

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑫② Date de dépôt : 24.09.21.

⑫③ Priorité :

⑫④ Date de mise à la disposition du public de la
demande : 31.03.23 Bulletin 23/13.

⑫⑤ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑫⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : E-SCOPICS Société par actions sim-
plifiée — FR.

⑦② Inventeur(s) : Hériard-Dubreuil Baptiste, Besson
Adrien, Wintzenrieth Frédéric et Cohen-Bacrie Claude.

⑦③ Titulaire(s) : E-SCOPICS Société par actions simpli-
fiée.

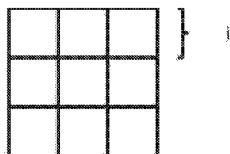
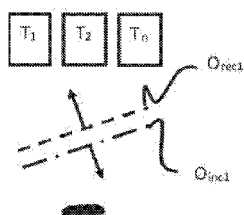
⑦④ Mandataire(s) : CABINET LTL.

⑤④ PROCÉDE ET DISPOSITIF D'ANALYSE D'UN MILIEU.

⑤⑦ L'invention concerne un procédé et un dispositif
d'analyse d'un milieu basé sur :

l'émission d'ondes planes ou spirales d'émission
(Oinc1) ayant chacune un angle d'émission respectif, la ré-
ception de signaux de réception représentatifs d'ondes
planes ou spirales de réception (Orec1) ayant chacune un
angle de réception respectif, chaque signal de réception in-
cluant une composante de diffusion simple et une compo-
sante de diffusion multiple, le traitement des signaux de
réception pour extraire la composante de diffusion simple et/
ou la composante de diffusion multiple desdits signaux de
réception.

Figure à publier avec l'abrégié : Fig. 6a



Description

Titre de l'invention : PROCÉDE ET DISPOSITIF D'ANALYSE D'UN MILIEU

DOMAINE DE L'INVENTION

- [0001] La présente invention concerne le domaine technique général de l'analyse d'un milieu par propagation d'ondes, et notamment d'ondes sonores ou ultrasonores, ou électromagnétiques.
- [0002] Plus précisément, la présente invention concerne un procédé et un dispositif pour l'analyse d'un objet cible, ou d'un milieu diffus tel qu'un tissu biologique, humain ou animal.
- [0003] Cette analyse peut consister en :
- l'estimation d'un paramètre caractéristique du milieu, et/ou
 - la détection d'un point singulier du milieu, et/ou
 - la réalisation d'une image du milieu.
- [0004] Dans la suite, la présente invention sera décrite en référence à l'imagerie médicale par ultrasons, étant entendu que les enseignements décrits ici peuvent être utilisés dans d'autres types d'applications (ultrasons non médicaux, SONAR, RADAR, etc.) utilisant des ondes dont l'amplitude, la fréquence et la phase sont contrôlables (i.e. ondes cohérentes).
- [0005] **ARRIERE PLAN DE L'INVENTION**
- [0006] *1. Principe général de la diffusion*
- [0007] On connaît différentes solutions d'analyse d'un milieu utilisant le principe de diffusion d'une onde. Afin de simplifier le propos, une description discrète est adoptée ici bien que la réalité de la diffusion est continue.
- [0008] En référence à la [Fig.1], la diffusion est un phénomène par lequel une onde UE est déviée et redistribuée dans diverses directions U1, U2, P, Ech1 par une interaction avec un « *objet diffuseur* » Ob1 contenu dans un milieu.
- [0009] Les solutions d'analyse consistent généralement à :
- émettre, grâce à un émetteur E, une onde d'excitation UE dans le milieu à analyser,
 - recevoir, grâce à un récepteur R, des échos acoustiques Ech₁, Ech₂ suite à la diffusion de l'onde d'excitation incidente UE par un (ou plusieurs) objet(s) diffuseur(s) Ob₁, Ob₂ contenu(s) dans le milieu et les convertir en signaux de réception,
 - traiter les signaux de réception pour extraire une information sur le milieu.
- [0010] Les signaux de réception sont constitués de deux composantes :

- une composante dite de « *diffusion simple* », et
- une composante dite de « *diffusion multiple* ».

- [0011] Plus précisément et comme rappelé précédemment, la diffusion de l'onde induit sa déviation et sa redistribution dans diverses directions, de sorte que certaines parties P de l'onde déviée peuvent interagir avec d'autres objets diffuseurs Ob2 contenus dans le milieu avant d'être reçues par le récepteur R.
- [0012] Les parties Ech₁ de l'onde déviée qui sont captées par le récepteur R avant d'interagir avec d'autres objets diffuseurs Ob₂ constituent la composante de diffusion simple.
- [0013] Les parties Ech₂ de l'onde déviées qui sont captées par le récepteur R après avoir interagi avec plusieurs objets récepteurs Ob₁, Ob₂ constituent la composante de diffusion multiple. Ici la description s'est limitée à 2 objets diffuseurs mais est bien entendue généralisable à un plus grand nombre de diffuseurs.
- [0014] Les solutions d'analyse d'un milieu utilisent généralement la composante de diffusion simple des signaux de réception (à chaque instant donné de réception d'un écho, la mesure du temps écoulé entre l'émission et la réception de sa composante de diffusion simple associée est représentative de la position de l'objet diffuseur).
- [0015] Toutefois, la composante de diffusion simple étant combinée à la composante de diffusion multiple, ces techniques ne sont pas applicables à des milieux incluant un grand nombre d'objets diffuseurs Ob₁, Ob₂, ou si les diffuseurs présents dans le milieu ont un pouvoir diffusant élevé.
- [0016] 2. WO 2010/001027
- [0017] Pour pallier cet inconvénient, il a été proposé dans le document WO 2010/001027 un procédé permettant de séparer les composantes simple et multiple des signaux de réception grâce à une technique de filtrage d'une matrice de réponses impulsives inter-éléments par projection ou par décomposition en valeurs singulières.
- [0018] Ce procédé est basé sur les étapes suivantes :
- enregistrement de réponses inter-éléments pour chaque paire émetteur/récepteur d'un ensemble d'émetteurs/récepteurs,
 - détermination d'une matrice de réponse inter-éléments fenêtrée temporellement K à partir des réponses inter-éléments, chaque élément/coefficient K_{ij} de la matrice de réponse inter-éléments fenêtrée temporellement K correspondant au signal reçu par un récepteur n°j suite à l'émission d'une onde par l'émetteur n°i,
 - traitement de la matrice de réponse inter-éléments fenêtrée temporellement K, l'étape de traitement consistant à séparer :
 - la composante de diffusion multiple,
 - de la composante de diffusion simple,
 dans la matrice de réponse inter-éléments fenêtrée temporellement K en fonction de

la cohérence des coefficients de la matrice de réponse inter-éléments fenêtrée temporellement K sur chaque antidiagonale de ladite matrice de réponse inter-éléments fenêtrée temporellement K .

[0019] 2.1. Etape d'enregistrement

[0020] En référence aux figures 2a à 2d, le principe d'enregistrement d'une réponse inter-éléments d'une paire émetteur/récepteur d'un ensemble d'émetteurs/récepteurs E_1 - E_n / R_1 - R_n est le suivant.

[0021] Une onde incidente Inc correspondant à un signal impulsif est envoyée depuis chaque émetteur (E_1 sur les figures 2a à 2c, E_2 sur la [Fig.2d], etc.) au cours d'une étape d'émission, et l'onde réfléchie Ref par le milieu suite à l'émission de cette onde incidente Inc, est enregistrée par chaque récepteur (R_1 sur la [Fig.2a], R_2 sur la [Fig.2b], R_n sur la [Fig.2c], etc.) au cours d'une étape de mesure.

[0022] Ces étapes d'émission et de mesure sont répétées pour tous les couples émetteurs/récepteurs (E_1, R_1), (E_1, R_2), (E_1, R_n), (E_2, R_1), ... (E_n, R_n) possibles de l'ensemble d'émetteurs/récepteurs afin d'enregistrer toutes les réponses inter-éléments de l'ensemble d'émetteurs/récepteurs.

[0023]

[0024] Pour limiter le temps nécessaire à l'acquisition des couples émetteurs/récepteurs (E_1, R_1), (E_1, R_2), (E_1, R_n), (E_2, R_1), ... (E_n, R_n), chaque émetteur E_1 (respectivement E_2 , respectivement E_n) de l'ensemble d'émetteur E_1 - E_n peut être activé successivement, l'ensemble des récepteurs R_1 - R_n étant activés simultanément en réception pour l'acquisition simultanée d'un ensemble de couples (E_1, R_1), (E_1, R_2), (E_1, R_n) (respectivement (E_2, R_1), (E_2, R_2), (E_2, R_n), respectivement (E_n, R_1), (E_n, R_2), (E_n, R_n)) associé à l'émission d'une onde incidente par l'émetteur E_1 (respectivement E_2 , respectivement E_n) activé.

[0025] 2.2. Détermination de la matrice de réponse

[0026] Physiquement, le principe de construction d'une ligne « i » d'une matrice de réponse inter-éléments fenêtrée temporellement K consiste :

- pour l'émetteur n° i , à émettre une onde ultrasonore (émetteur E_i dans le cas des figures 2a à 2c),
- pour chaque récepteur n° j de l'ensemble des récepteurs, à recevoir un écho acoustique et le convertir en un signal de réception associé (R_j - R_n dans le cas des figures 2a à 2c) dépendant du temps,
- tronquer (i.e. fenêtrer) les signaux de réception dépendant du temps en une fenêtre de temps de durée Δt et centrée autour d'un temps t (qui peut par exemple correspondre à un temps de vol de l'onde ultrasonore pour atteindre une profondeur d'intérêt dans le milieu).

[0027] Ces étapes sont répétées pour chaque ligne de la matrice. Plus précisément, une fois

que tous les récepteurs R_1 - R_n de l'ensemble d'émetteurs/récepteurs ont reçus un écho acoustique et que les signaux de réception ont été fenêtrés, la ligne « i » de la matrice inter-éléments est déterminée.

[0028] La construction de la ligne « $i+1$ » de la matrice inter-éléments peut ensuite être initiée en activant l'émetteur $n^{\circ}i+1$ de l'ensemble d'émetteurs/récepteurs (E_2 dans le cas de la [Fig.2d]) pour émettre une onde ultrasonore, en activant tous les récepteurs $n^{\circ}j$ de l'ensemble d'émetteurs/récepteurs pour recevoir respectivement un écho acoustique et le convertir en un signal de réception associé dépendant du temps, et en fenêtrant les signaux de réception.

[0029] 2.3. Inconvénients de WO 2010/001027

[0030] Toutefois, pour obtenir les coefficients anti-diagonaux de la matrice inter-éléments selon la méthode dans WO 2010/001027, de nombreuses approximations sont effectuées.

[0031] En effet, la forme de la matrice inter-éléments n'est pas totalement antidiagonale, comme illustré à la [Fig.3] où l'on observe un comportement plus complexe qu'une simple constance sur les antidiagonales. Les antidiagonales paraissent en effet être incurvées, ce qui peut être pris en compte dans le modèle mais le complexifie significativement.

[0032] Ces approximations dégradent la qualité de séparation des composantes de diffusion simple et multiple.

[0033] Un autre inconvénient de la méthode décrite dans WO 2010/001027 concerne le grand nombre d'émissions d'ondes successives nécessaires pour l'acquisition des couples émetteurs/récepteurs.

[0034] En effet, lors de l'acquisition de ces couples émetteurs/récepteurs, l'ensemble d'émetteurs/récepteurs et le milieu doivent rester immobiles l'un par rapport à l'autre afin de garantir que les signaux de réception acquis par tous les récepteurs sont représentatifs d'un même milieu (c'est à dire d'un milieu n'a pas évolué, notamment en termes de position).

[0035] Or, un ensemble d'émetteurs/récepteurs comprend classiquement 128 éléments ou plus.

[0036] Avec la méthode selon WO 2010/001027, la position du milieu doit donc rester invariante durant la mise en œuvre des 128 émissions successives et des 128 réceptions associées.

[0037] Ceci peut être difficile à réaliser, par exemple lorsque le milieu est un organe d'un patient vivant, et/ou lorsque l'ensemble d'émetteurs/récepteurs est intégré dans une sonde manipulée par un praticien.

[0038] Un dernier inconvénient de la méthode décrite dans WO 2010/001027 concerne le faible rapport signal à bruit ainsi que la faible pénétration de la transmission faite avec

un élément. Ceci peut significativement limiter la profondeur exploitable par une telle méthode.

[0039] Un but de la présente invention est de proposer un procédé et un dispositif d'analyse d'un milieu permettant de remédier à au moins l'un des inconvénients précités.

[0040] **BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION**

[0041] A cet effet, l'invention propose un procédé d'analyse d'un milieu à partir d'un réseau de transducteurs virtuels, ledit procédé comprenant :

- la génération dans un milieu diffusant, par des transducteurs du réseau, d'une onde plane ou spirale d'émission ayant un angle d'émission souhaité relativement au réseau de transducteurs,
- la réception, par des transducteurs du réseau, de signaux de réception et leurs combinaisons pour obtenir des signaux résultants représentatifs de plusieurs ondes planes ou spirales de réception réverbérées par le milieu diffusant, lesdites ondes planes ou spirales de réception ayant des angles de réception respectifs relativement au réseau, les signaux résultants de ces ondes planes ou spirales de réception comprenant :
 - une composante de diffusion simple, représentative de trajets d'onde résultant d'une seule réflexion de l'onde plane ou spirale d'émission sur un diffuseur du milieu diffusant,
 - une composante de diffusion multiple, représentative de trajets d'onde résultant de plusieurs réflexions successives de l'onde plane ou spirale d'émission sur des diffuseurs du milieu diffusant avant d'atteindre les transducteurs du réseau de transducteurs,
- la répétition des étapes de génération et de réception pour une pluralité d'ondes planes ou spirales d'émission ayant chacune un angle d'émission associé,
- le traitement des signaux de réception pour déterminer des caractéristiques du milieu,

remarquable en ce que la phase de traitement comprend une étape de séparation de la composante de diffusion simple et de la composante de diffusion multiple, dans lesdits signaux de réception.

[0042] Des aspects préférés mais non limitatifs de l'invention sont les suivants :

- chaque étape de génération peut comprendre la sous-étape consistant à :
 - activer en émission des transducteurs du réseau selon une loi de retard d'activation respective, de sorte que chaque transducteur émet une onde ultrasonore élémentaire à un instant respectif en fonction de ladite loi de retard d'activation, lesdites ondes ultrasonores élémentaires se combinant pour former l'onde plane ou spirale

d'émission ayant l'angle d'émission souhaité, l'angle d'émission de l'onde plane ou spirale d'émission dépendant de la loi de retard d'activation utilisée ;

- chaque étape de réception peut comprendre les sous-étapes consistant à :
 - activer en réception des transducteurs du réseau selon une loi de retard d'activation respective, de sorte que chaque transducteur enregistre un signal reçu élémentaire correspondant à une portion de l'onde plane ou spirale de réception ayant un angle de réception souhaité, l'angle de réception souhaité dépendant de la loi de retard d'activation utilisée,
 - combiner les signaux reçus élémentaires pour former un signal de réception correspondant à l'onde plane ou spirale de réception ayant l'angle de réception souhaité ;
- chaque étape de réception peut comprendre les sous-étapes consistant à :
 - activer simultanément les transducteurs en réception, chaque transducteur enregistrant un signal capté représentatif de plusieurs ondes réverbérées par le milieu,
 - combiner les signaux captés selon différentes lois de retard temporelles pour former des signaux de réception représentatifs des ondes planes ou spirales de réception, ladite sous-étape consistant à combiner les signaux, comprenant, pour chaque signal de réception représentatif d'une onde plane ou spirale de réception ayant un angle de réception souhaité, les phases suivantes :
 - pour chaque signal capté, décaler temporellement le signal capté en fonction d'une loi de retard temporelle pour obtenir un signal décalé, chaque loi de retard temporelle utilisée étant associée à un angle de réception souhaité respectif,
 - sommer les signaux décalés pour obtenir le signal de réception représentatif de l'onde plane ou spirale de réception ayant l'angle de réception souhaité ;
- l'étape de séparation peut inclure une sous-étape de filtrage d'au moins une matrice inter-angles fenêtrée représentative des angles d'émission et de réception des ondes planes ou spirales d'émission et de réception :
 - chaque ligne de la matrice inter-angles fenêtrée étant représentative de l'angle d'émission d'une onde plane ou spirale d'émission, et
 - chaque colonne de la matrice inter-angles fenêtrée étant représentative d'un angle de réception d'une onde plane ou spirale de réception ;

- l'étape de séparation peut également comprendre les sous-étapes suivantes :
 - détermination d'une pluralité de matrices inter-angles fenêtrées, chaque matrice inter-angle fenêtrée correspondant à une matrice temporelle définissant, sur une fenêtre temporelle voisine d'un temps T et de durée Δt , des couples d'angles d'émission et de réception d'ondes planes ou spirales d'émission et de réception,
 - puis pour chaque matrice inter-angles fenêtrée :
 - estimation d'une première matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion simple,
 - estimation d'une deuxième matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion multiple ;
- avantageusement, pour chaque matrice inter-angles fenêtrée :
 - la sous-étape d'estimation d'une première matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion simple peut consister à calculer une matrice de Hankel à partir de la matrice inter-angles fenêtrée considérée, ladite matrice de Hankel ayant des coefficients constants sur chaque antidiagonale ascendante,
 - la sous-étape d'estimation d'une deuxième matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion multiple peut consister à soustraire la matrice de Hankel estimée à la matrice inter-angles fenêtrée ;
- la matrice de Hankel peut consister en une matrice unique ayant le plus de similarités, selon une norme de Frobenius, avec la matrice inter-angle fenêtrée considérée ;
- pour chaque matrice inter-angles fenêtrée, les sous-étapes d'estimation des première et deuxième matrices inter-angles résultantes peuvent comprendre le filtrage de la matrice inter-angles fenêtrée considérée en fonction de la cohérence des coefficients sur chaque diagonale ascendante de ladite matrice inter-angles fenêtrée considérée ;
- le filtrage de la matrice inter-angles fenêtrée considérée peut comprendre :
 - la rotation de la matrice inter-angles d'un angle de 45° pour obtenir au moins une matrice pivotée,
 - la décomposition en au moins une valeur singulière de chaque matrice pivotée pour obtenir une matrice décomposée,
 - la soustraction de la matrice décomposée à ladite matrice pivotée pour obtenir une matrice soustraite,
 - la rotation inverse de la matrice décomposée d'un angle de -45° pour obtenir la première matrice inter-angles résultante représentative de

- la composante de diffusion simple,
- la rotation inverse de la matrice soustraite d'un angle de -45° pour obtenir la deuxième matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion multiple ;
- dans une variante de réalisation, le réseau de transducteurs peut comprendre une pluralité de transducteurs s'étendant le long d'au moins une ligne de sorte à présenter une forme sensiblement plane :
 - l'onde générée durant l'étape de génération consistant en une onde plane,
 - les signaux combinés durant l'étape de réception étant représentatifs d'ondes planes de réception,
 - chaque loi de retard d'activation consistant en une loi de retard linéaire appliquée aux transducteurs s'étendant le long d'au moins une ligne ;
- dans une autre variante de réalisation, le réseau de transducteurs peut comprendre une pluralité de transducteurs s'étendant le long d'au moins un rayon de courbure de sorte à présenter une forme convexe :
 - l'onde générée durant l'étape de génération consistant en une onde spirale,
 - les signaux combinés durant l'étape de réception étant représentatifs d'ondes spirales de réception,
 - chaque loi de retard d'activation consistant en une loi de retard linéaire appliquée aux transducteurs s'étendant le long d'au moins un rayon de courbure.

Brève description des dessins

[0043] D'autres avantages et caractéristiques de la sonde selon l'invention ressortiront mieux de la description qui va suivre de plusieurs variantes d'exécution, données à titre d'exemples non limitatifs, à partir des dessins annexés sur lesquels :

- [Fig.1] est une représentation schématique illustrant le principe de diffusion d'une onde,
- [Fig.2a][Fig.2b][Fig.2c][Fig.2d] sont des représentations schématiques illustrant le principe de détermination d'une matrice inter-éléments,
- [Fig.3] illustre une partie réelle d'une matrice inter-éléments,
- [Fig.4] est une représentation schématique d'un dispositif d'imagerie par ultrasons incluant une sonde d'acquisition et une (ou plusieurs) unité(s) de calcul,
- [Fig.5] est une représentation schématique illustrant le principe d'émission

- d'une onde plane à partir d'un réseau de transducteurs,
- [Fig.6a][Fig.6b][Fig.6c][Fig.6d] sont des représentations schématiques illustrant le principe de détermination d'une matrice inter-angles,
- [Fig.7] illustre une partie réelle d'une matrice inter-angles fenêtrée,
- [Fig.8] est une représentation schématique des étapes d'une méthode de séparation par décomposition en valeurs singulières,
- [Fig.9a][Fig.9b][Fig.9c][Fig.9d] illustrent schématiquement une technique de rotation d'une matrice par interpolation bidimensionnelle,
- [Fig.10] illustre schématiquement une technique de rotation d'une matrice par sélection de coefficients,
- [Fig.11] est une représentation schématique d'ondes plane et spirale émise par des réseaux de transducteurs plan et courbe.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0044] On va maintenant décrire plus en détails différents modes de réalisation du procédé et du dispositif d'analyse d'un milieu selon l'invention en référence aux figures. Dans ces différentes figures, les éléments équivalents sont désignés par la même référence numérique.

[0045] Dans la suite, l'invention sera décrite en référence au domaine de l'imagerie du corps humain par échographie. Il est bien évident pour l'homme du métier que le procédé et le dispositif d'analyse d'un milieu selon l'invention peuvent être utilisés pour d'autres applications, telle que des applications SONAR, RADAR, ou d'autres applications non médicales (sismographie, étude de matériaux tels que des bétons ou des matériaux polycristallin, etc.).

[0046] *1. Dispositif d'analyse d'un milieu*

[0047] En référence à la [Fig.4], on a illustré un exemple de dispositif dans lequel le procédé d'analyse d'un milieu décrit dans la suite peut être mis en œuvre.

[0048] Ce dispositif comprend :

- un réseau de transducteurs T_1 - T_n pour l'acquisition de signaux, et
- une unité de commande et de traitement U_c pour :
- le pilotage du réseau de transducteurs T_1 - T_n et
- le traitement des signaux acquis par le réseau de transducteurs T_1 - T_n .

[0049] *1.1. Réseau de transducteurs*

[0050] Le réseau de transducteurs T_1 - T_n comprend un jeu de « n » transducteurs ultrasonores (« n » étant un entier supérieur ou égal à un) disposés linéairement. En variante, les transducteurs T_1 - T_n du réseau peuvent être disposés en courbe, ou en cercles concentriques, ou en matrice.

[0051] Le réseau de transducteurs T_1 - T_n permet d'émettre des ondes ultrasonores

d'excitation vers un milieu à analyser (organe, tissu biologique, etc.), et de recevoir des échos acoustiques (i.e. ondes ultrasonores réfléchies par le milieu à analyser).

[0052] Chaque transducteur T_1 - T_n consiste par exemple en une plaquette de matériau piézo-électrique de forme rectangulaire revêtue sur ses faces avant et arrière d'électrodes et recouverte sur la face avant de lentilles et de couches d'adaptation d'impédances acoustiques. De tels transducteurs sont connus de l'homme du métier et ne seront pas décrits plus en détails dans la suite.

[0053] Dans la variante de réalisation illustrée à la [Fig.4], tous les transducteurs T_1 - T_n du réseau sont utilisés à la fois en émission et en réception. Dans d'autres modes de réalisation, des transducteurs distincts peuvent être utilisés pour l'émission et la réception.

[0054] *1.2. Unité de commande et de traitement*

[0055] L'unité de commande et de traitement U_c est reliée au réseau de transducteurs T_1 - T_n .

[0056] Elle permet de piloter les transducteurs T_1 - T_n du réseau, et de traiter les données acquises par les transducteurs T_1 - T_n du réseau.

[0057] Plus précisément, l'unité de commande et de traitement U_c permet :

- de commander aux transducteurs T_1 - T_n l'émission d'ondes ultrasonores vers le milieu à analyser,
- de commander aux transducteurs T_1 - T_n la réception des échos réfléchis par le milieu à analyser et leur conversion en signaux de réception,
- de traiter les signaux de réception.

[0058] L'unité de commande et de traitement U_c peut être composée d'une ou de plusieurs entités physiques distinctes, éventuellement distantes du réseau de transducteurs T_1 - T_n .

[0059] L'unité de commande et de traitement U_c comprend par exemple :

- un (ou plusieurs) contrôleur(s) 11, tel qu'un Smartphone, un assistant personnel (ou « *PDA* », sigle de l'expression anglo-saxonne « *Personal Digital Assistant* »), ou tout type de terminal mobile connu de l'homme du métier ; et
- un (ou plusieurs) calculateur(s) 12, tel qu'un/des ordinateur(s), un/des micro-ordinateur(s), une/des stations de travail, et/ou d'autres dispositifs connus de l'homme du métier incluant un/des processeur(s), un/des microcontrôleur(s), un/des automate(s) programmable(s), un/des circuit(s) intégré(s) spécifique(s) d'application, et/ou d'autres circuits programmables,
- une (ou plusieurs) unité(s) de stockage 13 comportant une (ou plusieurs) mémoire(s) qui peu(ven)t être une mémoire ROM/RAM, une clé USB, une mémoire d'un serveur central.

[0060] Outre la conservation de données associées à l'analyse d'un milieu, l'unité de stockage 13 permet également de stocker des instructions de code de programmation destinées à exécuter les étapes du procédé d'analyse décrit dans la suite.

[0061] 2. Procédé d'analyse

[0062] 2.1. Généralités

[0063] L'un des aspects avantageux du procédé d'analyse selon l'invention concerne l'utilisation d'ondes spécifiques en émission et en réception, appelées ici ondes planes et ondes spirales. De telles ondes sont illustrées à la [Fig.11]. Plus précisément, on a illustré à la [Fig.11] :

- une onde plane O_p émise par un réseau de transducteurs plan T_p ,
- une onde spirale O_s émise par un réseau de transducteurs courbe T_c .

[0064] Il est bien évident pour l'homme du métier que le type d'onde est indépendant de la forme du réseau de transducteurs. En particulier, un réseau de transducteurs plan peut être configuré pour émettre une onde spirale (en utilisant une loi de retard adaptée). De même, un réseau de transducteurs courbe peut être configuré pour émettre une onde plane (en utilisant une loi de retard adaptée).

[0065] De manière plus générique, on définit un réseau de transducteurs virtuels T comme un ensemble de points du milieu disposés sur une ligne ou selon un arc de cercle. Les caractéristiques des fronts d'ondes planes ou spirales sont choisies (en particulier l'angle d'émission ou de réception) par rapport à ce réseau de transducteurs virtuels. Les lois de délais appliquées au réseau de transducteurs réels en sont déduites. Dans le cadre de l'approximation du front d'onde, tout se passe comme si les ondes étaient émises par le réseau de transducteurs virtuels. Ainsi, quelle que soit la géométrie de la sonde, on peut émettre tout type d'onde plane ou spirale en définissant un réseau de transducteurs virtuels correspondants.

[0066] On appelle onde plane O_p une onde dont le temps d'arrivée du front d'onde à une profondeur z dépend de la position latérale x selon une loi affine $t(x, z) = a(z) + bx$ où a est une constante qui ne dépend que de z et b une constante qui ne dépend ni de z , ni de x .

[0067] De la même façon, on appelle onde spirale O_s l'équivalent de l'onde plane O_p en référentiel polaire. Un référentiel polaire est alors choisi de manière arbitraire, et l'onde spirale O_s est définie comme l'onde dont le temps d'arrivée du front d'onde à un rayon r dépend de l'angle θ selon une loi affine $t(r, \theta) = a(r) + b\theta$ où a est une constante qui ne dépend que de r et b est une constante qui ne dépend ni de r ni de θ . L'homme du métier remarquera que l'onde plane O_p correspond à un cas limite de l'onde spirale où l'origine du repère s'éloigne à l'infini de la sonde.

[0068] Ces ondes sont générées en émission ou en réception par le réseau de transducteurs réel T_1 - T_n en appliquant à chaque transducteur le retard correspondant au temps d'arrivée du front d'onde à la position dudit transducteur.

[0069] On entend, dans le cadre de la présente invention par « *angle d'émission* » (respectivement « *angle de réception* »)^a l'angle entre :

- une direction orthogonale (ci-après dénommée « normale ») à la tangente au réseau de transducteurs T_1 - T_n , et
- une direction normale à la tangente au front d'onde de l'onde émise (respectivement reçue) grâce au réseau de transducteurs T_1 - T_n ,
et ce, au moment d'émission (respectivement de réception).

- [0070] Ces ondes planes ou spirales O_p , O_s peuvent être générées indépendamment de la géométrie de la sonde utilisée. On remarquera que dans le cas où le réseau de transducteurs virtuel correspond au réseau de transducteurs réel (ondes planes en sondes linéaires ou ondes spirales en sondes courbes), l'émission (respectivement la réception) de telles ondes est facilitée par la similarité entre la géométrie de la sonde et la forme du front d'onde. Elle est également plus avantageuse du point de vue de la directivité des éléments.
- [0071] La matrice inter-angles définit des couples d'angles d'émission et de réception d'ondes planes ou spirales.
- [0072] Plus précisément, chaque coefficient de la matrice inter-angles correspond à un angle de réception (par l'ensemble des transducteurs T_1 - T_n du réseau) d'une onde réfléchie plane ou spirale suite à la réverbération dans le milieu d'une onde d'émission plane ou spirale d'un angle d'émission.
- [0073] Le traitement ultérieur de cette matrice inter-angles pour séparer les composantes de diffusion simple et multiple dans les signaux de réception mesurés par les transducteurs permet en effet d'obtenir de meilleurs résultats que le procédé décrit dans WO 2010/001027 (basé sur la séparation des composantes de diffusion simple et multiple dans une matrice inter-éléments).
- [0074] On va maintenant décrire plus en détails les étapes d'obtention de la matrice inter-angles. Par souci de simplicité, ces étapes sont décrites dans le cas d'ondes planes, avec une sonde linéaire. Cette méthode peut cependant être généralisée à d'autres géométries de sondes et aux ondes spirales.
- [0075] *2.2. Obtention de la matrice inter-angles*
- [0076] *2.2.1. Génération d'ondes planes d'émission*
- [0077] Pour générer une onde plane d'émission, les transducteurs T_1 - T_n du réseau sont activés ensemble (en émission) de sorte que les ondes élémentaires E_1 - E_n générées par chacun des transducteurs T_1 - T_n se combinent pour former une onde plane d'émission ayant un angle d'émission souhaité.
- [0078] Plus précisément, en fonction de la phase et de l'amplitude des tensions d'excitation appliquées aux transducteurs T_1 - T_n par l'unité de commande et de traitement U_c , il est possible de contrôler les transducteurs T_1 - T_n pour qu'ils produisent des ondes ultrasonores élémentaires E_1 - E_n se combinant pour former une onde ultrasonore plane d'émission 14 qui se propage à travers le milieu à analyser selon une direction 15

souhaitée (cf. [Fig.5]).

[0079] Cette onde ultrasonore résultante 14 plane peut être émise selon différents angles d'émission (i.e. différentes directions) en faisant varier les instants d'activation (t , $t+\Delta t$, $t+2\Delta t$, ... $t+n\Delta t$) de chaque transducteur T_1 - T_n du réseau.

[0080] Par exemple, pour la génération d'une onde plane d'émission, tous les transducteurs T_1 - T_n peuvent être activés :

- simultanément pour obtenir une onde plane d'émission se propageant selon un angle d'émission nul relativement au réseau de transducteurs T_1 - T_n , ou
- successivement (en fonction d'une loi de retard d'activation) pour obtenir une onde plane d'émission se propageant selon un angle d'émission non nul relativement au réseau de transducteurs T_1 - T_n .

[0081] Dans tous les cas, les transducteurs T_1 - T_n sont activés ensemble pour générer l'onde plane, c'est-à-dire que les transducteurs T_1 - T_n sont tous activés en émission pour chaque réception.

[0082] 2.2.2. Réception d'ondes planes

[0083] Pour la réception d'ondes planes, deux solutions distinctes peuvent être envisagées.

[0084] Ces deux solutions – qui vont être décrites dans la suite – peuvent être utilisées dans le cadre de la présente invention.

[0085] 2.2.2.1. Première solution

[0086] La première solution consiste à appliquer une loi de retard dans l'activation (en réception) des transducteurs T_1 - T_n du réseau.

[0087] Plus précisément, pour recevoir une onde plane de réception ayant un angle de réception souhaité, les transducteurs T_1 - T_n du réseau sont activés ensemble (en réception), l'onde plane de réception correspondant à la somme des signaux de réception acquis par les transducteurs T_1 - T_n du réseau :

- simultanément pour recevoir une onde plane de réception ayant un angle de réception nul (i.e. dont le front d'onde présente un angle nul relativement à la normale au réseau de transducteurs T_1 - T_n),
- successivement en respectant une loi de retard d'activation (en réception) pour recevoir une onde plane de réception ayant un angle de réception souhaité non nul (i.e. dont le front d'onde présente un angle non nul relativement à la normale au réseau de transducteurs T_1 - T_n).

[0088] Pour chaque onde plane en émission, l'activation des transducteurs T_1 - T_n du réseau en réception doit alors être répétée N fois avec des lois de retard d'activation (en réception) distinctes pour l'acquisition de N ondes planes de réception ayant des angles de réception distincts (i.e. dont les fronts d'onde respectifs ont des angles distincts relativement à la normale au réseau de transducteurs T_1 - T_n).

[0089] Ceci peut être coûteux en temps et en ressources matérielles. Par ailleurs, cette

solution peut être difficile à mettre en œuvre puisque le milieu doit rester immobile pour toutes les acquisitions d'ondes planes de réception.

[0090] 2.2.2.2. Deuxième solution

[0091] Pour limiter la quantité de données acquises par les transducteurs T_1 - T_n , et réduire le temps nécessaire à l'acquisition des ondes planes de réception selon différents angles de réception, les inventeurs ont développé une deuxième solution dans laquelle les transducteurs T_1 - T_n acquièrent simultanément les signaux représentatifs des ondes planes de réception, indépendamment de leur orientation (i.e. indépendamment des directions de déplacement de leurs fronts d'onde).

[0092] Ainsi, après l'émission d'une onde plane d'émission présentant un angle d'émission donné, chaque transducteur est activé simultanément en réception pour enregistrer des signaux captés représentatifs de la réverbération par le milieu de l'onde plane d'émission.

[0093] Pour chaque transducteur T_1 - T_n , un signal capté fonction du temps t , $\{s_i(t)\}_{0 \leq i \leq n-1}$ est enregistré.

[0094] Les signaux captés par les transducteurs T_1 - T_n sont ensuite sommés selon une loi de retard temporelle dépendant de l'angle de réception désiré pour l'onde plane de réception.

[0095] Par exemple pour recevoir une onde plane de réception ayant un angle de réception α à partir des signaux captés $\{s_i(t)\}_{0 \leq i \leq n-1}$ mesurés par les transducteurs T_1 - T_n , l'opération de sommation suivante est effectuée :

$$[0096] \quad sa(\hat{t}) = \sum_{i=0}^{n-1} s_i\left(t - \frac{ipsin\alpha}{c}\right)$$

[0097] Où :

- « c » représente la célérité de l'onde dans le milieu,
- « p » représente le pas de la sonde (i.e. écart entre deux transducteurs adjacents du réseau de transducteurs).

[0098] Le traitement du bloc de signaux captés permet de « réorienter » les réponses enregistrées par les différents transducteurs T_1 - T_n pour obtenir les ondes de réception aux différents angles de réception souhaités. On génère ainsi N ondes planes en réception à partir d'une seule émission.

[0099] 2.2.3. Détermination de matrices inter-angles fenêtrées

[0100] En référence à la [Fig.6a], le principe de construction d'un coefficient K_{ij} d'une ligne « i » d'une matrice inter-angles $K(T)$ fenêtrée temporellement comprend les étapes suivantes :

- pour les transducteurs T_1 - T_n du réseau, émettre une onde plane d'émission O_{inc1} ayant un angle d'émission souhaité (chaque transducteur étant activé selon une loi de retard d'activation prédéterminée pour générer l'onde plane O

- $_{inc1}$ ayant l'angle d'émission souhaité),
 - pour les transducteurs T_1-T_n du réseau, recevoir une onde plane de réception O_{rec1} ayant un angle de réception souhaité (obtenue en mettant en œuvre soit la première solution, soit la deuxième solution).
- [0101] Le signal de réception représentatif de l'onde plane de réception ayant l'angle de réception souhaité dépend du temps.
- [0102] Ce signal est tronqué (fenêtré) en fenêtres de temps F_T successives (potentiellement partiellement superposées) – de durée Δt – associées chacune à une matrice inter-angles fenêtrée respective. Chaque fenêtre de temps F_T est centrée autour d'un temps « T » qui peut être représentatif d'une profondeur P dans le milieu (selon la relation $P=cT/2$, avec « c » la célérité de l'onde ultrasonore dans le milieu).
- [0103] Pour chaque fenêtre de temps F_T , le signal de réception tronqué correspondant est multiplié par une fonction de fenêtrage et enregistré dans le coefficient K_{ij} de la matrice inter-angles fenêtrée associée $K(T)$.
- [0104] Comme illustré sur les [Fig.6b] et 6c, la ligne « i » de chaque matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ est complétée en recevant des ondes planes de réception O_{rec2} , O_{rec3} ayant chacune un angle de réception distinct des autres ondes planes de réception et en tronquant les signaux de réception représentatifs des ondes planes de réception O_{rec2} , O_{rec3} en fenêtres de temps F_T successives.
- [0105] Ces étapes sont répétées pour chaque ligne de la matrice $K(T)$.
- [0106] Plus précisément, une fois que toutes les ondes planes de réception ont été reçues et tronquées pour l'ensemble des angles de réception souhaités, la ligne « i » de chaque matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ est déterminée.
- [0107] En référence à la [Fig.6d], la construction de la ligne « $i+1$ » de chaque matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ peut être initiée :
- en générant une nouvelle onde plane d'émission O_{inc2} ayant un angle d'émission distinct de l'angle d'émission associé à l'onde plane d'émission O_{inc1} utilisée pour la ligne « i » précédente,
 - en recevant des ondes planes de réception O_{rec4} , etc. ayant les angles de réception souhaités distincts, et
 - en tronquant les signaux de réception représentatifs des ondes planes de réception O_{rec4} , etc. en fenêtres de temps F_T successives.
- [0108] Ainsi dans chaque matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$:
- chaque ligne « i » est représentative de l'angle d'émission d'une onde plane émise, et
 - chaque colonne « j » est représentative d'un angle de réception d'une onde plane reçue.
- [0109] Dans le cadre de la présente invention, les matrices inter-angles fenêtrées $K(T)$

considérées sont acquises avec des angles d'émission et de réception espacés d'un pas constant.

[0110] 2.2.4. Différence matrice inter-éléments / matrice inter-angles

[0111] Au vu de la description qui précède, les informations contenues dans une matrice inter-éléments fenêtrée sont différentes des informations contenues dans une matrice inter-angles fenêtrée.

[0112] En effet, une matrice inter-éléments fenêtrée correspond aux réponses temporelles des récepteurs d'un ensemble émetteurs/récepteurs suite à une succession d'émissions par des émetteurs de l'ensemble émetteurs/récepteurs. Ainsi :

- chaque ligne d'une matrice inter-éléments fenêtrée correspond à un émetteur respectif de l'ensemble émetteurs/récepteurs,
- chaque colonne d'une matrice inter-éléments fenêtrée correspond à un récepteur respectif de l'ensemble émetteurs/récepteurs.

[0113] Au contraire, et comme il sera décrit plus en détails dans la suite (cf. notamment point 4.3.1.3.), une matrice inter-angles fenêtrée correspond aux angles de réception des ondes planes de réception suite à une succession d'ondes planes émises selon différents angles d'émission. Ainsi :

- chaque ligne d'une matrice inter-angles fenêtrée est représentative de l'angle d'émission d'une onde plane émise, et
- chaque colonne d'une matrice inter-angles fenêtrée est représentative d'un angle de réception d'une onde plane reçue.

[0114] A titre indicatif, on a illustré à la [Fig.7] la partie réelle d'une matrice inter-angles fenêtrée.

[0115] Le lecteur constatera sur cette figure que les antidiagonales sont rectilignes, contrairement aux antidiagonales de la partie réelle de la matrice inter-éléments fenêtrée illustré à la figure 2 où les antidiagonales sont incurvées.

[0116] Cette linéarité des antidiagonales de la matrice inter-angles fenêtrée permet dans la suite d'améliorer la qualité de séparation des composantes de diffusion simple et multiple, et donc la qualité des résultats obtenus par rapport à la méthode décrite dans WO 2010/001027.

[0117] 3. Séparation des composantes de diffusion simple et multiple

[0118] Les étapes précédentes permettent de générer plusieurs matrices inter-angles fenêtrées dans chacune desquelles les contributions de diffusion simple et multiple peuvent être séparées par filtrage.

[0119] Dans chaque matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, cette séparation des composantes simple et multiple est réalisée en fonction de la cohérence des coefficients K_{ij} sur chaque antidiagonale de ladite matrice inter-angles fenêtrée considérée $K(T)$. On entend, dans le cadre de la présente invention par « *antidiagonale* », un alignement de

coefficients K_{ij} de la matrice tel que la somme « $i+j$ » soit constante (« i » correspondant à une ligne de la matrice, et « j » à une colonne de la matrice).

[0120] En effet, les ondes simplement diffusées présentent une cohérence particulière selon les antidiagonales de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, alors que les ondes multiplement diffusées ne présentent pas de direction de cohérence privilégiée dans la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$. C'est pourquoi un filtrage des antidiagonales en fonction de la cohérence des coefficients K_{ij} permet une séparation des composantes de diffusion simple et multiple.

[0121] On va maintenant décrire différentes méthodes de filtrage permettant de séparer les composantes de diffusion simple et multiple de chaque matrice inter-angles.

[0122] *3.1. Première méthode de séparation par décomposition en valeurs singulières*

[0123] En référence à la [Fig.8], la première méthode de séparation comprend, pour chaque matrice inter-angles fenêtrée considérée, les étapes suivantes :

- rotation 101 des coefficients de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ de 45° pour obtenir une (ou plusieurs) matrice(s) pivotée(s), et
- filtrage 102 par décomposition en valeurs singulières de la (ou des) matrice(s) pivotée(s) pour obtenir une (ou plusieurs) matrice(s) filtrée(s),
- rotation inverse 103 des coefficients de la (ou des) matrice(s) filtrée(s) pour générer :
 - une première matrice inter-angles fenêtrée filtrée dont les coefficients sont représentatifs de la composante de diffusion simple,
 - une deuxième matrice inter-angles fenêtrée filtrée dont les coefficients sont représentatifs de la composante de diffusion multiple.

[0124] *3.1.1. Rotation des coefficients de la matrice inter-angles fenêtrée*

[0125] Différentes techniques peuvent être mises en œuvre pour réaliser l'étape de rotation 101 de la matrice inter-angles fenêtrée :

- une technique dite d'interpolation bidimensionnelle, ou
- une technique dite de sélection des coefficients de la matrice inter-angles fenêtrée selon les antidiagonales.

[0126] Ces deux techniques sont décrites en détail ci-dessous.

[0127] *3.1.1.1. Interpolation bidimensionnelle*

[0128] L'étape de rotation « *par interpolation* » permet de générer une matrice pivotée $K_{piv}(T)$. Cette technique peut être utilisée dans le cas d'une matrice inter-angles suffisamment résolue.

[0129] Le principe de construction de la matrice pivotée $K_{piv}(T)$ est le suivant.

[0130] En référence à la [Fig.9a], on a illustré une superposition de la matrice pivotée $K_{piv}(T)$ à la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$.

[0131] La valeur de chaque coefficient de la matrice pivotée $K_{piv}(T)$ est déterminée par inter-

polaion des coefficients de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ voisins du coefficient considéré dans la matrice pivotée $K_{piv}(T)$.

[0132] Plus précisément, la valeur du coefficient K_{piv11} de la matrice pivotée $K_{piv}(T)$ est déterminée par interpolation des quatre valeurs K_{12} , K_{13} , K_{14} , K_{23} de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, comme illustré à la [Fig.9b]. De même, la valeur du coefficient central K_{piv21} de la matrice pivotée $K_{piv}(T)$ est déterminée par interpolation des quatre valeurs K_{12} , K_{13} , K_{22} , K_{23} de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, comme illustré à la [Fig.9c]. La valeur du coefficient central K_{piv31} de la matrice pivotée $K_{piv}(T)$ est déterminée par interpolation des quatre valeurs K_{21} , K_{22} , K_{31} , K_{32} de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, comme illustré à la [Fig.9d], et ainsi de suite.

[0133] Le lecteur appréciera que la technique décrite ci-dessus est relative au cas particulier d'une interpolation bilinéaire. Bien entendu, d'autres méthodes d'interpolations peuvent être utilisées.

[0134] 3.1.1.2. Sélection des coefficients de la matrice inter-angles fenêtrée selon les anti diagonales

[0135] L'étape de rotation « *par sélection* » des coefficients de la matrice inter-angles fenêtrée permet de générer une paire de matrices élémentaires $K_{é11}(T)$, $K_{é12}(T)$.

[0136] Plus précisément et en référence à la [Fig.10], les matrices élémentaires $K_{é11}(T)$, $K_{é12}(T)$ sont des matrices carrées constituées de sous-ensembles de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$:

- $K_{é11}(T)$ est une première matrice carrée de dimensions inférieures à la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, les lignes de la première matrice élémentaire $K_{é11}(T)$ correspondant à des premières diagonales de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$; par exemple, dans le cas d'une matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ 5x5, la première matrice élémentaire $K_{é11}(T)$ est une matrice carrée 3x3 dont chaque colonne correspond à une diagonale de rang impaire respective de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$;
- $K_{é12}(T)$ est une deuxième matrice carrée de dimensions inférieures à la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, les lignes de la deuxième matrice élémentaire $K_{é12}(T)$ correspondant à des deuxièmes diagonales de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$; par exemple, dans le cas d'une matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ 5x5, la deuxième matrice élémentaire $K_{é12}(T)$ est une matrice carrée 2x2 dont chaque colonne correspond à une diagonale de rang paire respective de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$.

[0137] Plus précisément, les coefficients « *Coef1* », « *Coef2* » de chaque matrice élémentaire $K_{é11}(T)$, $K_{é12}(T)$ sont calculés à partir des coefficients « *k* » de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ avec :

- Pour la première matrice élémentaire $K_{é11}(T)$:

Coef1_{x,y} (T) = $K_{x+y-1, x-y+2M-1}$ (T), où $M = (N+3)/4$, N étant choisi pour que M soit un entier,

- Pour la deuxième matrice élémentaire $K_{\epsilon 12}(T)$:

Coef2_{x,y} (T) = $K_{x+y, x-y+2M-1}$ (T), où $M = (N+3)/4$, N étant choisi pour que M soit un entier.

[0138] On obtient ainsi deux matrices élémentaires $K_{\epsilon 11}(T)$, $K_{\epsilon 12}(T)$ de dimensions respectives Dim1 et Dim2, où :

- Dim1 = 2M-1, et
- Dim2 = 2M-2.

[0139] 3.1.2. Filtrage

[0140] L'étape de filtrage permet de séparer :

- la contribution de la composante de diffusion simple, et
- la contribution de la composante de diffusion multiple, en effectuant une décomposition en valeurs singulières (ou « *SVD* », sigle de l'expression anglo-saxonne « *Single Value Decomposition* »).

[0141] La décomposition en valeur singulières d'une matrice permet de décomposer une matrice en deux matrices filtrées correspondant à deux sous-espaces :

- une première matrice filtrée (correspond à un espace dit « *signal* ») d'aspect déterminé dont les colonnes sont fortement corrélées,
- une deuxième matrice filtrée (correspondant à un espace dit « *aberration* ») d'aspect aléatoire dont les coefficients ne sont pas corrélés.

[0142] On entend, dans le cadre de la présente invention, par « *aberration* » tout phénomène qui n'est pas attendu dans un modèle de diffusion simple, c'est-à-dire un modèle où les signaux reçus sont exclusivement composés des signaux directement réfléchis par le milieu. Les aberrations comprennent donc, entre autres, le bruit thermique du système et la diffusion multiple.

[0143] Plus précisément, une matrice M (M pouvant correspondre à la matrice pivotée K_{piv} (T) ou à l'une des matrices élémentaires $K_{\epsilon 11}(T)$, $K_{\epsilon 12}(T)$) peut être considérée comme étant la somme de deux termes M^S et M^M désignant respectivement la contribution due à la composante de diffusion simple et la contribution due à la composante d'aberration:

[0144] $M = M^S + M^M$,

[0145] C'est-à-dire :

- dans le cas de la matrice pivotée $K_{\text{piv}}(T)$: $K_{\text{piv}}(T) = K_{\text{piv}}^S(T) + K_{\text{piv}}^M(T)$,
- dans le cas de la 1ère matrice élémentaire $K_{\epsilon 11}(T)$: $K_{\epsilon 11}(T) = K_{\epsilon 11}^S(T) + K_{\epsilon 11}^M(T)$,
- dans le cas de la 2ème matrice élémentaire : $K_{\epsilon 12}(T) = K_{\epsilon 12}^S(T) + K_{\epsilon 12}^M(T)$.

[0146] La décomposition en valeur singulières de la matrice M s'écrit de la manière suivante

:

$$[0147] \quad M = U A^t V^* = \sum_{i=1}^{Dim} \lambda_i U_i V_i^*$$

[0148] où U et V sont des matrices carrées unitaires de dimension Dim, V^* est matrice adjointe de V, et leurs colonnes respectives U_i et V_i correspondant aux vecteurs propres associées à la valeur singulière λ_i .

[0149] La diffusion simple se caractérisant, après rotation des données, par une grande cohérence le long des colonnes des matrices élémentaires, la décomposition en valeur singulières fait ressortir cette contribution dans l'espace signal (la contribution diffusion simple sera associée aux valeurs singulières les plus élevées) alors que la contribution de l'aberration sera associée aux valeurs singulières plus faibles.

[0150] Dans certaines variantes de réalisation, la valeur singulière de rang 1 peut être suffisante pour séparer l'espace signal (associé à la diffusion simple) de l'espace aberration (associé à la diffusion multiple). Dans d'autres modes de réalisation, plusieurs valeurs singulières (portant la trace de la contribution associée à la composante de diffusion simple) peuvent être calculées pour séparer l'espace signal de l'espace aberration.

[0151] Dans tous les cas, la décomposition en valeur(s) singulière(s) représentative(s) de la contribution de diffusion simple est ensuite soustraite de la matrice initiale (i.e. avant décomposition en valeurs singulières). Le résultat de cette opération de soustraction est une matrice représentative de la contribution de la composante de diffusion multiple.

[0152] Ainsi, le filtrage par décomposition en valeurs singulières permet :

- à partir de la matrice pivotée $K_{piv}(T)$, d'obtenir des première et deuxième matrices filtrées $K_{piv}^S(T)$ et $K_{piv}^M(T)$ contenant respectivement les contributions de diffusion simple et multiple,
- à partir de la première matrice élémentaire $K_{é11}(T)$, d'obtenir des première et deuxième matrices filtrées $K_{é11}^S(T)$ et $K_{é11}^M(T)$ contenant respectivement les contributions de diffusion simple et multiple,
- à partir de la deuxième matrice élémentaire $K_{é12}(T)$, d'obtenir des première et deuxième matrices filtrées $K_{é12}^S(T)$ et $K_{é12}^M(T)$ contenant respectivement les contributions de diffusion simple et multiple.

[0153] 3.1.3. Rotation inverse des coefficients des matrice filtrées

[0154] Une rotation inverse est ensuite mise en œuvre sur les différentes matrices filtrées obtenues à l'étape précédente pour réorienter leurs coefficients selon l'orientation de la matrice inter-angles fenêtrée initiale $K(T)$ (i.e. transformation inverse de la transformation décrite au point 3.1.1.).

[0155] Plus précisément, chaque matrice filtrée $G_{filtrée}$ ($G_{filtrée}$ pouvant correspondre à $K_{piv}^S(T)$, $K_{piv}^M(T)$, $K_{é11}^S(T)$, $K_{é11}^M(T)$, $K_{é12}^S(T)$, ou à $K_{é12}^M(T)$) est tournée pour obtenir une matrice

$G_{\text{tournée}}$ en appliquant la règle suivante :

- lorsque $x-y$ est pair : $A_{x,y}^{\text{Gtournée}}(T) = a_{(x-y)/2+M, (x+y)/2}^{\text{Gfiltrée}}$,
- lorsque $x-y$ est impair : $A_{x,y}^{\text{Gtournée}}(T) = a_{(x-y-1)/2+M, (x+y-1)/2}^{\text{Gfiltrée}}$.

[0156] **3.2. Deuxième méthode de séparation par projection sur l'espace de Hankel**

[0157] En variante à la première méthode de séparation par décomposition en valeurs singulières, une deuxième méthode de séparation par projection sur l'espace de Hankel peut être mise en œuvre.

[0158] L'espace de Hankel est un sous espace vectoriel de l'espace des matrices carrées qui est défini en ce que toutes les matrices de l'espace de Hankel ont leurs anti diagonales constantes.

[0159] Cette deuxième méthode de projection sur l'espace de Hankel est avantageusement réalisée sur la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ non tournée, c'est-à-dire que cette méthode ne nécessite pas d'effectuer une rotation de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ et utilise tous les coefficients de cette matrice, là où une rotation réduit le nombre de coefficients disponibles.

[0160] La deuxième méthode de séparation de Hankel consiste à séparer la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ en une matrice de Hankel $H(T)$ et une matrice résiduelle $R(T)$. Une matrice de Hankel est une matrice carrée dont les valeurs sont constantes le long des antidiagonale (i.e. diagonales ascendantes), c'est-à-dire une matrice dont les indices vérifient la relation :

[0161] $H_{x,y} = H_{x-1,y+1}$

[0162] Pour calculer une matrice de Hankel $H(T)$ à partir de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$, la solution la plus simple est d'effectuer une projection orthogonale sur l'espace de Hankel. Cette solution consiste à remplacer chaque coefficient $h_{x,y}$ d'une anti-diagonale de la matrice de Hankel $H(T)$, par la moyenne des coefficients $k_{l,m}$ correspondants de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$ sur ladite antidiagonale. Plus précisément, chaque coefficient $h_{x,y}$ de la matrice de Hankel $H(T)$ est déterminé selon la formule suivante :

[0163] $H_{x,y}(T) = \left\langle K_{l,m} \right\rangle_{l,m; l+m=x+y}$

[0164] La matrice de Hankel $H(T)$ ainsi obtenue est représentative de la composante de diffusion simple. Le reste « $K(T) - H(T)$ » est représentatif de la composante de diffusion multiple.

[0165] Plus précisément, pour obtenir la matrice $R(T)$ représentative de la composante de diffusion multiple, la matrice de Hankel $H(T)$ est soustraite de la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$:

[0166] $R(T) = K(T) - H(T)$.

[0167] La deuxième méthode de Hankel présente l'avantage de limiter le nombre de calculs

effectués (et donc la quantité de ressources matérielles nécessaires) pour séparer les composantes de diffusion simple et multiple contenues dans la matrice inter-angles fenêtrée $K(T)$. En effet, il n'est pas nécessaire de réaliser les opérations de rotation et de rotation inverse, contrairement à la première méthode de séparation par décomposition en valeurs singulières.

[0168] 4. *Théorie relative à l'invention*

[0169] On va maintenant présenter différents éléments théoriques relatifs à l'invention pour permettre à l'homme du métier de mieux comprendre les avantages associés au procédé décrit ci-dessus.

[0170] 4.1. *Objectif*

[0171] Dans la suite, une méthode de quantification d'aberrations par approche angulaire sera décrite. Ici, nous appelons « *aberrations* » tous phénomènes qui ne sont pas attendus dans un modèle de diffusion simple, c'est-à-dire un modèle où les signaux reçus sont exclusivement composés des signaux directement réfléchis par le milieu.

[0172] Les aberrations comprennent donc, entre autres, le bruit thermique du système et la diffusion multiple (i.e. signal obtenu correspondant aux échos d'ondes réfléchies par plusieurs éléments du milieu avant de revenir à la sonde).

[0173] Cette quantification sera effectuée par traitement de signaux reçus dans le cadre de la transmission et de la réception d'ondes planes ou spirales. En effet, la formulation mathématique et physique du problème dans ce cas permet une analyse simple et la conception d'une méthode de cartographie des aberrations.

[0174] La technique de quantifications des aberrations par l'approche angulaire, proposée dans cette partie, peut être séparée en deux étapes:

- une première étape comprenant :
 - une sous étape d'émission de faisceaux d'ondes obtenus en appliquant une loi de retard sur les éléments de la barrette de transducteurs ; ces faisceaux approximent une base d'ondes planes progressives en émission, soit se propageant vers le milieu imagé ; nous parlerons donc, dans la suite, d'onde plane ou d'onde plane en émission pour caractériser le front d'onde ultrasonore se propageant dans le milieu imagé ;
 - une sous étape de réception, sur les éléments, des signaux représentatifs de la réverbération des ondes ultrasonores par le milieu insonifié,
 - une sous étape de traitement permettant de décomposer les signaux reçus sur les éléments sur une base d'ondes planes progressives en réception, soit se propageant vers la barrette de transducteurs,
- une deuxième étape de traitement exploitant la redondance des données an-

gulaires pour séparer la composante de diffusion simple des aberrations.

[0175] 4.2. Première étape : émission/réception d'ondes planes

[0176] Cette partie décrit la méthode utilisée pour émettre et recevoir des ondes planes en utilisant une sonde ultrasonore composée d'un ensemble de transducteurs ultrasonores. Ces transducteurs sont typiquement arrangés uniformément le long d'une droite, définissant une sonde linéaire, ou d'un arc de cercle, définissant une sonde courbe.

[0177] 4.2.1. Emission

[0178] Pour émettre une onde plane avec un ensemble de transducteurs, il suffit d'émettre avec tous les transducteurs en appliquant un retard à chaque élément indépendamment en fonction de l'instant où le front d'onde désiré passe par la position dudit élément.

[0179] Par exemple, pour émettre une onde plane d'angle α avec une sonde linéaire où les éléments sont uniformément répartis aux positions $(ip, 0)$, $i \in \{0, n-1\}$, « p » étant le pas en mètres et « n » le nombre transducteurs de la sonde, il suffit d'appliquer au transducteur « i » le retard $T_i = i \cdot p \cdot \sin(\alpha) / c$, où « c » est la vitesse du son dans le milieu.

[0180] 4.2.2. Réception

[0181] Directement après avoir émis l'onde voulue avec les transducteurs ultrasonores, les signaux reçus par chacun de ces mêmes éléments, issus de la réverbération des ondes ultrasonores par le milieu imagé, est enregistré. Ainsi, pour chaque élément, un signal fonction du temps $\{s_i(t)\}_{0 \leq i \leq n-1}$ correspondant à la réponse du milieu à l'onde émise est obtenu.

[0182] 4.2.3. Traitement

[0183] De la même manière qu'il est possible de synthétiser une onde plane émission avec un ensemble d'éléments, il est possible de synthétiser une onde plane en réception. Pour ce faire, les signaux reçus par éléments sont retardés et sommés, avec un retard dépendant de l'angle de l'onde plane de réception désiré.

[0184] Par exemple, pour recevoir une onde plane d'angle α à partir des signaux $\{s_i(t)\}_{0 \leq i \leq n-1}$ reçus par les transducteurs, l'opération suivante peut être effectuée :

[0185]
$$\hat{s}_\alpha(t) = \sum_{i=0}^{n-1} s_i(t - \tau_i), \text{ où } \tau_i = ip \sin \alpha / c.$$

[0186] Cette étape de traitement permet ainsi l'accès à un ensemble de signaux,

$$\{s_{\alpha j, \beta k}(t)\} \quad \text{correspondant à } N_\alpha \text{ angles synthétisés en émission}$$

$$1 \leq j \leq N_\alpha, 1 \leq k \leq N_\beta$$

et N_β angles synthétisés en réception.

[0187] 4.3. Deuxième étape : quantification des aberrations

[0188] La quantification des aberrations nécessite de séparer le signal issu de la diffusion simple par le milieu du reste (diffusion multiple, bruit...). Cette séparation est possible dans le domaine angulaire en exploitant la redondance forte des signaux issus de

diffusion simple.

[0189] 4.3.1. Principe

[0190] Cette partie sera détaillée dans le cas le plus simple, celui de l'émission et de la réception d'ondes planes par une sonde linéaire. Un tel raisonnement est généralisable à d'autres géométries et d'autres émissions moyennant quelques approximations.

[0191] 4.3.1.1. Interprétation physique du signal angulaire

[0192] Lorsqu'une onde plane d'angle α est émise, la réception d'une onde plane d'angle β donne le signal $s_{\alpha, \beta}(t)$. Sous l'hypothèse de diffusion simple, il est possible de prouver que ce signal à l'instant t correspond à la somme des signaux réfléchis par tous les diffuseurs du milieu positionnés le long d'une ligne faisant un angle $(\alpha + \beta)/2$ avec l'horizontale.

[0193] En effet, si l'on émet une onde plane d'angle α de nature impulsionnelle, elle atteindra le point (x, z) au temps $t = 1/c * (x \sin \alpha + z \cos \alpha)$. Cette onde sera réfléchi par le point (x, z) , et, si l'on reçoit une onde plane d'angle β , le signal réfléchi par ce point arrivera au temps $t = 1/c * (x \sin \alpha + z \cos \alpha + x \sin \beta + z \cos \beta)$, ce qui se simplifie en $t = 2 \cos((\alpha - \beta)/2) * (x \sin \gamma + z \cos \gamma)/c$, où $\gamma = (\alpha + \beta)/2$. Le signal reçu au temps t dans cette configuration correspond donc à tous les points (x, z) qui vérifient la relation $t = 2 \cos((\alpha - \beta)/2) * (x \sin \gamma + z \cos \gamma)/c$. Ces points sont situés sur une droite faisant un angle γ avec l'horizontale.

[0194] Réciproquement, pour obtenir la somme des signaux le long de la ligne d'angle γ et de profondeur z , à partir de l'émission d'une onde d'angle α , il suffit de synthétiser l'onde plane d'angle $2\gamma - \alpha$ en réception et d'observer le signal $s_{\alpha, 2\gamma - \alpha}(z(\cos \alpha + \cos \beta)/c)$.

[0195] 4.3.1.3. Redondance de l'information

[0196] Ainsi, si plusieurs ondes planes avec différents angles $\alpha_i, i \in \{1, N_\alpha\}$ sont transmises, il est possible, pour chaque émission, de choisir de recevoir l'onde plane d'angle $\beta_i = 2\gamma - \alpha_i$ afin d'observer la même ligne d'angle γ . On accède de cette façon à un vecteur correspondant à cette ligne pour N couples d'angles transmission/réception.

[0197] Formellement, ce vecteur peut être modélisé comme suit: $s = [s_1, \dots, s_{N_\alpha}]^T \in \mathbb{C}^{N_\alpha}$, où $s_i = s + \epsilon_i$, avec s correspondant à la composante de diffusion simple et ϵ_i tenant compte des aberrations.

[0198] En effet, dans le cadre du modèle de diffusion simple, ce vecteur est un vecteur constant puisque ce sont systématiquement les mêmes réflexions qui sont observées.

[0199] 4.3.1.3. Structure matricielle

[0200] En pratique, un nombre N_α d'émissions est réalisé, et un nombre N_β de réceptions angulaires est calculé pour chaque émission. Ainsi, on obtient une matrice inter-angles

de dimension $N_\alpha \times N_\beta$. Si les angles émis et les angles reçus sont identiques et réguliers (espacés d'un pas constant), on obtient une matrice de taille $N_\alpha \times N_\alpha$ dont le coefficient k_{ij} correspond au signal reçu pour une émission d'angle α_i et une réception d'angle α_j .

[0201] De plus, sur les antidiagonales (i.e. diagonales ascendantes) $i+j$ étant constante, $(\alpha_i + \alpha_j)/2$ l'est aussi. D'après les paragraphes précédents, on obtient des antidiagonales sur lesquelles la composante de diffusion simple est théoriquement constante.

[0202] 4.3.2. Traitement

[0203] Deux méthodes de séparation de la diffusion simple des aberrations vont être présentées. La première utilise la structure matricielle des données acquises pour y appliquer des résultats d'algèbre linéaire et de théorie des matrices aléatoires. La deuxième, plus simple, utilise directement la redondance de l'information sur les antidiagonales.

[0204] 4.3.2.1. Méthode de décomposition en valeurs singulières

[0205] La méthode de décomposition en valeurs singulières utilise le fait qu'une matrice ayant des colonnes constantes est une matrice de rang 1. Pour utiliser cette propriété, plusieurs étapes sont nécessaires:

- Dans un premier temps, la matrice inter-angles, exprimée dans le domaine temporel ou fréquentiel, est pivotée de 45° afin que les antidiagonales deviennent des colonnes ; plusieurs techniques sont possibles pour cette étape :
 - Interpolation bi-dimensionnelle des éléments ; cette méthode est valable pour une matrice inter-angles suffisamment résolue,
 - Sélection des éléments de la matrice K selon les anti diagonales ; cette méthode oblige à sélectionner deux matrices, et à réaliser le traitement sur ces deux matrices en parallèle,
- Une fois la rotation effectuée, on applique une SVD (Singular Value Decomposition) ; la SVD permet d'extraire les valeurs propres de la matrice avec les vecteurs propres correspondants ; comme la matrice possède des colonnes constantes dans le cadre de la diffusion simple, son rang doit être 1 et elle doit posséder une seule valeur propre non nulle ; la diffusion simple est donc supposée être présente uniquement dans le premier vecteur propre,
- Le premier vecteur propre est donc séparé des autres, donnant lieu à deux matrices, une représentant la diffusion simple et l'autre les aberrations ; la norme euclidienne des valeurs propres permet au passage d'extraire un ratio de diffusion simple contre les aberrations.

[0206] En pratique, il est possible de sélectionner plus d'un seul vecteur propre pour compenser des effets déterministes non pris en compte dans la théorie, tels que des effets de diffraction de la sonde ou de directivité.

[0207] 4.3.2.2. Méthode de Hankel

- [0208] Cette méthode est réalisée directement avec la matrice inter-angles non tournée. Dans ce cas, le but est de séparer la matrice inter-angles en une matrice de Hankel (i.e. une matrice ayant ses antidiagonales constantes) et une matrice résiduelle.
- [0209] Pour ce faire, on utilise l'opérateur de projection orthogonale sur l'espace des matrices de Hankel qui consiste à prendre la moyenne sur chaque antidiagonale de K :
- [0210]
$$H_{i,j} = \langle K_{l,m} \rangle_{l,m; l+m=i+j}$$
- [0211] Cette matrice H (T) correspond à la diffusion simple, et le reste K - H aux aberrations.
- [0212] *4.4. Utilisation des matrices filtrées*
- [0213] Les méthodes précédentes donnent accès à une matrice de diffusion simple et une matrice d'aberrations.
- [0214] Si l'on suppose que les aberrations ne comprennent que la diffusion multiple, la norme de ces matrices est indicatrice de la quantité de diffusion simple et de la quantité de diffusion multiple, donc également du ratio de diffusion multiple sur diffusion simple.
- [0215] *5. Conclusions*
- [0216] Dans la description qui précède, l'invention était décrite dans le cas de l'utilisation d'onde planes. Le lecteur appréciera que l'invention peut être mise en œuvre en utilisant d'autres types d'ondes fortement directives, tel que des ondes spirales.
- [0217] De même dans la description qui précède, l'invention était décrite en référence à un réseau de transducteurs T_1 - T_n ayant une géométrie linéaire. Il est bien évident pour l'homme du métier que le réseau de transducteurs T_1 - T_n peut présenter d'autres formes telles qu'une forme courbe, ou matricielle.
- [0218] Dans le cas d'une sonde matricielle, donc bidimensionnelle, la méthode précédente se généralise en définissant des ondes planes ou spirales bidimensionnelles. Ces ondes planes ou spirales ne sont rien d'autres que la combinaison d'une onde plane ou spirale selon un axe avec une onde plane ou spirale selon l'autre axe, donnant ainsi des lois de retard définies dans des repères cartésiens, cylindriques ou polaires.
- [0219] On entend, dans le cadre de la présente invention, par réseau de transducteurs virtuel, un ensemble de points définissant une forme géométrique choisie en fonction de lois de délais appliquées au réseau de transducteurs réel de sorte que lesdits points de l'ensemble émettent un front d'onde plan ou spirale.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé d'analyse d'un milieu à partir d'un réseau de transducteurs virtuels (T_1 - T_n), ledit procédé comprenant :

- la génération dans un milieu diffusant, par des transducteurs (T_1 - T_n) du réseau, d'une onde plane ou spirale d'émission ayant un angle d'émission souhaité relativement au réseau de transducteurs (T_1 - T_n),
- la réception, par des transducteurs (T_1 - T_n) du réseau, de signaux de réception et leurs combinaisons pour obtenir des signaux résultants représentatifs de plusieurs ondes planes ou spirales de réception réverbérées par le milieu diffusant, lesdites ondes planes ou spirales de réception ayant des angles de réception respectifs relativement au réseau, les signaux résultants de ces ondes planes ou spirales de réception comprenant :
 - une composante de diffusion simple, représentative de trajets d'onde résultant d'une seule réflexion de l'onde plane ou spirale d'émission sur un diffuseur du milieu diffusant,
 - une composante de diffusion multiple, représentative de trajets d'onde résultant de plusieurs réflexions successives de l'onde plane ou spirale d'émission sur des diffuseurs du milieu diffusant avant d'atteindre les transducteurs du réseau de transducteurs (T_1 - T_n),
- la répétition des étapes de génération et de réception pour une pluralité d'ondes planes ou spirales d'émission ayant chacune un angle d'émission associé,
- le traitement des signaux de réception pour déterminer des caractéristiques du milieu,

caractérisé en ce que la phase de traitement comprend une étape de séparation :

- de la composante de diffusion simple et
- de la composante de diffusion multiple,

dans lesdits signaux de réception.

[Revendication 2] Procédé d'analyse selon la revendication 1, **dans lequel** chaque étape de génération comprend la sous-étape consistant à :

- activer en émission des transducteurs (T_1 - T_n) du réseau selon une loi de retard d'activation respective, de sorte que chaque transducteur (T_1 - T_n) émet une onde ultrasonore élémentaire (E_1 - E_n) à un instant respectif en fonction de ladite loi de retard d'activation, lesdites ondes ultrasonores élémentaires (E_1 - E_n) se combinant pour former l'onde plane ou spirale d'émission ayant l'angle d'émission souhaité, l'angle d'émission de l'onde plane ou spirale d'émission dépendant de la loi de retard d'activation utilisée.

[Revendication 3] Procédé d'analyse selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, **dans lequel** chaque étape de réception comprend les sous-étapes consistant à :

- activer en réception des transducteurs (T_1 - T_n) du réseau selon une loi de retard d'activation respective, de sorte que chaque transducteur (T_1 - T_n) enregistre un signal reçu élémentaire correspondant à une portion de l'onde plane ou spirale de réception ayant un angle de réception souhaité, l'angle de réception souhaité dépendant de la loi de retard d'activation utilisée,
- combiner les signaux reçus élémentaires pour former un signal de réception correspondant à l'onde plane ou spirale de réception souhaitée.

[Revendication 4] Procédé d'analyse selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, **dans lequel** chaque étape de réception comprend les sous-étapes suivantes :

- activer simultanément les transducteurs (T_1 - T_n) en réception, chaque transducteur enregistrant un signal capté représentatif de plusieurs ondes réverbérées par le milieu,
- combiner les signaux captés selon différentes lois de retard temporelles pour former des signaux de réception représentatifs des ondes planes ou spirales de réception, ladite sous-étape consistant à combiner les signaux comprenant, pour

chaque signal de réception représentatif d'une onde plane ou spirale de réception souhaitée, les phases suivantes :

- pour chaque signal capté, décaler temporellement le signal capté en fonction d'une loi de retard temporelle pour obtenir un signal décalé, chaque loi de retard temporelle utilisée étant associée à un angle de réception souhaité respectif,
- sommer les signaux décalés pour obtenir le signal de réception représentatif de l'onde plane ou spirale de réception souhaitée.

[Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, ***dans lequel*** l'étape de séparation inclut une sous-étape de filtrage d'au moins une matrice inter-angles fenêtrée représentative des angles d'émission et de réception des ondes planes ou spirales d'émission et de réception :

- chaque ligne de la matrice inter-angles fenêtrée étant représentative de l'angle d'émission d'une onde plane ou spirale d'émission, et
- chaque colonne de la matrice inter-angles fenêtrée étant représentative d'un angle de réception d'une onde plane ou spirale de réception.

[Revendication 6] Procédé selon la revendication 5, ***dans lequel*** l'étape de séparation comprend en outre les sous-étapes suivantes :

- détermination d'une pluralité de matrices inter-angles fenêtrées, chaque matrice inter-angle fenêtrée correspondant à une matrice temporelle définissant, sur une fenêtre temporelle voisine d'un temps T et de durée Δt , des couples d'angles d'émission et de réception d'ondes planes ou spirales d'émission et de réception,
- puis pour chaque matrice inter-angles fenêtrée :
 - estimation d'une première matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion simple,
 - estimation d'une deuxième matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion

multiple.

- [Revendication 7] Procédé selon la revendication 6, **dans lequel** pour chaque matrice inter-angles fenêtrée :
- la sous-étape d'estimation d'une première matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion simple consiste à calculer une matrice de Hankel à partir de la matrice inter-angles fenêtrée considérée, ladite matrice de Hankel ayant des coefficients constants sur chaque diagonale ascendante,
 - la sous-étape d'estimation d'une deuxième matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion multiple consiste à soustraire la matrice de Hankel estimée à la matrice inter-angles fenêtrée.
- [Revendication 8] Procédé selon la revendication 7, **dans lequel** la matrice de Hankel consiste en une matrice unique ayant le plus de similarités, selon une norme de Frobenius, avec la matrice inter-angle fenêtrée considérée.
- [Revendication 9] Procédé selon la revendication 6, **dans lequel** pour chaque matrice inter-angles fenêtrée, les sous-étapes d'estimation des première et deuxième matrices inter-angles résultantes comprennent le filtrage de la matrice inter-angles fenêtrée considérée en fonction de la cohérence des coefficients sur chaque diagonale ascendante de ladite matrice inter-angles fenêtrée considérée.
- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 9, **dans lequel** le filtrage de la matrice inter-angles fenêtrée considérée comprend :
- la rotation de la matrice inter-angles d'un angle de 45° pour obtenir au moins une matrice pivotée,
 - la décomposition en au moins une valeur singulière de chaque matrice pivotée pour obtenir une matrice décomposée,
 - la soustraction de la matrice décomposée à ladite matrice pivotée pour obtenir une matrice soustraite,
 - la rotation inverse de la matrice décomposée d'un angle de -45° pour obtenir la première matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion simple,
 - la rotation inverse de la matrice soustraite d'un angle de -45°

pour obtenir la deuxième matrice inter-angles résultante représentative de la composante de diffusion multiple.

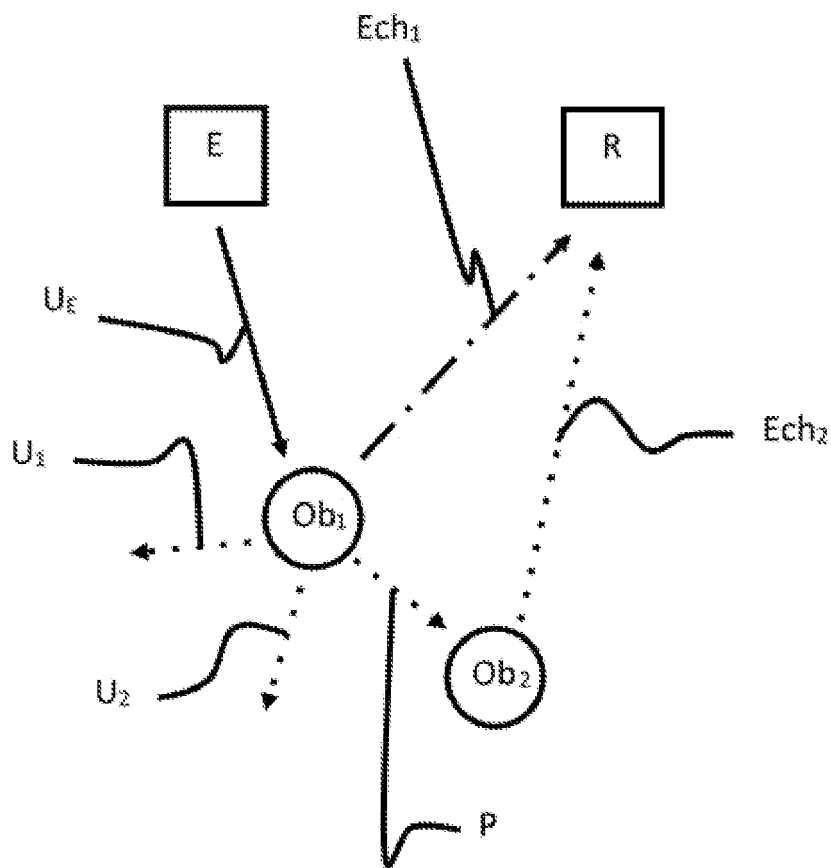
[Revendication 11] Procédé selon la revendication 3, ***dans lequel*** le réseau de transducteurs (T_1 - T_n) comprend une pluralité de transducteurs s'étendant le long d'au moins une ligne de sorte à présenter une forme sensiblement plane :

- l'onde générée durant l'étape de génération consistant en une onde plane,
- les signaux combinés durant l'étape de réception étant représentatifs d'ondes planes de réception,
- chaque loi de retard d'activation consistant en une loi de retard linéaire appliquée aux transducteurs s'étendant le long de l'au moins une ligne.

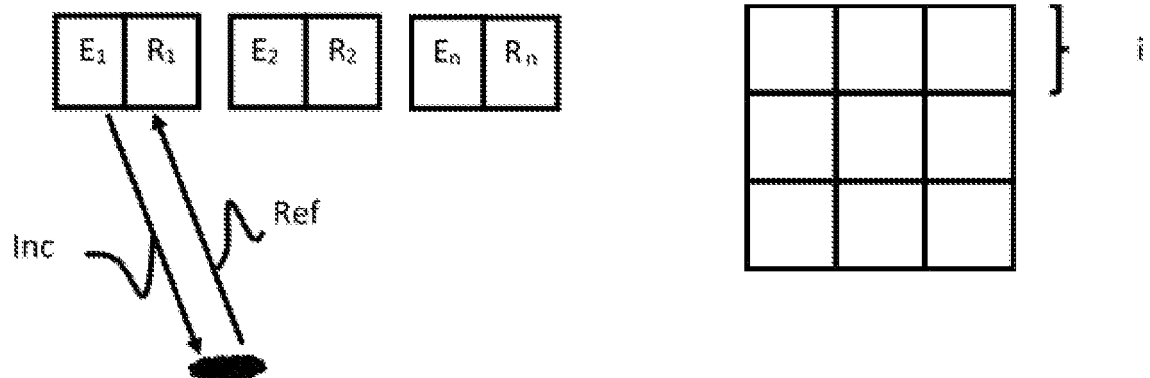
[Revendication 12] Procédé selon la revendication 3, ***dans lequel*** le réseau de transducteurs (T_1 - T_n) comprend une pluralité de transducteurs s'étendant le long d'au moins un rayon de courbure de sorte à présenter une forme convexe :

- l'onde générée durant l'étape de génération consistant en une onde spirale,
- les signaux combinés durant l'étape de réception étant représentatifs d'ondes spirales de réception,
- chaque loi de retard d'activation consistant en une loi de retard linéaire appliquée aux transducteurs s'étendant le long de l'au moins un rayon de courbure.

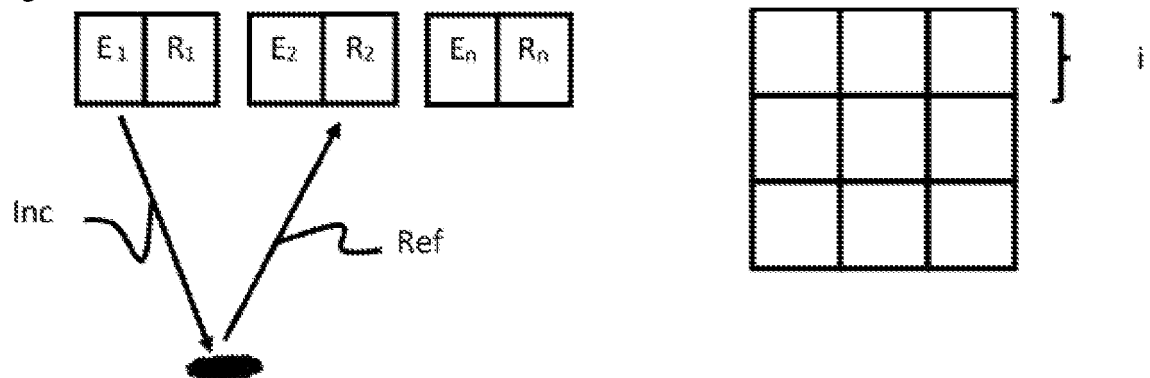
[Fig. 1]



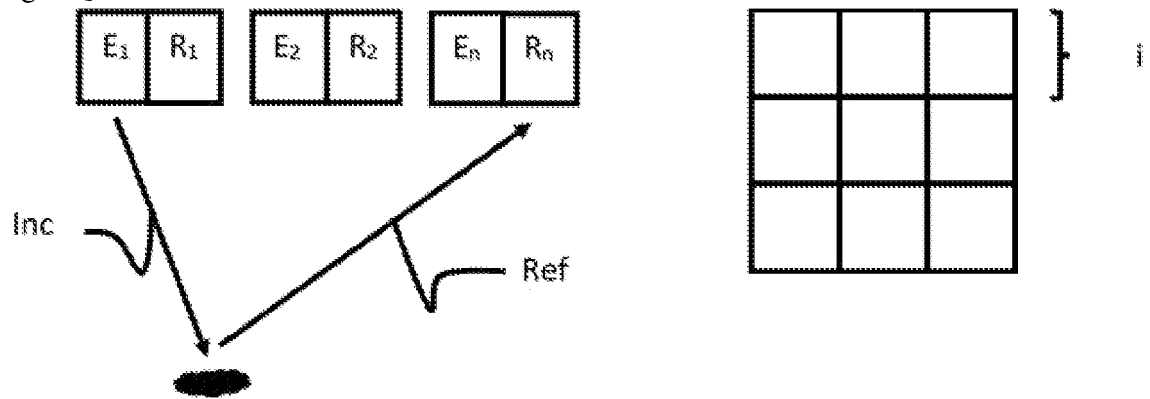
[Fig. 2a]



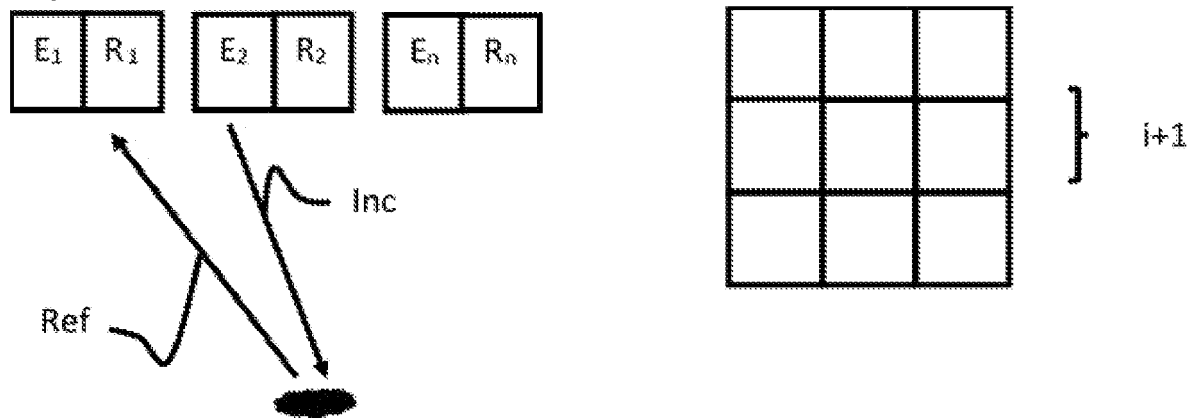
[Fig. 2b]



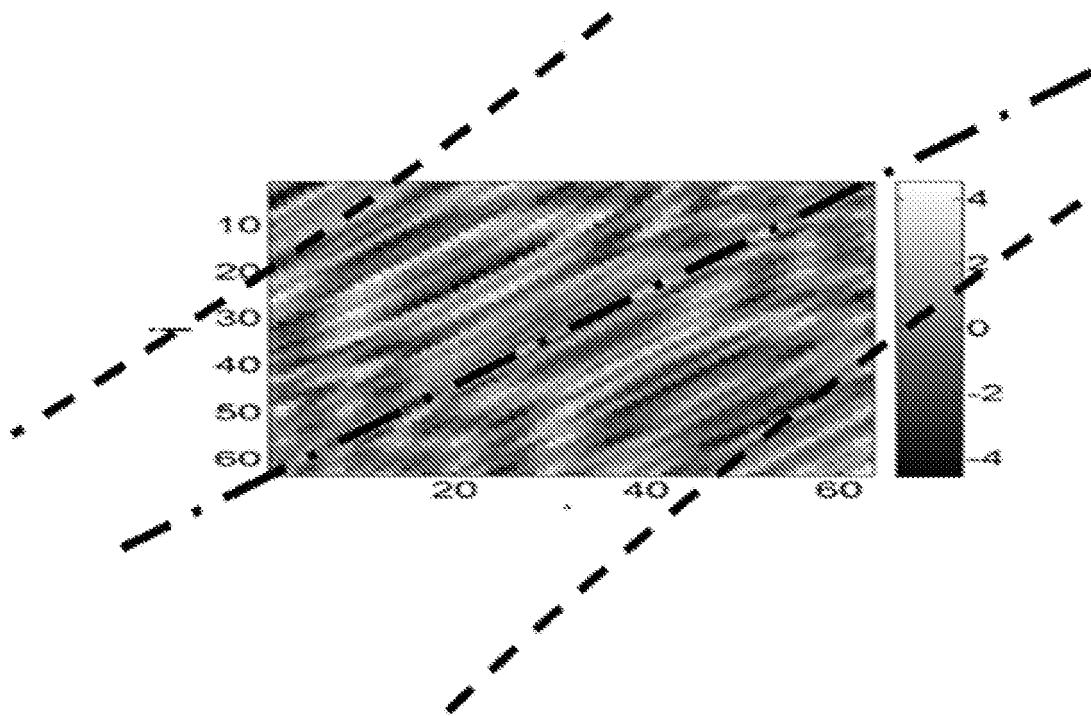
[Fig. 2c]



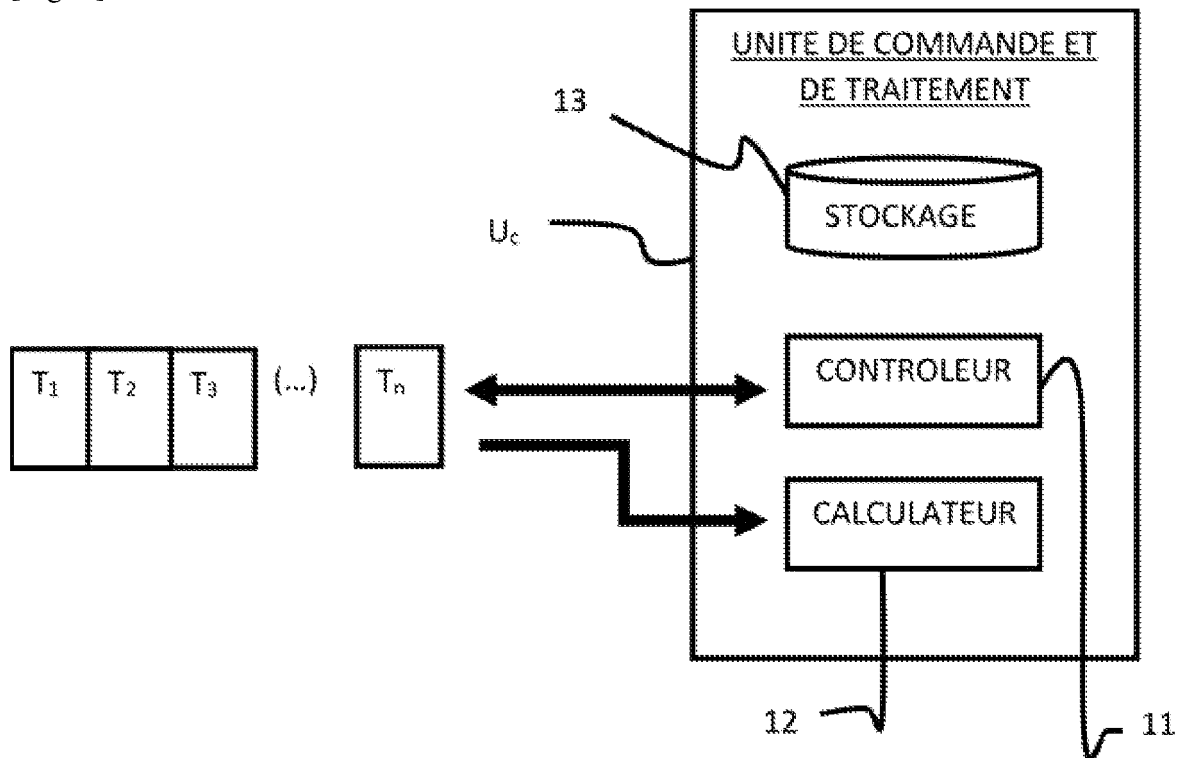
[Fig. 2d]



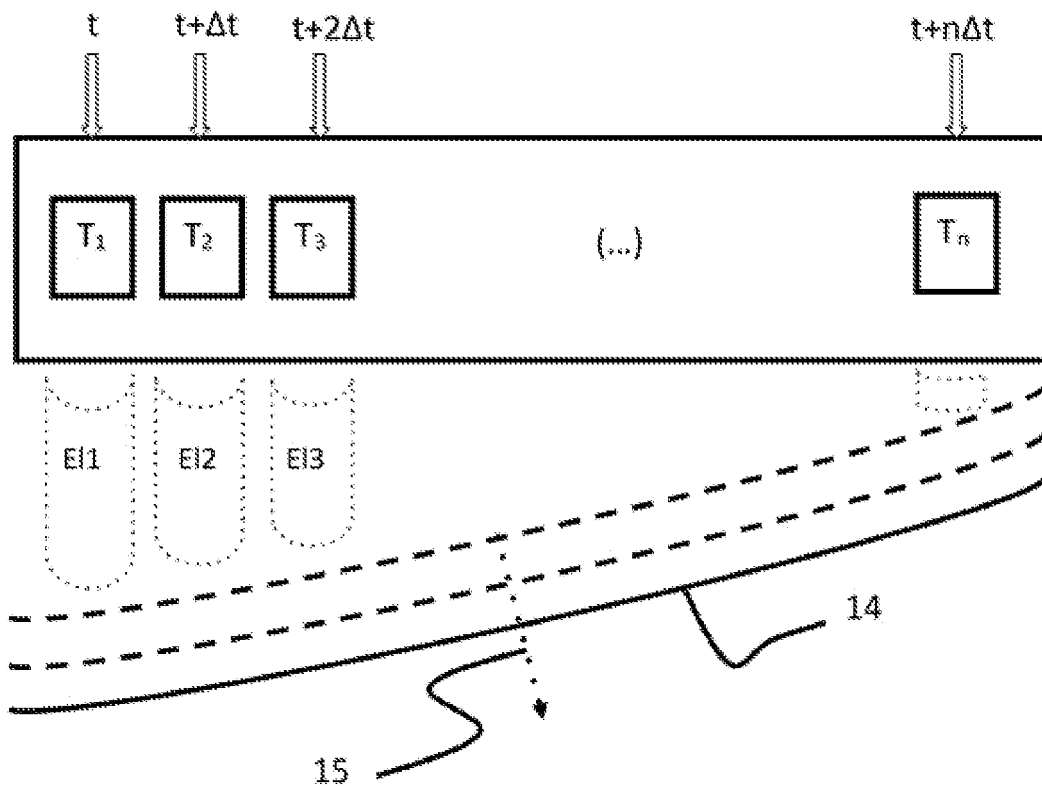
[Fig. 3]



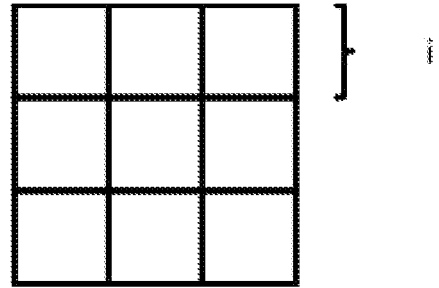
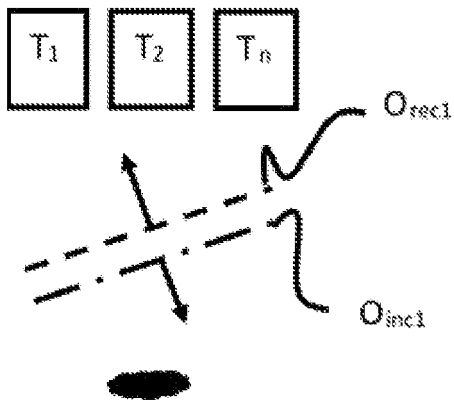
[Fig. 4]



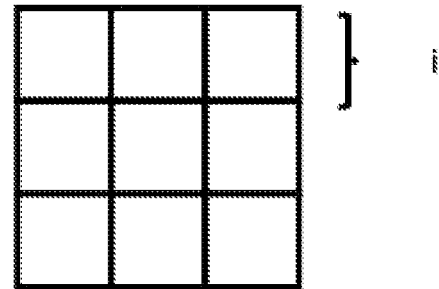
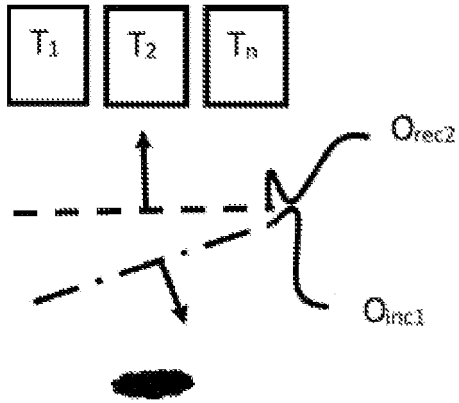
[Fig. 5]



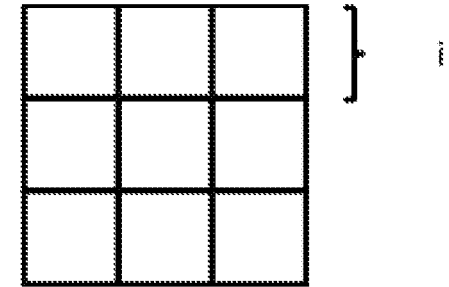
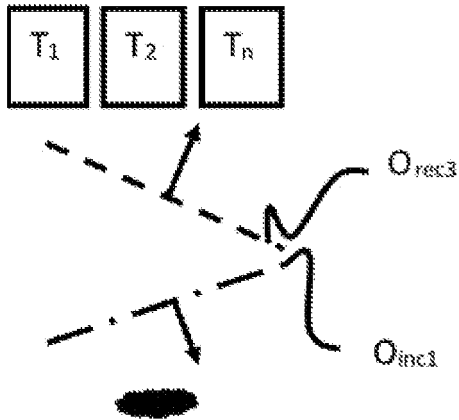
[Fig. 6a]



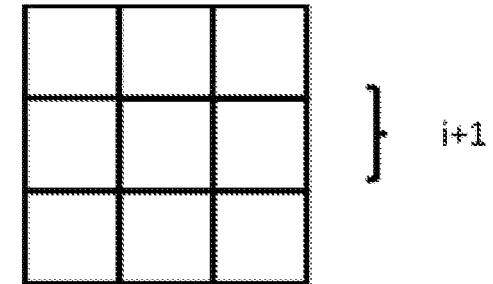
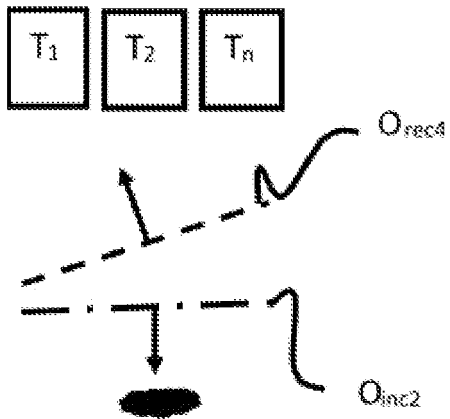
[Fig. 6b]



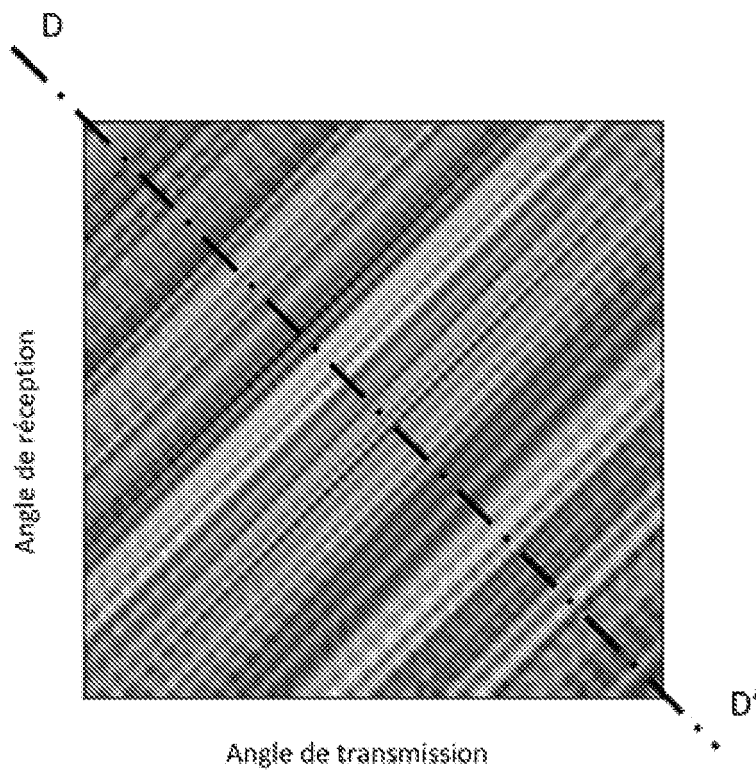
[Fig. 6c]



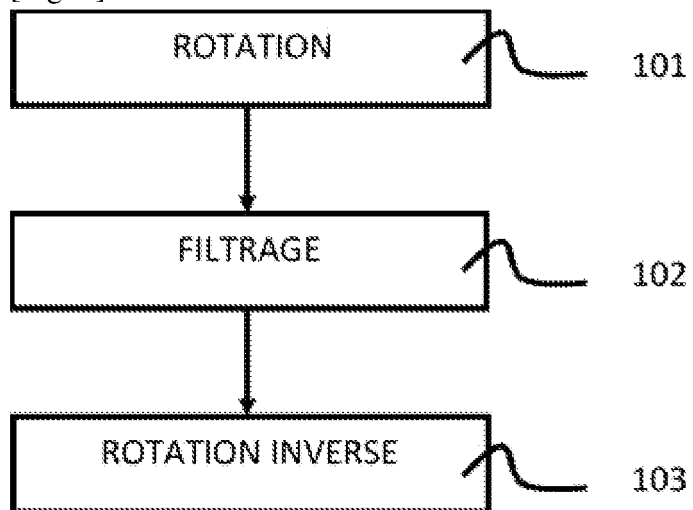
[Fig. 6d]



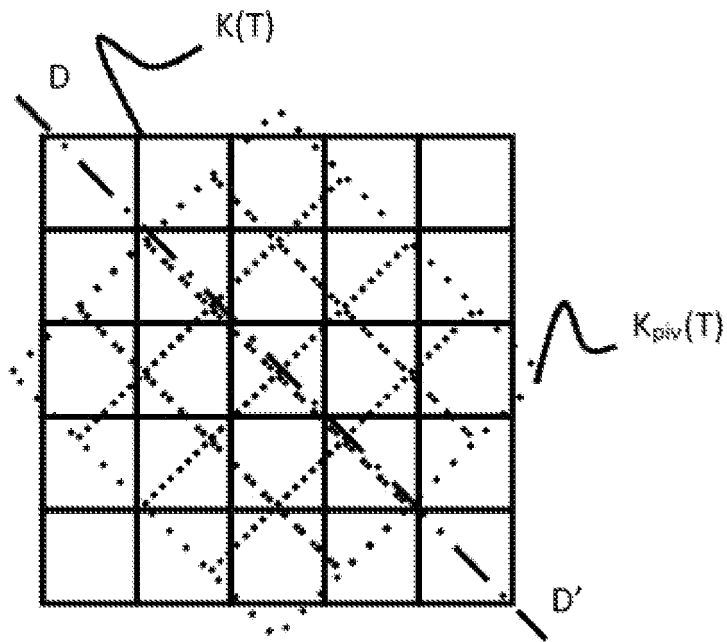
[Fig. 7]



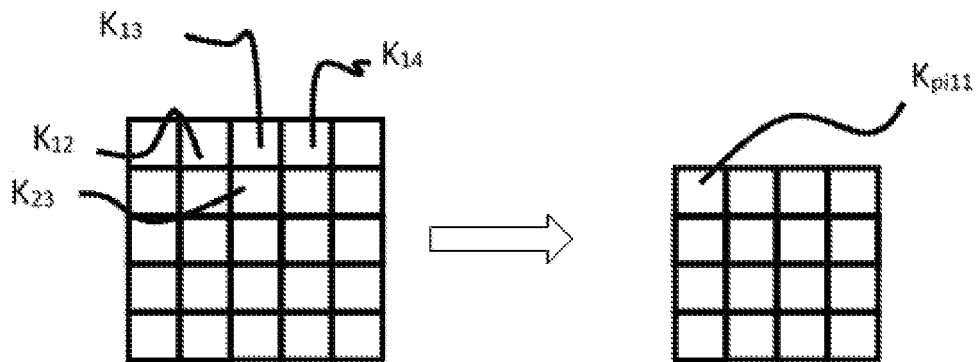
[Fig. 8]



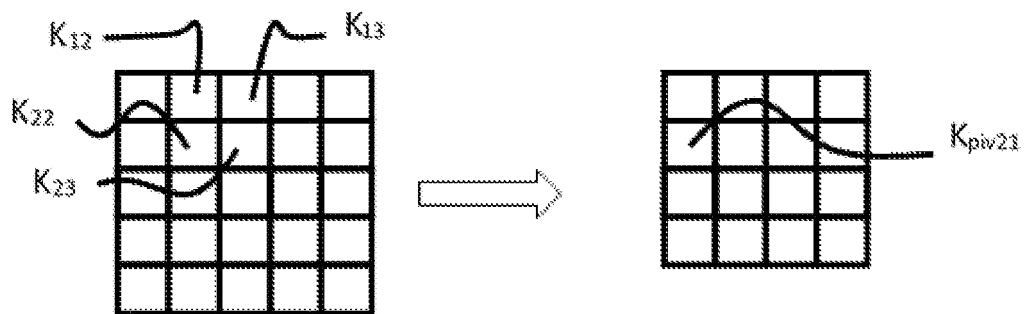
[Fig. 9a]



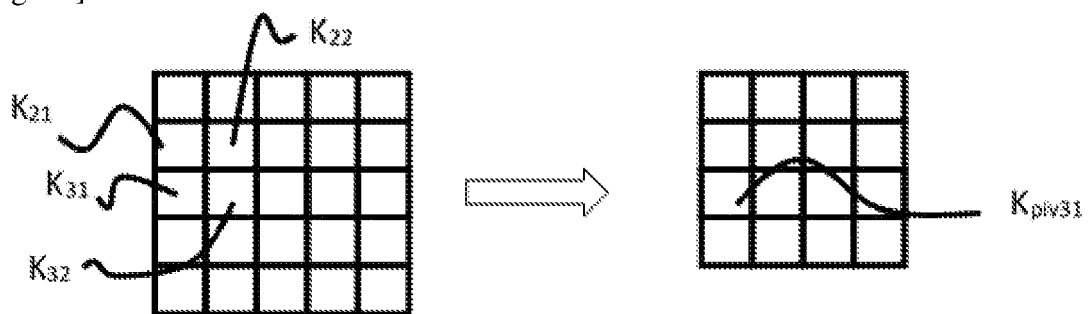
[Fig. 9b]



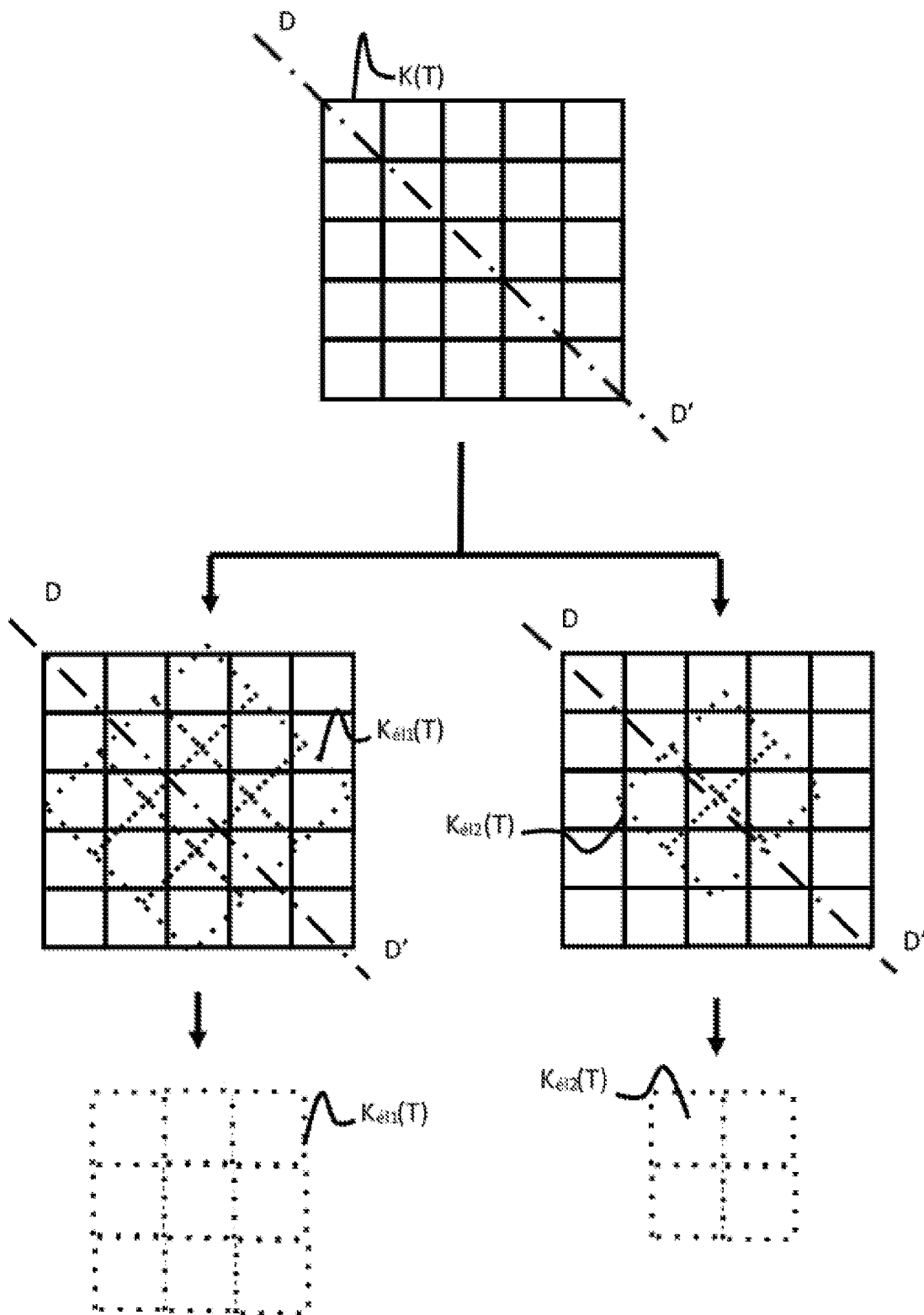
[Fig. 9c]



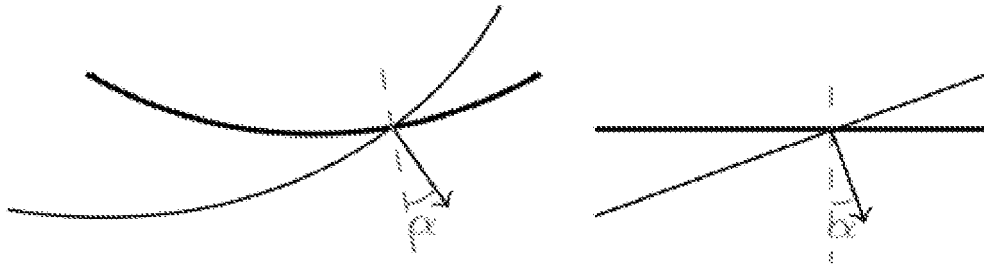
[Fig. 9d]



[Fig. 10]



[Fig. 11]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 898953
FR 2110091

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	Lambert William ET AL: "Reflection Matrix Approach for Quantitative Imaging of Scattering Media", ' 8 novembre 2019 (2019-11-08), pages 1-14, XP055911387, DOI: 10.1103/PhysRevX.10.021048 Extrait de l'Internet: URL:https://arxiv.org/pdf/1911.03147v1.pdf [extrait le 2022-04-11]	1-6, 9, 11, 12	G01S15/00
A	* le document en entier * -----	7, 8, 10	
A	WO 2016/181054 A1 (ELECTRICITE DE FRANCE [FR]; CENTRE NAT DE LA RECH SCIENT - CNRS - [FR]) 17 novembre 2016 (2016-11-17) * abrégé *; figures 1-10, 12 * * page 1, ligne 4 - page 9, ligne 18 * * page 10, ligne 34 - page 37, ligne 33 * * page 39, ligne 16 - page 40, ligne 19 * -----	1-12	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G01S
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
12 avril 2022		Zaneboni, Thomas	
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	

RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2110091 FA 898953

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 **12-04-2022**

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

WO 2016181054	A1	17-11-2016	CN	107710014	A	16-02-2018
			EP	3295212	A1	21-03-2018
			FR	3036192	A1	18-11-2016
			US	2018088232	A1	29-03-2018
			WO	2016181054	A1	17-11-2016