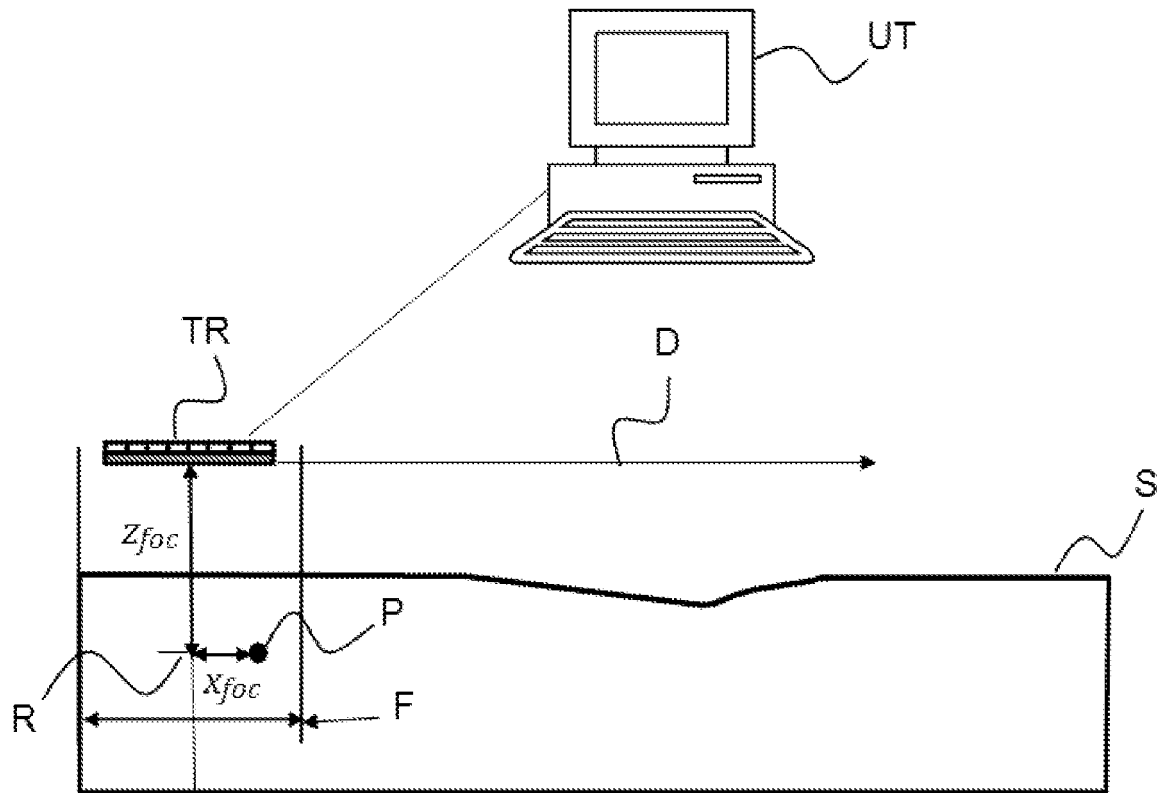


FIG.1

[Fig. 2]

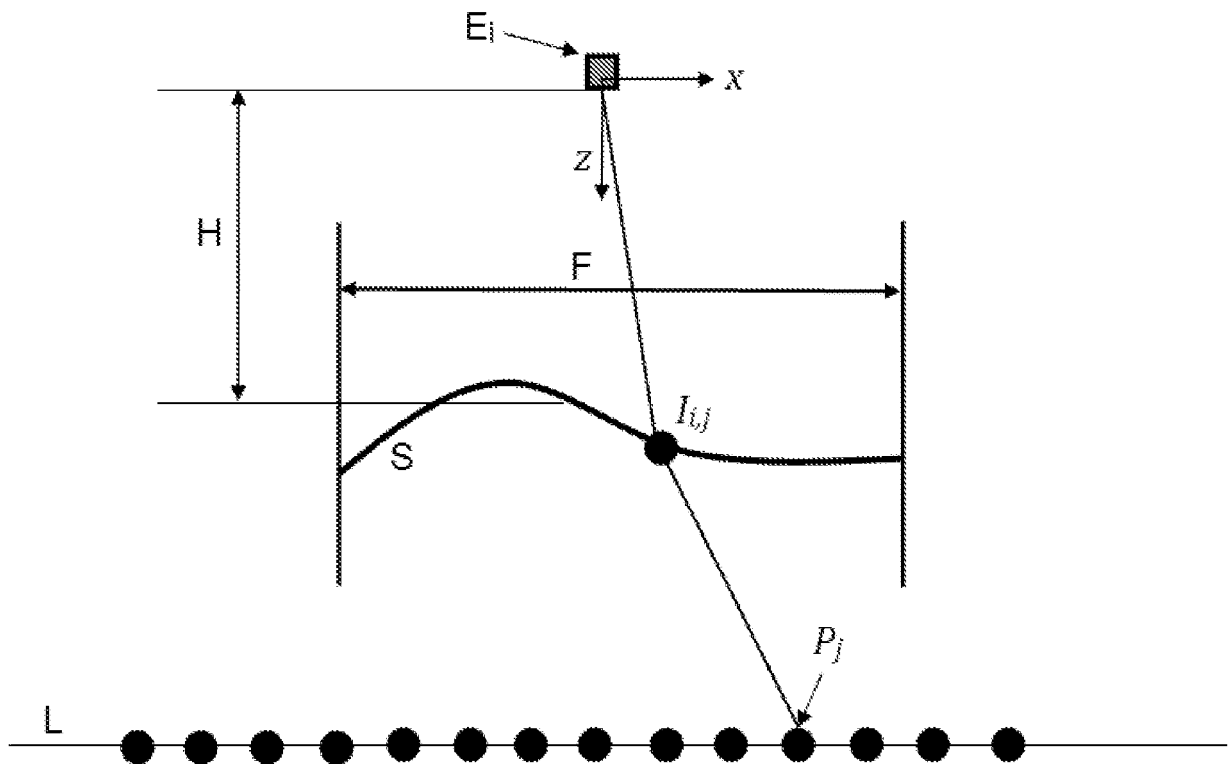


FIG.2

[Fig. 3]

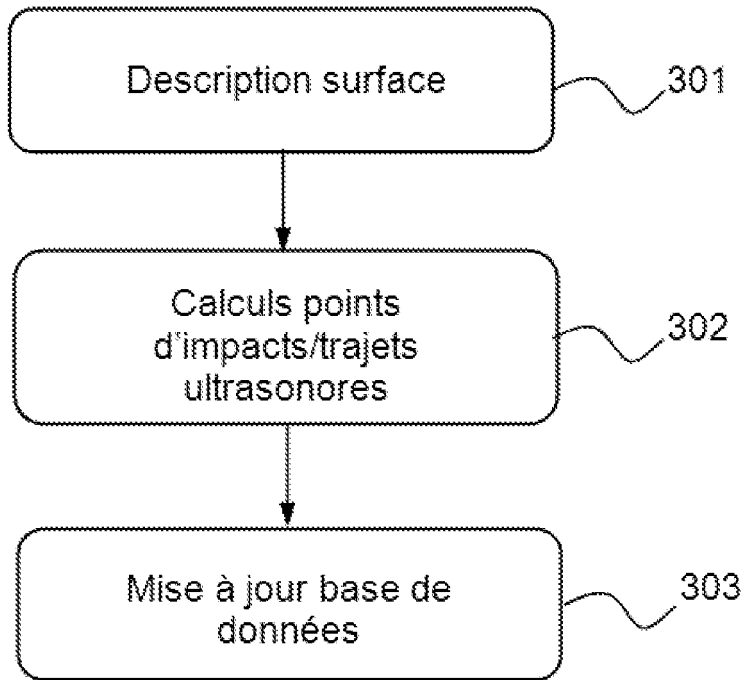


FIG.3

[Fig. 4a]

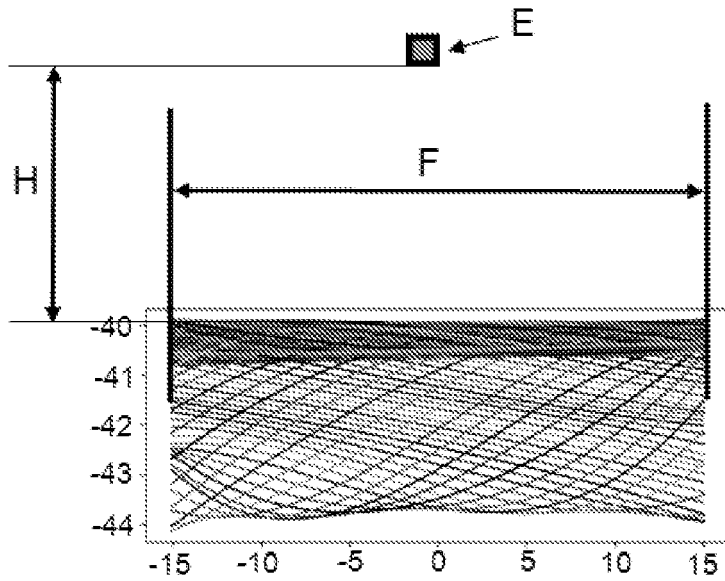


FIG.4a

[Fig. 4b]

	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
min	-43.7	-0.097	-0.0057	-0.00053
max	-39.94	0.22	0.0093	0.00041

FIG.4b

[Fig. 5]

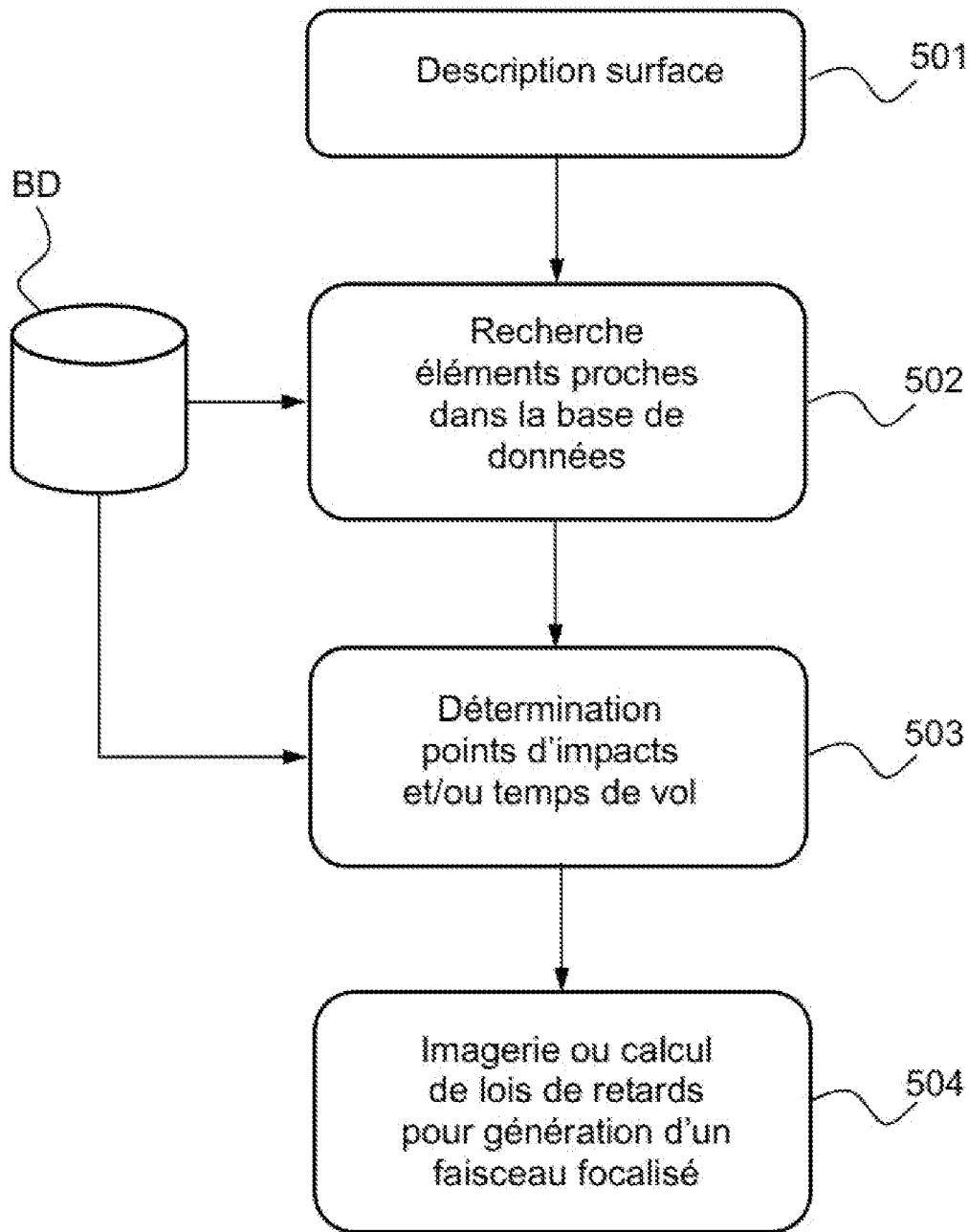


FIG.5

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

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

**FA 910671**  
**FR 2207753**

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		
<b>X</b>	<b>EP 3 553 561 A2 (ONTARIO POWER GENERATION INC [CA]) 16 octobre 2019 (2019-10-16)</b> <b>* le document en entier *</b> -----	<b>1-15</b>	<b>G01N29/44</b> <b>G01N29/04</b>
<b>A</b>	<b>US 2010/179428 A1 (PEDERSEN PEDER C [US] ET AL) 15 juillet 2010 (2010-07-15)</b> <b>* le document en entier *</b> -----	<b>1-15</b>	
			<b>DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)</b>
			<b>G01N</b> <b>A61B</b>
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
<b>20 mars 2023</b>		<b>Roetsch, Patrice</b>	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>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</p> <p>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                      .....                      &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2207753 FA 910671**

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 **20-03-2023**  
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
<b>EP 3553561</b>	<b>A2</b>	<b>16-10-2019</b>	<b>CA 2849778 A1</b>	<b>04-04-2013</b>
			<b>CA 3000420 A1</b>	<b>04-04-2013</b>
			<b>CA 3046234 A1</b>	<b>04-04-2013</b>
			<b>CA 3129795 A1</b>	<b>04-04-2013</b>
			<b>CN 103946719 A</b>	<b>23-07-2014</b>
			<b>CN 105549016 A</b>	<b>04-05-2016</b>
			<b>EP 2748631 A1</b>	<b>02-07-2014</b>
			<b>EP 3553561 A2</b>	<b>16-10-2019</b>
			<b>JP 6224594 B2</b>	<b>01-11-2017</b>
			<b>JP 6509975 B2</b>	<b>08-05-2019</b>
			<b>JP 2014528083 A</b>	<b>23-10-2014</b>
			<b>JP 2017207517 A</b>	<b>24-11-2017</b>
			<b>KR 20140068237 A</b>	<b>05-06-2014</b>
			<b>KR 20180116452 A</b>	<b>24-10-2018</b>
			<b>KR 20190119187 A</b>	<b>21-10-2019</b>
			<b>US 2014238136 A1</b>	<b>28-08-2014</b>
			<b>US 2017219534 A1</b>	<b>03-08-2017</b>
			<b>US 2017234838 A1</b>	<b>17-08-2017</b>
			<b>US 2020088691 A1</b>	<b>19-03-2020</b>
			<b>WO 2013044350 A1</b>	<b>04-04-2013</b>
-----				
<b>US 2010179428</b>	<b>A1</b>	<b>15-07-2010</b>	<b>US 2010179428 A1</b>	<b>15-07-2010</b>
			<b>WO 2009117419 A2</b>	<b>24-09-2009</b>
-----				