

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 140 437

②1 N° d'enregistrement national : 22 10144

⑤1 Int Cl⁸ : G 01 N 29/22 (2022.01), G 01 N 29/04

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑫② Date de dépôt : 04.10.22.

⑫③ Priorité :

⑫④ Date de mise à la disposition du public de la demande : 05.04.24 Bulletin 24/14.

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) : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.

⑦② Inventeur(s) : DRUET Tom, WAGUET Arthur, MÉS-NIL Olivier et CIUCIU Philippe.

⑦③ Titulaire(s) : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives Etablissement public à caractère industriel et commercial.

⑦④ Mandataire(s) : Lavoix.

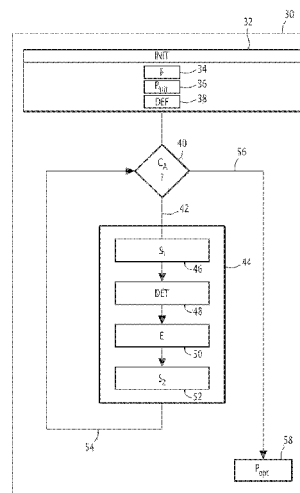
⑤④ Optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées.

⑤⑦ Optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées

L'invention concerne un procédé (30) d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure, comprenant une maximisation itérative de la couverture de zone, dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald, comprenant :

- l'initialisation (32) dudit ensemble de capteurs; et jusqu'à convergence, au moins une itération des étapes suivantes :
- sélection (46), par itération, d'un des capteurs dudit ensemble ;
- détermination (48) d'une zone de voisinage ;
- pour chaque point de ladite zone de voisinage, évaluation (50) d'une métrique prédéterminée de distance entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et celle de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point ;
- sélection (52) du point minimisant ladite métrique, comme nouvelle position dudit capteur sélectionné.

Figure pour l'abrégié: Figure 2



FR 3 140 437 - A1



Description

Titre de l'invention : Optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées

- [0001] La présente invention concerne un procédé d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées.
- [0002] L'invention concerne également un programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, mettent en œuvre un tel procédé d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées.
- [0003] L'invention concerne également un dispositif électronique d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées.
- [0004] La présente invention concerne le domaine du contrôle de santé de structure ou SHM (de l'anglais *Structural Health Monitoring*) visant à détecter et à caractériser, de manière planifiée ou de manière périodique, des dommages (i.e. anomalies) de structures/infrastructures, ainsi que celui du contrôle non destructif (CND) par mesure sur demande. De telles anomalies de structure correspondent à des modifications des propriétés physiques et/ou géométriques de la structure considérée propre à en affecter les performances et/ou la fiabilité.
- [0005] Un tel contrôle de santé de structures, ou un tel contrôle non destructif (CND), sont mis en œuvre par instrumentation desdites structures à contrôler, respectivement à l'aide de capteurs intégrés ou amovibles, par exemple des capteurs piézoélectriques propres à émettre et recevoir des ondes élastiques guidées (OG) ultrasonores, et ce de manière permanente pour contrôler leur état de santé au cours du temps ou à un instant donné.
- [0006] L'utilisation de capteurs sur ou au sein de structures/infrastructures pour surveiller leur état permet notamment de garantir la sécurité des structures porteuses correspondant à des composants mécaniques fin et/ou long, tels que des pâles d'éoliennes, les fuselages ou composants de moteurs d'avion, des tuyaux métalliques ou composite, des câbles de tension, les câbles de suspension de pont, des rails de train, ou toute autre structure à surveiller du secteur « Oil & Gas », nucléaire, aéronautique, etc..
- [0007] En particulier, les ondes ultrasonores élastiques guidées, émises par de tels capteurs, permettent de détecter les défauts structurels menant à des discontinuités ou à des variations de géométrie, tels que des fissures, des délaminages dans des fuselages

composites, de la corrosion menant notamment à une perte d'épaisseur dans des métaux, et/ou l'érosion etc., et ce à un stade précoce et ainsi de les surveiller pendant des décennies.

- [0008] Une telle détection est généralement bien maîtrisée en laboratoire où les effets extérieurs sont limités, maîtrisés et calibrés.
- [0009] Le principal challenge associé à un tel diagnostic de structure, est, en conditions réelles, lié d'une part à la présence d'incertitudes épistémiques sur la structure ou l'instrumentation telles que les positions des capteurs, les propriétés des capteurs, les propriétés élastiques ou géométriques de la structure, et d'autre part lié à la présence d'effets externes d'influence non supervisés (i.e. inconnus) évoluant avec des dynamiques temporelles distinctes.
- [0010] A titre d'alternative aux approches classiques par état de référence, c'est-à-dire une mesure de référence en l'absence de défaut puis en comparant l'état courant à l'état de référence, notamment par soustraction, corrélation, etc. tout en supposant que la seule différence entre états de référence et courant ne peut être attribuée qu'à la présence d'un défaut, mais que tous les autres paramètres d'utilisation, hormis au mieux un seul paramètre d'effet rapide tel que la température, sont égaux entre ces deux états de référence et courant, des procédés de reconstruction par imagerie, notamment de type tomographie par ondes élastiques guidées (OG) permettent actuellement de reconstruire, via un algorithme d'inversion itératif, à partir des résultats fournis par lesdits capteurs, une cartographie de l'épaisseur de la structure et donc d'imager de potentiels endommagements/défauts.
- [0011] La tomographie par ondes élastiques guidées (OG) repose notamment sur des modèles de propagation d'onde, par exemple, la tomographie par rayonnement, la tomographie en temps de vol, telle notamment décrite par J. C. P McKeon et M. K. Hinders dans l'article intitulé « *Parallel projection and crosshole Lamb contact scanning tomography* » de 1999 et la tomographie par diffraction, telle notamment décrite par F. Simonetti et H. Huang dans l'article intitulé « *From beamforming to diffraction tomography* » de 2008.
- [0012] De plus, grâce à des méthodes d'autocalibration notamment décrites par T. Druet dans l'article intitulé « *Autocalibration method for guided wave tomography with undersampled data* » de 2019, la tomographie a le potentiel d'être plus robuste que les approches par état de référence puisque la reconstruction des défauts est faite uniquement à partir de l'état courant (i.e. signaux mesurés sur une structure présentant déjà un potentiel défaut).
- [0013] Cependant, en tomographie, des critères théoriques sont utilisés pour déterminer le nombre de capteurs nécessaires en théorie pour atteindre une reconstruction de défaut optimale, nombre qui est le plus souvent très important et supérieur à celui requis par

les approches classiques par état de référence, et par conséquent prohibitif pour beaucoup d'application SHM notamment en termes de coût, de masse ajoutée et/ou de complexité d'intégration.

- [0014] En effet, à titre d'exemple non limitatif, en environnement de laboratoire et pour contrôler une zone de l'ordre du m^2 , les approches classiques par état de référence demandent de l'ordre de dix capteurs, tandis que les méthodes de tomographie demandent de l'ordre de cent capteurs (pour atteindre la résolution et précision maximale permise par la méthode de tomographie).
- [0015] Ainsi, le principal écueil de la tomographie par ondes élastiques guidées (OG) est le nombre de capteurs requis et la résolution théorique maximale, en considérant par exemple qu'une résolution spatiale d'une demi longueur d'onde serait atteinte avec cent-vingt capteurs, (autrement dit en considérant une distance inter-capteur inférieure ou égale à une demi longueur d'onde, le nombre de capteurs minimal est égal au périmètre de la zone à inspecter divisé par ladite distance inter-capteurs).
- [0016] En pratique, pour utiliser la tomographie par ondes élastiques guidées (OG), le nombre de capteurs utilisé est bien souvent volontairement diminué pour respecter les contraintes de coût, masse ajoutée et/ou complexité du système SHM énoncées précédemment, mais cela mène évidemment en contrepartie à des reconstructions dégradées des défauts.
- [0017] Pour y remédier, des méthodes de tomographie couplées à une acquisition comprimée (CS de l'anglais *Compressed Sensing*) ont été développées tel que notamment décrit par M. Chang et al. dans l'article intitulé « *Corrosion monitoring using a new compressed sensing-based tomographic method* » de 2020, et sont basées sur la mise en œuvre d'un traitement du signal (i.e. traitement de données) propre à reconstruire des données échantillonnées sous la fréquence de Nyquist (i.e. respectant le critère de S, ce qui revient spécifiquement en SHM à reconstruire une image par tomographie en utilisant un nombre réduit et limité de capteurs piézoélectriques propres à émettre et recevoir des ondes élastiques guidées (OG), tout en gardant des qualités de reconstructions des défauts maximales.
- [0018] Toutefois, ces derniers développements présentent généralement une résolution encore inférieure à celle associée à la tomographie par diffraction.
- [0019] De plus, en acquisition comprimée (CS de l'anglais *Compressed Sensing*), il est connu qu'un processus de mesure aléatoire/incohérent est plus favorable à la reconstruction qu'un échantillonnage régulier. Dans d'autres domaines scientifiques, l'incohérence du procédé de mesure est souvent ajoutée en exécutant des déplacements/permutations du/des capteurs(s). Cependant, et en particulier en SHM où les capteurs sont fixés sur la structure, déplacer les capteurs est impossible dans le contexte de cette invention.

- [0020] Le but de cette invention est donc de proposer un procédé et un dispositif propres à fournir un diagnostic précoce et fiable de défaut structurel en conditions réelles d'utilisation, en s'affranchissant d'un état de référence (i.e. de manière absolue), tout en étant robuste et en fournissant une imagerie de défauts la plus fidèle possible, et ce, en limitant le nombre de capteurs nécessaires à maintenir une qualité de reconstruction maximale, notamment dans un contexte de tomographie par diffraction, et ce, sans déplacer les capteurs.
- [0021] A cet effet, l'invention a pour objet un procédé d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées, les capteurs dudit ensemble étant disposés sur ladite structure, ledit procédé comprenant une maximisation itérative de la couverture de zone du réseau de capteurs associé audit ensemble dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald, ladite maximisation itérative comprenant :
- [0022] - l'initialisation dudit ensemble de capteurs; et
- [0023] jusqu'à convergence selon un critère d'arrêt prédéterminé, au moins une itération des étapes successives suivantes :
- [0024] - sélection, par itération, d'un des capteurs dudit ensemble de capteurs ;
- [0025] - détermination d'une zone de voisinage correspondant à un ensemble de points autour de la position courante dudit capteur sélectionné ;
- [0026] - pour chaque point de ladite zone de voisinage, évaluation d'une métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point ;
- [0027] - sélection du point de ladite zone de voisinage minimisant ladite métrique, comme nouvelle position dudit capteur sélectionné.
- [0028] Ce procédé vise ainsi à déterminer astucieusement le placement des capteurs pour maximiser l'information reçue issue de chacun tout en limitant leur nombre.
- [0029] En effet, en tomographie par ondes élastiques guidées (OG) classique, comme indiqué précédemment pour atteindre une qualité de reconstruction des défauts maximale, il faut théoriquement placer un capteur toutes les demies longueurs d'ondes λ . En faisant classiquement cela, l'ensemble du cercle d'Ewald correspondant à un cercle dans l'espace des nombres d'ondes de rayon $2k_0 = 2\frac{2\pi}{\lambda}$, est alors précisément maillé, ce qui permet l'accès à l'ensemble des fréquences spatiales disponibles pour une fréquence temporelle de travail donnée.
- [0030] Cependant, un tel choix classique d'un échantillonnage régulier (i.e. un capteur toutes les demies longueurs d'ondes) mène à des mesures redondantes de

l'information, et la présente invention permet d'éviter une telle redondance en positionnant astucieusement les capteurs pour mesurer toute l'information (maillage de l'ensemble du cercle d'Ewald) en limitant au maximum les redondances dans les données. Cette démarche mène à une utilisation d'un nombre de capteurs minimal mais suffisant pour atteindre une qualité de reconstruction maximale permise par la méthode de tomographie.

- [0031] Suivant d'autres aspects avantageux de l'invention, le procédé d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :
- [0032] - ladite initialisation comprend :
- [0033] - la fixation du nombre de capteurs dudit ensemble de capteurs dont le placement est à optimiser ;
- [0034] - l'établissement d'un placement initial de chacun des capteurs dudit ensemble de capteurs ;
- [0035] - la définition de ladite distribution de capteurs idéale et l'obtention de la couverture fréquentielle normalisée de ladite distribution de capteurs idéale ;
- [0036] - ladite détermination d'une zone de voisinage définit une grille d'un nombre prédéterminé de positions potentielles dudit capteur sélectionnées en fonction d'une longueur d'onde d'intérêt associée à ladite tomographie à onde guidées, ladite grille étant centrée sur la position courante dudit capteur sélectionné ;
- [0037] - l'échantillonnage de ladite grille est une fraction de ladite longueur d'onde ;
- [0038] - un degré de liberté d'un capteur dudit ensemble de capteurs est inhibé ;
- [0039] - ladite métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point, est une métrique de divergence de Kullback-Leibler ;
- [0040] - ladite métrique est définie avec, ou sans, zone cible du plan cartésien de l'image obtenue par tomographie à onde guidée de ladite structure, zone cible dans laquelle une reconstruction correcte de défaut(s) est imposée ;
- [0041] - ladite zone cible correspond à une fenêtre circulaire de Tukey, dont la forme dans la zone de transition est une demi-sinusoïde ;
- [0042] - ledit critère d'arrêt prédéterminé correspond à :
- [0043] - une variation entre deux itérations successives de ladite métrique inférieure à un seuil prédéterminé, et/ou à
- [0044] - une absence de changement de position de chacun des capteurs après parcours d'un tour complet dudit ensemble de capteurs disposés sur ledit cercle d'Ewald, et/ou à

- [0045] l'atteinte d'un nombre maximal d'itérations prédéterminé ;
- [0046] L'invention a également pour objet un programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, mettent en œuvre un tel procédé d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs en tomographie à ondes guidées tel que défini ci-dessus.
- [0047] L'invention concerne également un dispositif électronique d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées, les capteurs dudit ensemble étant disposés sur ladite structure, ledit dispositif comprenant une unité de maximisation itérative configurée pour maximiser la couverture de zone du réseau de capteurs associé audit ensemble dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald, ladite unité de maximisation itérative comprenant :
- [0048] - un module d'initialisation configuré pour initialiser ledit ensemble de capteurs ; et
- [0049] mis en œuvre itérativement ; jusqu'à convergence selon un critère d'arrêt prédéterminé, les éléments suivants :
- [0050] - un premier module de sélection configuré pour sélectionner, par itération, un des capteurs dudit ensemble de capteurs ;
- [0051] - un module de détermination configuré pour déterminer, par itération, une zone de voisinage correspondant à un ensemble de points autour de la position courante dudit capteur sélectionné ;
- [0052] - un module d'évaluation configuré, pour chaque point de ladite zone de voisinage, pour évaluer, par itération, une métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point ;
- [0053] - un deuxième module de sélection configuré pour sélectionner le point de ladite zone de voisinage minimisant ladite métrique comme nouvelle position dudit capteur sélectionné.
- [0054] L'invention concerne également un système de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées au moyen d'un ensemble de capteurs, les capteurs dudit ensemble étant disposés sur ladite structure, ledit système comprenant :
- [0055] - ledit ensemble de capteurs ;
- [0056] - un dispositif électronique d'optimisation du placement dudit ensemble de capteurs tel que décrit précédemment ;
- [0057] - un module de détection d'anomalies par tomographie à ondes guidées configuré pour utiliser les mesures dudit ensemble de capteurs afin de fournir une tomographie de ladite structure.
- [0058] Suivant d'autres aspects avantageux de l'invention, le système de détection

d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées au moyen d'un ensemble de capteurs comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :

- [0059] - les capteurs dudit ensemble sont selon l'un des types appartenant au groupe comprenant au moins :
- [0060] - les capteurs piézoélectriques ;
- [0061] - les capteurs EMAT ;
- [0062] - les capteurs FBG ;
- [0063] - les capteurs PVDF ;
- [0064] - le système est propre à fonctionner en :
- [0065] - mode actif selon lequel les capteurs génèrent et mesurent les ondes guidées, ou en
- [0066] - mode passif selon lequel les capteurs sont configurés pour mesurer les ondes guidées présentes dans la structures naturellement durant son exploitation, les signaux mesurés par lesdits capteurs en mode passif étant propres à être utilisés pour déterminer une fonction représentative de la réponse impulsionnelle de ladite structure ;
- [0067] - le module de détection d'anomalies par tomographie à ondes guidées configuré pour utiliser les mesures dudit ensemble de capteurs afin de fournir une tomographie de ladite structure comprend un solveur permettant la résolution d'un problème de minimisation sous la forme :
- [0068] $\hat{O} = \underset{O}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \|\varphi - \Phi(O)\|_2^2 + R(O)$ où O représente la fonction objet caractérisant un défaut de ladite structure, R est un terme de pénalité permettant la régularisation de la solution, φ représente les champs mesurés via lesdits capteurs dudit ensemble, Φ représente un modèle suivant une équation de Lippmann Schwinger :
- [0069] $\Phi(x_j, x_i) - \Phi^0(x_j, x_i) = \iint_{\Omega} G_0(x_j, x) O(x) \Phi(x, x_i) d^2x$
- [0070] G_0 étant la fonction de Green, solution de l'équation de Helmholtz associée à l'état sain de ladite structure.
- [0071] Ces caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :
- [0072] - [Fig.1] la [Fig.1] est un schéma illustrant un dispositif d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées selon la présente invention;
- [0073] - [Fig.2] la [Fig.2] est un organigramme d'un procédé d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées selon la présente invention ;
- [0074] - [Fig.3] la [Fig.3] est un schéma illustrant de manière générale le fonctionnement de

la tomographie par onde guidée ;

- [0075] - [Fig.4] la [Fig.4] est un schéma illustrant deux exemples de zones de voisinage d'un capteur selon deux variantes de la présente invention et le déplacement obtenu ;
- [0076] - [Fig.5] la [Fig.5] illustre l'obtention d'un placement de capteurs optimisé selon la présente invention et de l'évolution de la métrique associée au cours de ladite optimisation ;
- [0077] - [Fig.6] la [Fig.6] illustre le déplacement de capteurs obtenu après optimisation à partir d'une configuration initiale ;
- [0078] - [Fig.7] la [Fig.7] compare sur un exemple donné les résultats obtenus selon la présente invention à ceux obtenus selon l'état de la technique.
- [0079] Dans la suite de la description, l'expression « sensiblement égal à » s'entend comme une relation d'égalité à plus ou moins 10%, c'est-à-dire avec une variation d'au plus 10%, de préférence encore comme une relation d'égalité à plus ou moins 5%, c'est-à-dire avec une variation d'au plus 5%.
- [0080] La [Fig.1] est une représentation d'un dispositif électronique 10 d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées, les capteurs (non représentés) dudit ensemble étant disposés sur ladite structure (non représentée).
- [0081] Il est à noter que lesdits capteurs sont propres à fonctionner en « mode actif » selon lequel les capteurs génèrent et mesurent les ondes guidées (e.g. ultrasonores), ou en « mode passif » selon lequel les capteurs se contentent de mesurer les ondes guidées (e.g. ultrasonores) présentes dans la structures naturellement durant son exploitation.
- [0082] Les méthodes passives (corrélation de bruit, filtre inverse passif ou encore corrélation de coda de corrélation) permettent de reconstruire les mêmes signaux (ou pratiquement les mêmes selon le respect ou non de certaines hypothèses) que ceux que l'on mesure en mode actif mais de manière totalement passive.
- [0083] Plus précisément, il n'y a pas d'émission d'ondes par les capteurs en mode passif. Les capteurs ne font que de mesurer le bruit ambiant, sur un temps suffisamment long, naturellement présent dans la structure inspectée durant son exploitation. Le bruit ambiant est une somme d'ondes guidées de différentes intensités et se propageant dans différentes directions. Ce bruit ambiant est alors traité par une méthode dite passive (i.e. un traitement passif), dont des exemples sont décrits dans les demandes de brevet FR 3 073 289, FR 3 084 748, FR 3 105 554, permettant de déterminer une fonction représentative de la réponse impulsionnelle de la structure (correspondant sensiblement au signal mesuré en mode actif). De telles reconstructions de signaux sont propres à être utilisées en tant que données d'entrée de tomographie de la même manière qu'en mode actif.
- [0084] De plus, par capteurs, on entend par la suite des capteurs selon l'un des types de

capteurs ou combinaisons de capteurs suivants : des capteurs piézoélectriques, des réseaux de Bragg sur fibre optique, ou FBG (de l'anglais *Fiber Bragg Gratings*), EMAT (de l'anglais *Electro magneto acoustic transducer*), PVDF (Polyvinylidene fluoride), etc.

- [0085] Selon la présente invention, le dispositif 10 comprend une unité de maximisation itérative (non représentée) configurée pour maximiser la couverture de zone du réseau de capteurs associé audit ensemble dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald. Plus précisément, l'unité de maximisation itérative comprend tout d'abord un module d'initialisation 12 configuré pour initialiser ledit ensemble de capteurs.
- [0086] Selon une variante optionnelle complémentaire, décrite plus en détail par la suite en relation avec la [Fig.2] illustrant le procédé mis en œuvre par ledit dispositif électronique 10, le module d'initialisation 12 est plus précisément configuré pour fixer le nombre de capteurs dudit ensemble de capteurs dont le placement est à optimiser, pour établir un placement initial de chacun des capteurs dudit ensemble de capteurs, et enfin pour définir la distribution de capteurs idéale et l'obtention de la couverture fréquentielle normalisée de ladite distribution de capteurs idéale.
- [0087] Par ailleurs, selon la présente invention, l'unité de maximisation itérative du dispositif électronique 10 comprend également un premier module 14 de sélection configuré pour sélectionner, par itération, un des capteurs dudit ensemble de capteurs.
- [0088] De plus, selon la présente invention, l'unité de maximisation itérative du dispositif électronique 10 comprend également un module de détermination 16 configuré pour déterminer, par itération, une zone de voisinage correspondant à un ensemble de points autour de la position courante dudit capteur sélectionné.
- [0089] En outre, selon la présente invention, l'unité de maximisation itérative du dispositif électronique 10 comprend également un module d'évaluation 18 configuré, pour chaque point de ladite zone de voisinage, pour évaluer, par itération, une métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point.
- [0090] Enfin, selon la présente invention, l'unité de maximisation itérative du dispositif électronique 10 comprend aussi un deuxième module de sélection 20 configuré pour sélectionner le point de ladite zone de voisinage minimisant ladite métrique, comme nouvelle position dudit capteur sélectionné.
- [0091] Les modules 14, 16, 18 et 20 de l'unité de maximisation itérative du dispositif électronique 10 sont mis en œuvre itérativement ; jusqu'à convergence selon un critère d'arrêt prédéterminé. Autrement dit, ces modules 14, 16, 18 et 20 sont propres à être

mis en œuvre successivement au cours d'une même itération; chaque itération étant répétée jusqu'à convergence selon un critère d'arrêt prédéterminé.

- [0092] Dans l'exemple de la [Fig.1], le dispositif électronique 10 d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées comprend une unité de traitement d'informations 22 formée par exemple d'une mémoire 24 et d'un processeur 26 associé à la mémoire 24.
- [0093] Dans l'exemple de la [Fig.1], le module d'initialisation 12, le premier module 14 de sélection, le module de détermination 16, le module d'évaluation 18, le deuxième module de sélection 20 sont réalisés chacun sous forme d'un logiciel, ou d'une brique logicielle, exécutable par le processeur 26. La mémoire 24 du dispositif électronique 10 d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées est alors apte à stocker, pour mettre en œuvre la maximisation itérative de la couverture de zone du réseau de capteurs associé audit ensemble dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald, un logiciel d'initialisation, et de manière itérative, un premier logiciel de sélection, un logiciel de détermination, un logiciel d'évaluation, et un deuxième logiciel de sélection. Le processeur 26 est alors apte à exécuter chacun des logiciels parmi le logiciel d'initialisation, le premier logiciel de sélection, le logiciel de détermination, le logiciel d'évaluation, et le deuxième logiciel de sélection.
- [0094] En variante non représentée, le module d'initialisation 12, le premier module 14 de sélection, le module de détermination 16, le module d'évaluation 18, le deuxième module de sélection 20 sont réalisés chacun sous forme d'un composant logique programmable, tel qu'un FPGA (de l'anglais *Field Programmable Gate Array*), ou un processeur graphique GPU (de l'anglais *Graphics Processing Unit*), ou encore sous forme d'un circuit intégré, tel qu'un ASIC (de l'anglais *Application Specific Integrated Circuit*).
- [0095] Lorsque le dispositif électronique 10 d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées est réalisé sous forme d'un ou plusieurs logiciels, c'est-à-dire sous forme d'un programme d'ordinateur, également appelé produit programme d'ordinateur, il est en outre apte à être enregistré sur un support, non représenté, lisible par ordinateur. Le support lisible par ordinateur est par exemple un medium apte à mémoriser des instructions électroniques et à être couplé à un bus d'un système informatique. A titre d'exemple, le support lisible est un disque optique, un disque magnéto-optique, une mémoire ROM, une mémoire RAM, tout type de mémoire non-volatile (par exemple EPROM, EEPROM, FLASH, NVRAM), une carte magnétique ou une carte optique. Sur le support lisible est alors mémorisé un programme d'ordinateur comprenant des instructions logicielles.

- [0096] Le fonctionnement du dispositif électronique 10 d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées va maintenant être décrit en référence à la [Fig.2] qui illustre schématiquement un exemple de mise en œuvre, selon la présente invention, d'un procédé 30 d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées, les capteurs dudit ensemble étant disposés sur ladite structure (non représentée).
- [0097] Plus précisément, selon la présente invention, le procédé 30 correspond à une maximisation itérative de la couverture de zone du réseau de capteurs associé audit ensemble dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald.
- [0098] Ladite maximisation itérative comprend tout d'abord une étape 32 d'initialisation dudit ensemble de capteurs.
- [0099] En complément optionnel, ladite initialisation 32 comprend une première sous-étape 34 de fixation du nombre de capteurs dudit ensemble de capteurs dont le placement est à optimiser. Par exemple, le nombre de capteurs du réseau de capteurs (i.e. ensemble de capteurs) dont on cherche à optimiser le placement comprend sept, dix, quinze, etc., capteurs.
- [0100] Selon ce complément, ladite initialisation 32 comprend en outre une deuxième sous-étape 36 d'établissement d'un placement initial P_{init} (i.e. positionnement initial) de chacun des capteurs dudit ensemble de capteurs, par exemple un placement régulier, car la disposition régulière sur le cercle d'Ewald est dans le cas général la disposition par défaut.
- [0101] Selon ce complément, ladite initialisation 32 comprend en outre une troisième sous-étape 38 de définition de ladite distribution de capteurs idéale (i.e. configuration de référence) et l'obtention de la couverture fréquentielle normalisée de ladite distribution de capteurs idéale, représentée par la suite sensiblement par la lettre équivalente Q . Par exemple, une telle configuration de référence est définie de sorte à correspondre à une configuration régulière de par exemple soixante-seize capteurs.
- [0102] Puis le procédé 30 d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées comprend une boucle itérative réitérée jusqu'à convergence selon un critère d'arrêt prédéterminé C_A testé lors de l'étape 40.
- [0103] Tant que le critère d'arrêt prédéterminé C_A n'est pas atteint tel qu'illustré par la flèche 42, la boucle itérative 44 et mise en œuvre.
- [0104] La boucle itérative 44 comprend les quatre étapes successives décrites ci-après, à savoir tout d'abord une étape 46 de sélection S_i d'un des capteurs dudit ensemble de capteurs. Le critère d'arrêt prédéterminé C_A permet notamment d'assurer qu'à la fin du processus itératif chaque capteur de l'ensemble ait été traité, par exemple succes-

sivement et plusieurs fois chacun.

- [0105] Ensuite, la boucle itérative 44 comprend une étape 48 de détermination DET d'une zone de voisinage correspondant à un ensemble de points autour de la position courante dudit capteur sélectionné précédemment lors de l'étape 46.
- [0106] Puis, la boucle itérative 44 comprend pour chaque point de ladite zone de voisinage, une étape 50 d'évaluation E d'une métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale (notamment obtenue lors de l'étape d'initialisation 32), et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point.
- [0107] Enfin, la boucle itérative 44 comprend une étape 52 de sélection S_2 du point de ladite zone de voisinage minimisant ladite métrique comme nouvelle position dudit capteur sélectionné.
- [0108] Comme représenté par la flèche 54, il s'agit d'une méthode itérative où l'on vient répéter (i.e. réitérer) successivement les étapes 46, 48, 50 jusqu'à convergence afin d'optimiser le placement de chaque capteur un par un. Une fois le critère de convergence atteint tel que testé à l'étape 40, on obtient, selon la flèche 56, en résultat 58 un positionnement P_{opt} jugé « optimal » des capteurs.
- [0109] Par la suite on décrit plus en détail les étapes du procédé 30 en relation avec les figures 3 à 7.
- [0110] En particulier, la [Fig.3] est un schéma illustrant de manière générale le fonctionnement de la tomographie par onde guidée.
- [0111] Plus précisément, sur la vue schématique 60 « réelle » de la [Fig.3], une structure porteuse, à savoir une plaque, d'un défaut 62 est représentée instrumentée par un réseau de capteurs 64, par exemple piézoélectriques. Un tel défaut 62 propre à être présent dans la structure, correspond par exemple à une perte d'épaisseur par corrosion/érosion, ou à un délaminage dans un composite ou encore à une fissure dans un matériau métallique.
- [0112] Sur la [Fig.3], le symbole 66 représente la génération/mesure, par les capteurs 64, d'ondes ultrasonores. La vue 68 illustre ensuite, après extraction et calibration des champs φ des signaux temporels acquis, le traitement des signaux obtenus, et en particulier la représentation du temps de vol théorique associé au signal acquis par chaque capteur 64 (i.e. chaque capteur 64 met en œuvre une acquisition de données).
- [0113] A partir de ces champs φ acquis par les capteurs 64, la reconstruction d'une cartographie de vitesses de la zone à inspecter (i.e. la tomographie en elle-même) est mise en œuvre et basée sur un modèle suivant l'équation de Lippmann Schwinger :

$$[0114] \quad \Phi(x_j, x_i) - \Phi^0(x_j, x_i) = \iint_{\Omega} G_0(x_j, x) O(x) \Phi(x, x_i) d^2x \quad (1)$$

- [0115] G_0 étant la fonction de Green, solution de l'équation de Helmholtz associée à l'état sain de la structure.
- [0116] Une telle reconstruction est par exemple réalisée en utilisant un solveur, par exemple non-linéaire (ou à titre d'alternative utilisant une succession d'itérations linéaires), permettant la résolution d'un problème de minimisation sous la forme :
- [0117]
$$\hat{O} = \underset{O}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \| \varphi - \Phi(O) \|_2^2 + R(O). \quad (2)$$
où φ représente, comme indiqué précédemment les champs mesurés via lesdits capteurs 64, Φ représente le modèle précité suivant l'équation de Lippmann Schwinger, O est la fonction objet caractérisant le défaut 62, et R est un terme de pénalité permettant la régularisation de la solution. Il s'agit donc de trouver la fonction objet \hat{O} qui réalise le meilleur compromis entre un terme de fidélité aux mesures φ selon le modèle Φ et une structure régulière imposée par R .
- [0118] Notons que si la régularisation R est proportionnelle à la norme L1, une telle reconstruction est dans une configuration type « Lasso » tel que décrit par Q. Bertrand et al. dans l'article intitulé « *Implicit differentiation of Lasso-type models for hyperparameter optimization* » de 2020.
- [0119] Une telle reconstruction par tomographie est propre à être couplée à une acquisition comprimée (CS de l'anglais *Compressed Sensing*), permettant de reconstruire des signaux échantillonnés sous la fréquence de Nyquist.
- [0120] Selon l'application de la présente invention, le sous échantillonnage est spatial (i.e. échantillonné dans l'espace, et non temporel), et pour fonctionner, l'acquisition comprimée CS requiert la conformité à deux principes clés, à savoir d'une part la parcimonie des données (i.e. l'inconnu présente un nombre faible de coefficients non nuls) ou la compressibilité des données (c'est-à-dire que l'inconnu peut être décrit avec peu de coefficients dans une base mathématique bien choisie), et d'autre part l'incohérence du procédé de mesure, par exemple obtenue au travers d'un échantillonnage aléatoire, la présente invention cherchant à maximiser l'incohérence (i.e. minimiser la cohérence) du procédé de mesure en plaçant les capteurs de manière astucieuse.
- [0121] Une fois la reconstruction de la cartographie de vitesse effectuée, cette cartographie de vitesse est convertie en cartographie d'épaisseur, tel qu'illustrée par la vue 70 grâce aux propriétés dispersives des ondes guidées. En particulier, la vue 70, correspond à un résultat de tomographie en espace, l'axe horizontal et l'axe vertical étant propres à être labellisés en mètres, où le placement des capteurs 72 est représenté, de même que la zone 74 de la cartographie d'épaisseur correspondant au défaut 62 de la vue réelle 60.
- [0122] Il est à noter que la présente invention vise avant tout à optimiser, par maximisation itérative, le placement des capteurs 64 et leur couverture de zone (i.e. la couverture de

zone du réseau de capteurs associé) dans l'espace des nombre d'onde (cercle d'Ewald), et s'applique à différentes variantes de reconstruction par tomographie à onde guidées, notamment au moyens de différentes fonctions de régularisation $R(\cdot)$, préférentiellement d'un algorithme de reconstruction par tomographie par diffraction itérative tel que décrit par F. Simonetti et al. dans l'article intitulé « *From beamforming to diffraction tomography* » de 2008, ou par tomographie en temps de vol tel que précédemment cité.

- [0123] La vue 70 correspond notamment à la reconstruction par tomographie classique utilisant un réseau régulier circulaire de trente capteurs pour notamment respecter le critère de Shannon Nyquist ce qui permet théoriquement d'obtenir une reconstruction tomographique classique parfaite mais au prix de nécessiter en général un grand nombre de capteurs.
- [0124] Par ailleurs, de manière non représentée, une nette dégradation de la qualité de reconstruction est observée lorsque le nombre de capteurs est divisé par deux (e.g. quinze capteurs pour trente capteurs nécessaires en théorie, ou encore sept capteurs pour soixante-seize capteurs nécessaires en théorie). Une telle dégradation est particulièrement visible notamment dans les basses fréquences où la couverture associée au réseau de capteurs régulier en nombre réduit est inhomogène, ce qui se manifeste par un effet de rosace en comparaison au résultat associé au réseau de capteurs à grand nombre de capteurs.
- [0125] Lorsque l'on utilise, de manière non représentée, un solveur de type Lasso tel que décrit par Q. Bertrand et al. dans l'article intitulé « *Implicit differentiation of Lasso-type models for hyperparameter optimization* » de 2020, on observe une meilleure reconstruction du défaut par rapport à la tomographie à onde guidées classique pour un même nombre réduit de capteurs (par exemple quinze capteurs) et une même disposition.
- [0126] Lorsqu'en plus, on vient, selon la présente invention, déplacer les capteurs, tel qu'illustré par la suite, en conservant ce nouveau solveur de type Lasso, les inventeurs ont observé que le déplacement des capteurs, optimisé selon la présente invention, permet encore d'améliorer les performances de reconstruction.
- [0127] Autrement dit, selon la présente invention, on va chercher à homogénéiser la couverture en déplaçant les capteurs, et se rapprocher de la couverture de la distribution de capteur théoriquement idéale à grand nombre de capteurs.
- [0128] Plus précisément, en complément optionnel, ladite métrique est définie selon une variante A « sans », ou selon une variante B « avec », zone cible du plan cartésien de l'image obtenue par tomographie à onde guidée de ladite structure, zone cible dans laquelle une reconstruction correcte de défaut(s) est imposée.
- [0129] Selon un aspect particulier de ce complément optionnel, ladite zone cible correspond

à une fenêtre circulaire de Tukey, dont la forme dans la zone de transition est une demi-sinusoïde, la zone de transition correspondant à un espace intermédiaire entre la zone cible et la zone extérieure, dans lequel la fenêtre prend une valeur intermédiaire entre 0 et 1 (selon une sinusoïde).

- [0130] En effet, le problème de maximisation de couverture peut être résolu de deux manières différentes, notamment car la couverture fréquentielle du défaut peut varier si l'on connaît ou pas des informations *a priori* sur le défaut.
- [0131] Ainsi selon la variante B, la métrique est définie avec une zone cible du plan cartésien dans laquelle on s'impose de pouvoir reconstruire correctement le défaut (accès à tous les nombres d'ondes dans cette zone), et en pratique, tel qu'indiqué précédemment, dans le cas B, on utilise une fenêtre circulaire de Tukey, connue pour avoir un support fini et relativement peu d'énergie en hautes fréquences avec un rayon externe valant le rayon du cercle de capteurs et pour rayon interne 90% de ce rayon. La forme de la fenêtre dans la zone de transition (i.e. entre ces deux rayons interne et externe) étant une demi-sinusoïde.
- [0132] La variante A correspond à la configuration dans laquelle on ne définit pas de fenêtre présument de zone cible pour la localisation du défaut.
- [0133] Autrement dit, utiliser l'approche (i.e. la variante) B revient à vouloir reconstruire uniquement les défauts dans la zone cible, la qualité de reconstruction des défauts en dehors de la zone n'étant alors pas garantie, ce qui est acceptable en pratique. En effet, classiquement, on identifie d'abord une zone critique d'une structure et on vient encercler de capteurs cette zone critique.
- [0134] La principale différence des allures de cartographies issues des variantes A et B, réside dans l'importance relative donnée aux hautes fréquences, en périphérie du cercle d'Ewald, par rapport aux basses fréquences, au centre du cercle d'Ewald.
- [0135] La zone imagée dans un plan cartésien (x, y) est propre à être décrite dans l'espace des nombres d'onde par une transformée de Fourier. Dans ce plan, chaque trajet émetteur-récepteur i - j (de coordonnées $\mathbf{x}_i := (x_i, y_i)$ et $\mathbf{x}_j := (x_j, y_j)$) couvre une zone spécifique dans le plan $\mathbf{k} := (k_x, k_y)$ et la mesure des champs diffractés $\varphi_{i,j}^s$ sont reliées à la fonction objet O par la relation : $\varphi_i^s(x_j) = -\frac{1}{2\pi} \int_{k \in R^2} \hat{O}(k) A_{i,j}(k) d^2k$ (3) où :
- [0136] $A_{i,j}(k) = \int_{x \in R^2} G_0(x_j, x) G_0(x, i) e^{ik \cdot x} d^2x$ dans le cas A et
- [0137] $A_{i,j}(k) = \int_{x \in \mathcal{R}^2} G_0(x_j, x) G_0(x, x_i) W(x) e^{ik \cdot x} d^2x$ (4) dans le cas B, '
- [0138] \hat{O} étant la transformée de Fourier de la fonction objet et G_0 étant la fonction de Green associée à l'état sein de la structure et W est une fenêtre bornant la zone d'intérêt .

[0139] Cette méthode repose sur le placement de capteurs permettant d'optimiser la couverture de l'espace des nombre d'ondes représentée par le terme $A_{i,j}(\mathbf{k})$. On définit la couverture fréquentielle C du réseau S comme la somme de toute les contributions fréquentielles obtenues par les couples de capteurs (i, j) :

$$[0140] \quad C(S, \mathbf{k}) = \sum_i \sum_j |A_{i,j}(\mathbf{k})| \quad (5)$$

[0141] Il est à noter que plusieurs métriques pourraient être pertinentes pour juger de la qualité de la couverture, par exemple classiquement une norme L2.

[0142] Selon une variante complémentaire optionnelle, ladite métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point, est une métrique de divergence de Kullback-Leibler.

[0143] En effet, en pratique, comme, les réseaux de capteurs S analysés ont un nombre de capteurs différents, un nombre de mesure très différent, l'ordre de grandeur des couvertures varie en conséquence grandement, c'est pourquoi, selon la présente invention, les couvertures sont normalisées, et du fait que la couverture fréquentielle est représentée par une distribution normée, la présente invention, selon cette variante complémentaire optionnelle, exploite la divergence de Kullback-Leibler (KL) telle que décrite par S. Kullback et R. Leibler dans l'article « *On information and Sufficiency* » de 1951, métrique qui correspond, en statistiques, à la distance asymétrique entre deux distributions statistiques $P : x \mapsto p(x)$ et $Q : x \mapsto q(x)$ définies sur le domaine Ω . Cette distance est définie par la métrique :

$$[0144] \quad D_{KL}(P|Q) = \int_{\Omega} p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx \quad (6).$$

[0145] Autrement dit, selon cette variante optionnelle, lors de l'étape 50, l'évaluation du critère selon l'équation 6 est mise en œuvre sur l'ensemble des points définis au sein de la zone de voisinage, dont un exemple est illustré par la suite par la [Fig.4].

[0146] En pratique, nous considérons un réseau de capteurs de référence (i.e. la distribution de capteurs idéale), typiquement un réseau de capteurs en nombre suffisant selon la théorie de la tomographie par diffraction classique et distribués régulièrement. On calcule la couverture fréquentielle normalisée du réseau de référence analogue à Q . P représente la couverture fréquentielle normalisée, d'un réseau de capteur « à évaluer » dont l'ensemble des positions est notée X . On a alors $P(X) \propto C(R(X), .)$ et $Q \propto C(R_{ref}, .)$

[0147] Le problème à résoudre, selon la présente invention, peut alors être formulé de la façon suivante $\hat{X} = \underset{X}{\operatorname{argmin}} D_{KL}(P(X)|Q)$.(7)

- [0148] C'est-à-dire qu'il s'agit de minimiser la distance, dans l'espace des nombres d'onde, entre la distribution P de capteurs en cours d'optimisation, et une distribution Q de capteurs « idéale » (i.e. avec beaucoup de capteurs).
- [0149] Autrement dit, l'étape de sélection 52 précitée vise à sélectionner le nouveau placement du capteur considéré lors de l'itération courante comme celui qui minimise le critère selon l'équation 7 ci-dessus.
- [0150] Le procédé 30 selon la présente invention est donc itératif et vient déplacer les capteurs un par un en optimisant la valeur de la métrique D_{KL} .
- [0151] En complément facultatif de cette variante optionnelle, le critère d'arrêt C_A prédéterminé correspond à une variation entre deux itérations successives de ladite métrique inférieure à un seuil prédéterminé, et/ou à une absence de changement de position de chacun des capteurs après parcours d'un tour complet dudit ensemble de capteurs disposés sur ledit cercle d'Ewald, et/ou à l'atteinte d'un nombre maximal d'itérations prédéterminé.
- [0152] Autrement dit selon ce complément optionnel, en pratique le critère d'arrêt C_A dépend d'une invariance relative de la métrique D_{KL} , par exemple $\frac{\Delta D_{KL}}{D_{KL}} < 0.1\%$, du non déplacement des capteurs sur un tour complet ainsi que d'un nombre maximal de boucles à des fins de sécurité de mise en œuvre dudit procédé.
- [0153] La [Fig.4], est un schéma illustrant deux exemples de zones de voisinage d'un capteur selon les deux variantes précitées A (sans cible) et B (avec cible) de la présente invention et le déplacement obtenu.
- [0154] Plus précisément, en complément facultatif, ladite détermination 48 d'une zone de voisinage définit une grille d'un nombre prédéterminé de positions potentielles 76 dudit capteur sélectionnées en fonction d'une longueur d'onde d'intérêt associée à ladite tomographie à onde guidées, ladite grille étant centrée sur la position courante 78 dudit capteur.
- [0155] De plus, selon un aspect optionnel de ce complément facultatif, l'échantillonnage de ladite grille est une fraction de ladite longueur d'onde.
- [0156] Autrement dit, on entend par « zone de voisinage », une grille de positions de capteurs potentielles dimensionnée (largeur, résolution) en fonction de la longueur d'onde d'intérêt de la tomographie λ . Ainsi, l'échantillonnage de la grille sera une fraction de la longueur d'onde λ , par exemple, tel que représenté sur la [Fig.4], $\lambda/10$ et la grille présente par exemple, tel qu'illustré par la [Fig.4], une dimension de l'ordre de 10×10 points (i.e. positions potentielles).
- [0157] Lorsque la métrique, telle que la métrique D_{KL} est invariante par rotation de tout le réseau de capteurs, selon une variante optionnelle de la présente invention, un degré de liberté d'un capteur dudit ensemble de capteurs est inhibé.

- [0158] Autrement dit, selon cette variante, un degré de liberté est supprimé, en supprimant, par exemple pour un réseau de capteurs sensiblement circulaire lors de l'initialisation, le déplacement tangentiel d'un des capteurs pour garantir la stabilité du procédé selon la présente invention, par exemple le premier capteur sélectionné. Un autre degré de liberté (i.e. différent du déplacement tangentiel) est propre à être inhibé notamment en cas de réseau de capteurs non circulaire mais de forme carrée ou formant une grille, etc.
- [0159] Ainsi, telle qu'illustré par la figure 4, dans les cas A à gauche et le cas B à droite, autour de la position courante 78 du capteur, la métrique D_{KL} est analysée sur l'ensemble des points 76 de la grille pour ensuite sélectionner la position 80 pour le cas A et 82 pour le cas B qui optimise la métrique.
- [0160] En effet, pour une grille définie en fonction de la longueur d'onde, avec selon l'exemple de la [Fig.4], où le côté de la grille fait λ et l'échantillonnage $\lambda/10$, les métriques avec (cas B) et sans (cas A) fenêtre cible étant différentes, et avec des minima différents, la nouvelle position 82 sélectionnée pour le capteur courant considéré est différente.
- [0161] La [Fig.5] illustre l'obtention d'un placement de sept capteurs optimisé selon la présente invention et de l'évolution de la métrique associée au cours de ladite optimisation.
- [0162] La vue 84, correspond au cas A (i.e. sans cible) avec la position initiale 85 des sept capteurs.
- [0163] La vue 86, correspond au cas A (i.e. sans cible) avec la position optimisée 88 des sept capteurs.
- [0164] La vue 90 représente l'évolution de la métrique associée au cas A au cours de ladite optimisation entre les vues 84 et 86.
- [0165] La vue 92, correspond au cas B (i.e. avec cible) avec la position initiale 94 des sept capteurs.
- [0166] La vue 96, correspond au cas B (i.e. avec cible) avec la position optimisée 98 des sept capteurs.
- [0167] La vue 100 représente l'évolution de la métrique associée au cas B au cours de ladite optimisation entre les vues 92 et 96.
- [0168] Que ce soit pour le cas A ou le cas B, le procédé selon la présente invention permet d'obtenir une couverture fréquentielle plus homogène entre l'état initial 84 et 92 et final 86 et 96 respectivement.
- [0169] La [Fig.6] illustre le déplacement dans l'espace 102, d'une configuration obtenue après optimisation à partir d'une configuration initiale à dix capteurs.
- [0170] Sur la [Fig.6], la position initiale 104 des capteurs est représentée de même que la nouvelle position 106 associée, les traits 108 représentant la translation de chaque

capteur.

- [0171] La [Fig.7] compare sur un exemple donné les résultats obtenus selon la présente invention à ceux obtenus selon l'état de la technique en quantifiant les erreurs de reconstruction en fonction de la méthode sélectionnée.
- [0172] Sur la vue 110, l'erreur de reconstruction pour les capteurs positionnés de trois manières différentes est illustrée selon les courbes 112 illustrant un positionnement régulier (i.e. la distance inter-capteur sur le cercle d'Ewald étant constante), 114 selon la variante B sans cible et 116 selon la variante A avec cible.
- [0173] L'erreur du positionnement de manière régulière illustré selon la courbe 112 est d'environ 1.20% pour dix capteurs et d'environ 0.83% pour douze capteurs.
- [0174] Dans le cas A, les résultats obtenus sans aucune connaissance a priori d'une zone cible de position du défaut sont moins performants que la disposition régulière, en effet cette solution est moins performante pour reconstruire un défaut entre les défauts dans la zone encerclée par les capteurs, la métrique étant optimisée pour la reconstruction de défauts un peu partout, ce qui est particulièrement avantageux en absence de connaissance a priori de la localisation d'un défaut.
- [0175] Les résultats obtenus avec le ciblage de la zone de reconstruction (cas B), représentés au moyen de la référence 116 sont en revanche meilleurs (i.e. erreur plus faible) dans le cas dix capteurs et sensiblement similaires dans le cas douze capteurs, la différence de performances étant principalement due à l'importance de la couverture des basses fréquences dans le cas B qui permet de réduire avantageusement le nombre de capteurs nécessaires.
- [0176] L'homme du métier comprendra que l'invention ne se limite pas aux modes de réalisation décrits, ni aux exemples particuliers de la description, les modes de réalisation et les variantes mentionnées ci-dessus étant propres à être combinés entre eux pour générer de nouveaux modes de réalisation de l'invention.
- [0177] Ainsi, la présente invention propose un procédé et un dispositif d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées, qui permet de déterminer astucieusement le placement des capteurs pour maximiser l'information reçue issue de chacun tout en limitant leur nombre, ce qui est avantageux pour des applications dans le domaine du contrôle de santé de structure ou SHM (de l'anglais *Structural Health Monitoring*) visant à détecter et à caractériser des dommages (i.e. anomalies) de structures/infrastructures telles que des tuyauteries métalliques ou composite pour le nucléaire, du secteur « Oil & Gas », l'aéronautique, l'éolien, etc.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé (30) d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées, les capteurs dudit ensemble étant disposés sur ladite structure, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend une maximisation itérative de la couverture de zone du réseau de capteurs associé audit ensemble dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald, ladite maximisation itérative comprenant :
- l'initialisation (32) dudit ensemble de capteurs; et
- jusqu'à convergence selon un critère d'arrêt prédéterminé, au moins une itération des étapes successives suivantes :
- sélection (46), par itération, d'un des capteurs dudit ensemble de capteurs ;
 - détermination (48) d'une zone de voisinage correspondant à un ensemble de points autour de la position courante dudit capteur sélectionné ;
 - pour chaque point de ladite zone de voisinage, évaluation (50) d'une métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point ;
 - sélection (52) du point de ladite zone de voisinage minimisant ladite métrique, comme nouvelle position dudit capteur sélectionné.
- [Revendication 2] Procédé (30) selon la revendication 1, dans lequel ladite initialisation comprend :
- la fixation (34) du nombre de capteurs dudit ensemble de capteurs dont le placement est à optimiser ;
 - l'établissement (36) d'un placement initial de chacun des capteurs dudit ensemble de capteurs ;
 - la définition (38) de ladite distribution de capteurs idéale et l'obtention de la couverture fréquentielle normalisée de ladite distribution de capteurs idéale.
- [Revendication 3] Procédé (30) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel ladite détermination (48) d'une zone de voisinage définit une grille d'un nombre prédéterminé de positions potentielles dudit capteur sélectionnées en fonction d'une longueur d'onde d'intérêt associée à ladite tomographie à

- onde guidées, ladite grille étant centrée sur la position courante dudit capteur sélectionné.
- [Revendication 4] Procédé (30) selon la revendication 3, dans lequel l'échantillonnage de ladite grille est une fraction de ladite longueur d'onde.
- [Revendication 5] Procédé (30) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel un degré de liberté d'un capteur dudit ensemble de capteurs est inhibé.
- [Revendication 6] Procédé (30) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point, est une métrique de divergence de Kullback-Leibler.
- [Revendication 7] Procédé (30) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle ladite métrique est définie avec, ou sans, zone cible du plan cartésien de l'image obtenue par tomographie à onde guidée de ladite structure, zone cible dans laquelle une reconstruction correcte de défaut(s) est imposée.
- [Revendication 8] Procédé (30) selon la revendication 7, dans laquelle ladite zone cible correspond à une fenêtre circulaire de Tukey, dont la forme dans la zone de transition est une demi-sinusoïde.
- [Revendication 9] Procédé (30) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit critère d'arrêt prédéterminé correspond à :
- une variation entre deux itérations successives de ladite métrique inférieure à un seuil prédéterminé, et/ou à
 - une absence de changement de position de chacun des capteurs après parcours d'un tour complet dudit ensemble de capteurs disposés sur ledit cercle d'Ewald, et/ou à
 - l'atteinte d'un nombre maximal d'itérations prédéterminé.
- [Revendication 10] Programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, mettent en œuvre un procédé d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées selon l'une quelconque des revendications précédentes.
- [Revendication 11] Dispositif (10) électronique d'optimisation du placement d'un ensemble de capteurs de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées, les capteurs dudit ensemble étant disposés

sur ladite structure, ledit dispositif étant caractérisé en ce qu'il comprend une unité de maximisation itérative configurée pour maximiser la couverture de zone du réseau de capteurs associé audit ensemble dans l'espace des nombres d'onde correspondant au cercle d'Ewald, ladite unité de maximisation itérative comprenant :

- un module d'initialisation (12) configuré pour initialiser ledit ensemble de capteurs ; et

mis en œuvre itérativement ; jusqu'à convergence selon un critère d'arrêt prédéterminé, les éléments suivants :

- un premier module (14) de sélection configuré pour sélectionner, par itération, un des capteurs dudit ensemble de capteurs ;

- un module de détermination (16) configuré pour déterminer, par itération, une zone de voisinage correspondant à un ensemble de points autour de la position courante dudit capteur sélectionné ;

- un module d'évaluation (18) configuré, pour chaque point de ladite zone de voisinage, pour évaluer, par itération, une métrique prédéterminée représentative de la distance, dans l'espace des nombres d'ondes, entre la couverture fréquentielle normalisée d'une distribution de capteurs idéale, et la couverture fréquentielle normalisée de la distribution dudit ensemble de capteurs dont le capteur sélectionné est audit point ;

- un deuxième module de sélection (20) configuré pour sélectionner le point de ladite zone de voisinage minimisant ladite métrique comme nouvelle position dudit capteur sélectionné.

[Revendication 12]

Système de détection d'anomalie(s) dans une structure par tomographie à ondes guidées au moyen d'un ensemble de capteurs, les capteurs dudit ensemble étant disposés sur ladite structure, ledit système étant caractérisé en ce qu'il comprend :

- ledit ensemble de capteurs ;

- un dispositif électronique d'optimisation du placement dudit ensemble de capteurs selon la revendication 11 ;

- un module de détection d'anomalies par tomographie à ondes guidées configuré pour utiliser les mesures dudit ensemble de capteurs afin de fournir une tomographie de ladite structure.

[Revendication 13]

Système selon la revendication 12, dans lequel les capteurs dudit ensemble sont selon l'un des types appartenant au groupe comprenant au moins :

- les capteurs piézoélectriques ;

- les capteurs EMAT ;
- les capteurs FBG ;
- les capteurs PVDF.

[Revendication 14] Système selon la revendication 12 ou 13, dans lequel le système est propre à fonctionner en :

- mode actif selon lequel les capteurs génèrent et mesurent les ondes guidées, ou en
- mode passif selon lequel les capteurs sont configurés pour mesurer les ondes guidées présentes dans la structures naturellement durant son exploitation, les signaux mesurés par lesdits capteurs en mode passif étant propres à être utilisés pour déterminer une fonction représentative de la réponse impulsionnelle de ladite structure.

[Revendication 15] Système selon l'une quelconque des revendications 12 à 14 dans lequel le module de détection d'anomalies par tomographie à ondes guidées configuré pour utiliser les mesures dudit ensemble de capteurs afin de fournir une tomographie de ladite structure comprend un solveur permettant la résolution d'un problème de minimisation sous la forme :

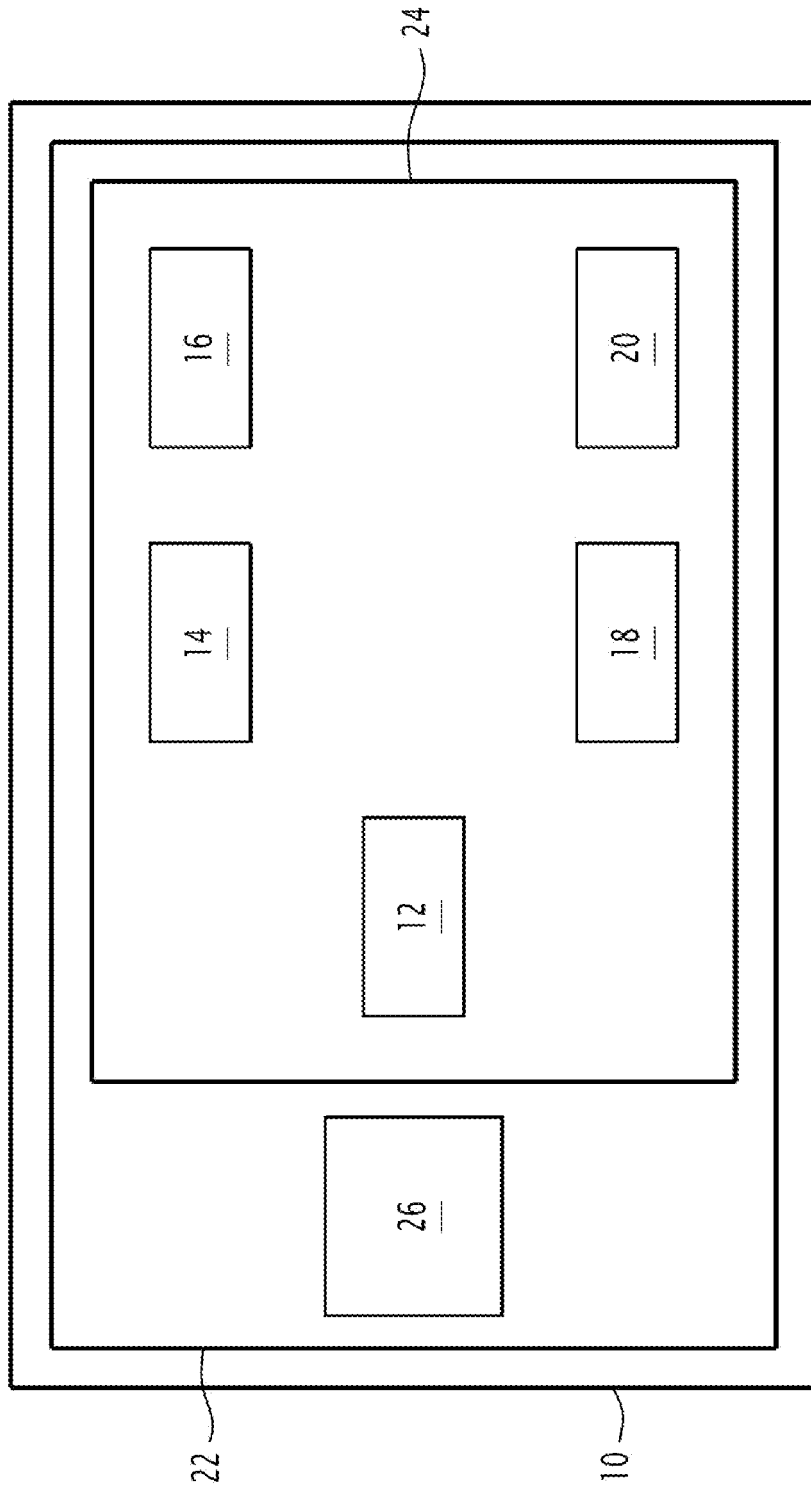
$$\hat{O} = \underset{O}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \|\varphi - \Phi(O)\|_2^2 + R(O) \text{ où } O \text{ représente la fonction objet}$$

caractérisant un défaut de ladite structure, R est un terme de pénalité permettant la régularisation de la solution, φ représente les champs mesurés via lesdits capteurs dudit ensemble, Φ représente un modèle suivant une équation de Lippmann Schwinger :

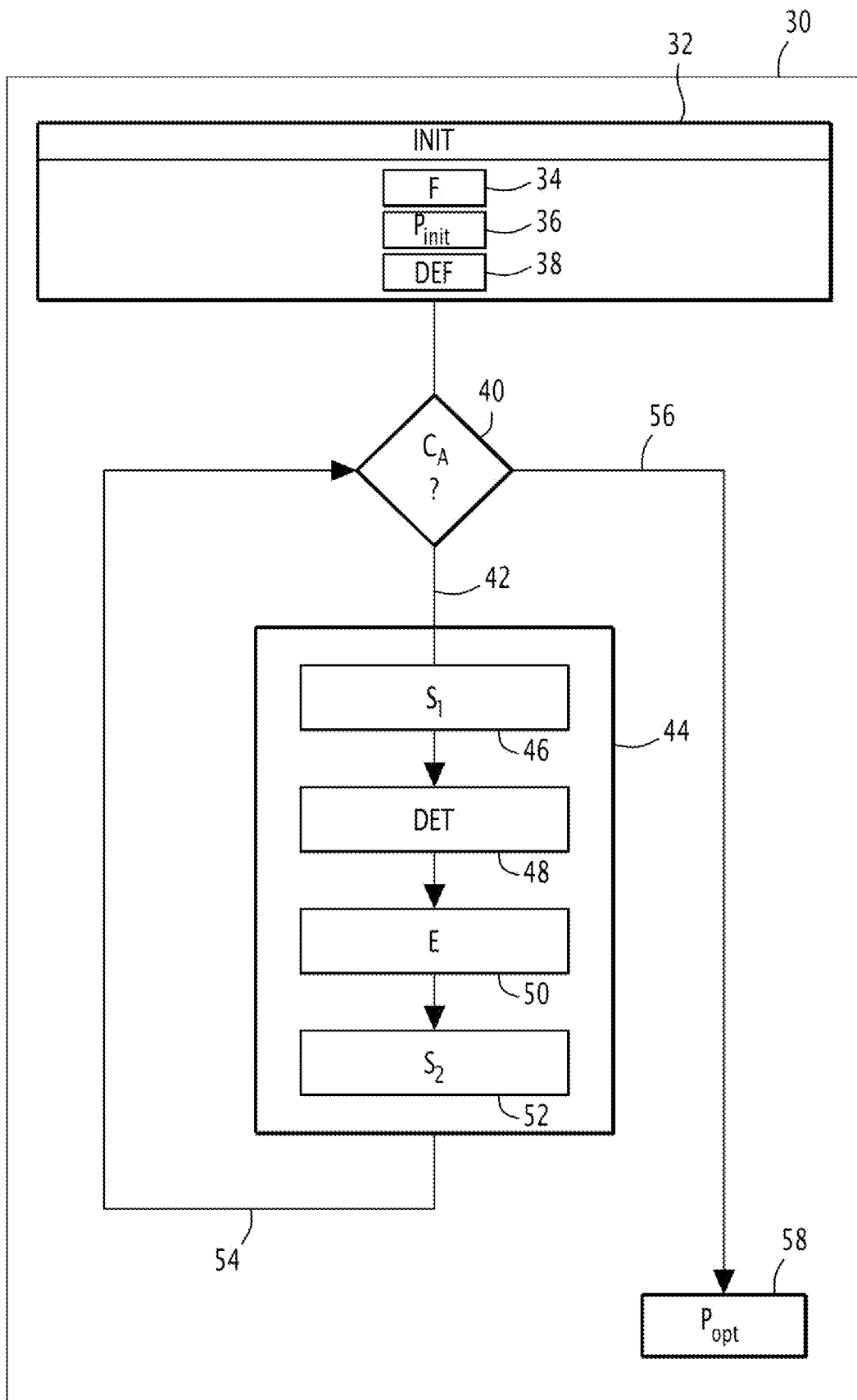
$$\Phi(x_j, x_i) - \Phi^0(x_j, x_i) = \iint_{\Omega} G_0(x_j, x) O(x) \Phi(x, x_i) d^2x$$

G_0 étant la fonction de Green, solution de l'équation de Helmholtz associée à l'état sain de ladite structure.

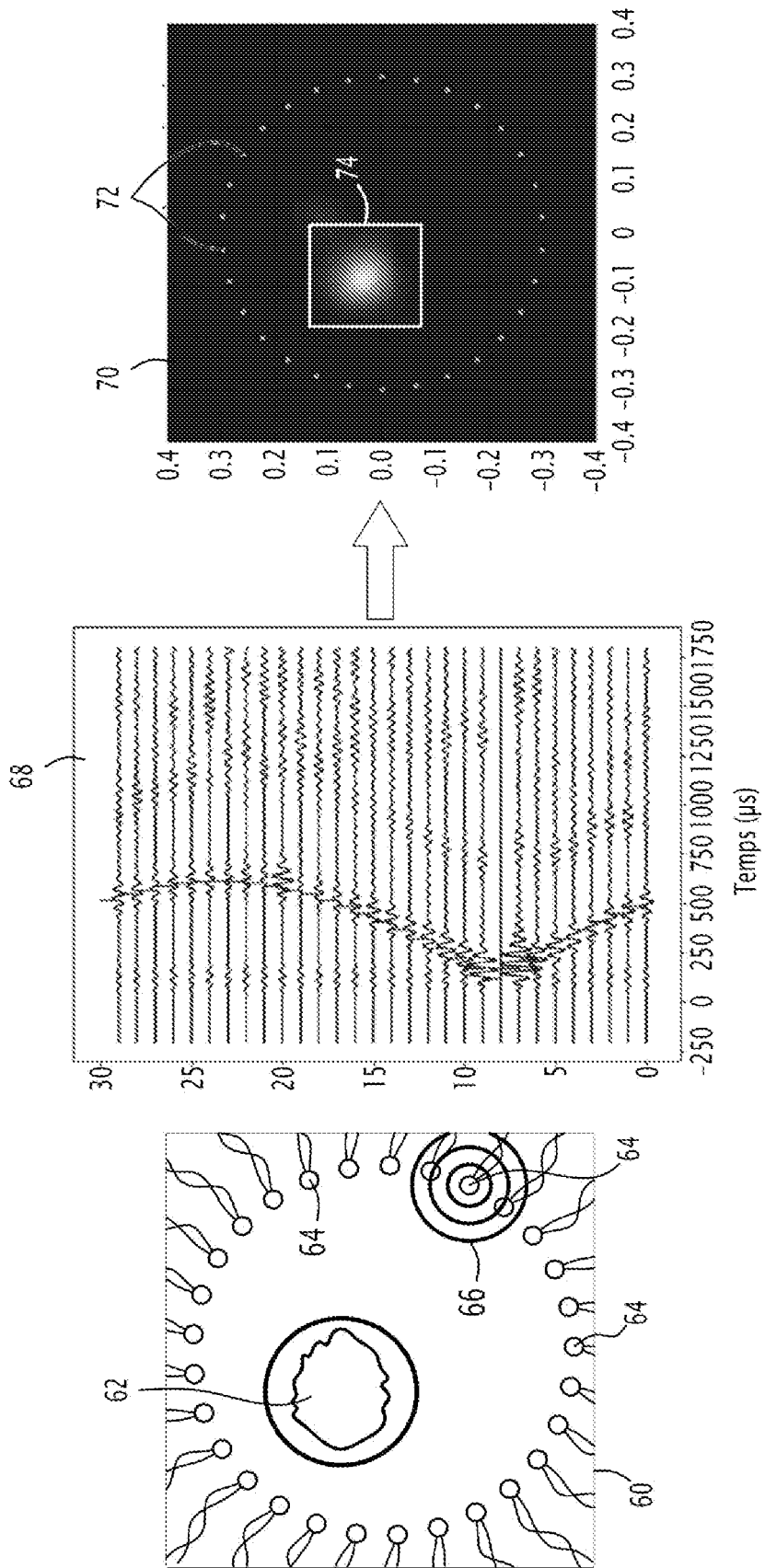
[Fig. 1]



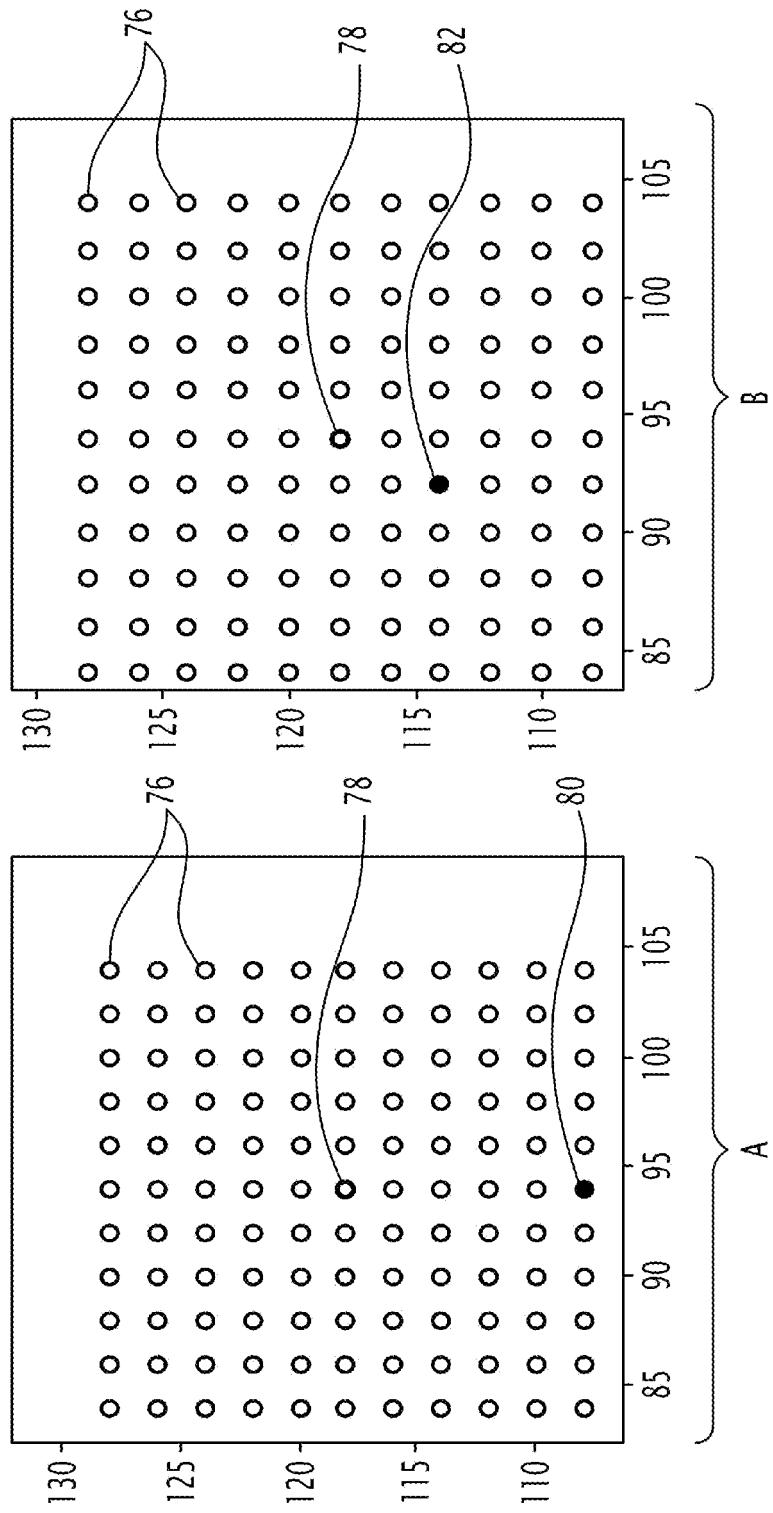
[Fig. 2]



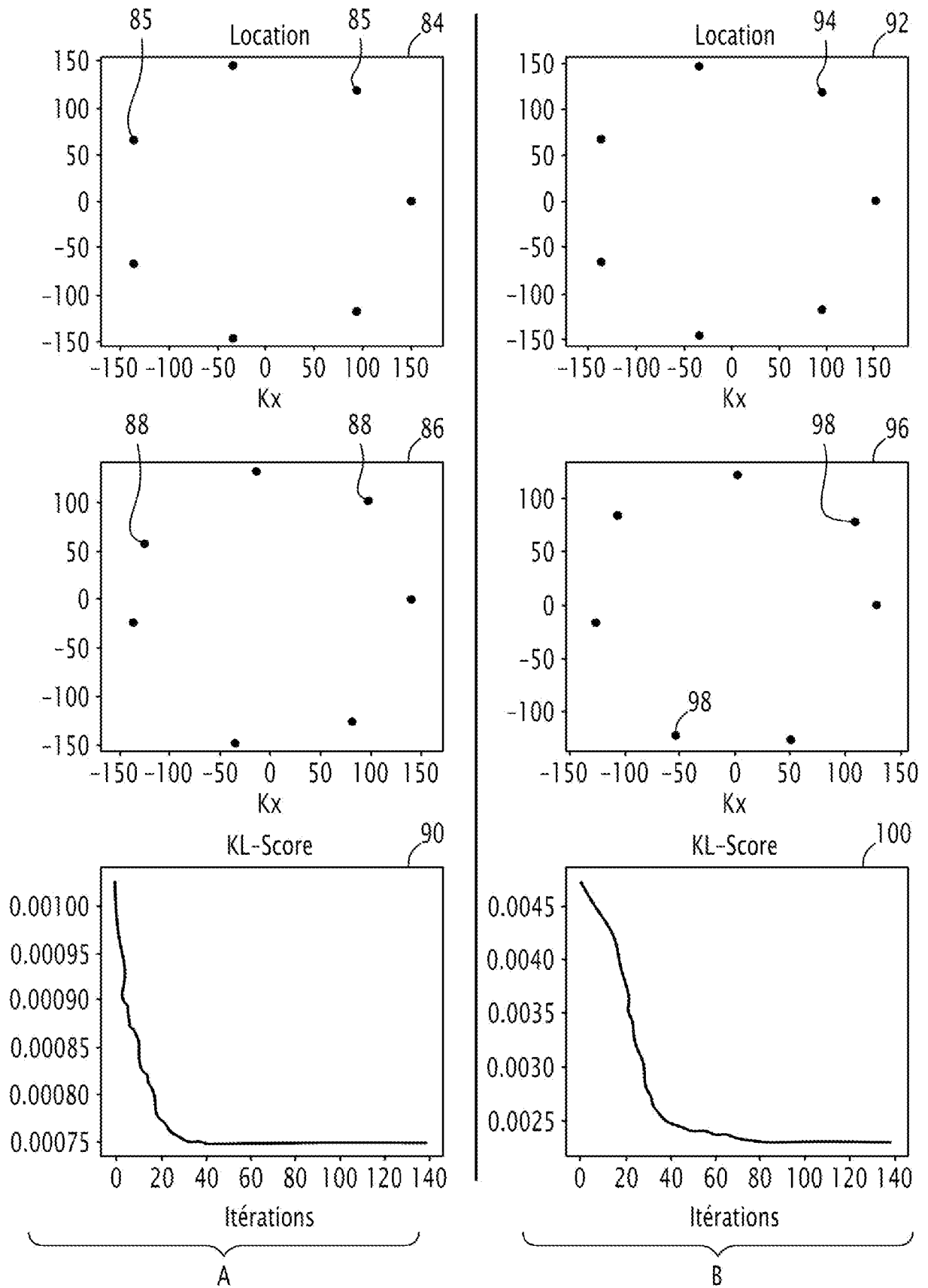
[Fig. 3]



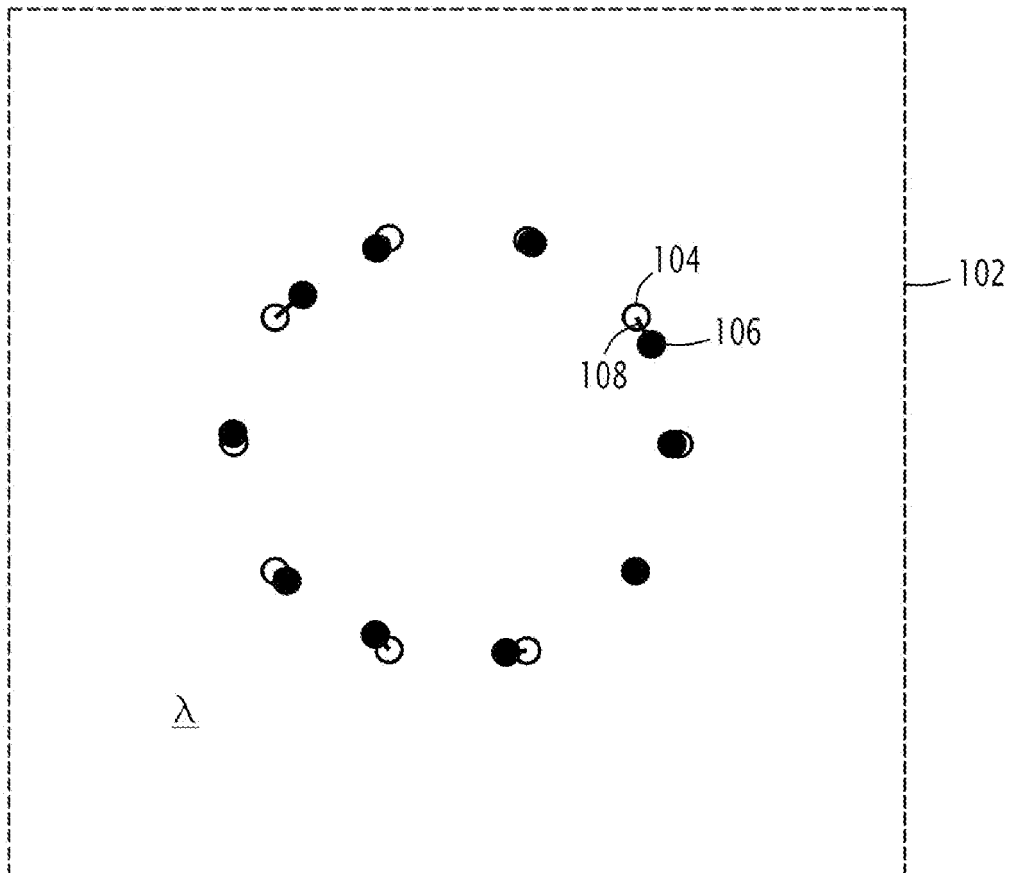
[Fig. 4]



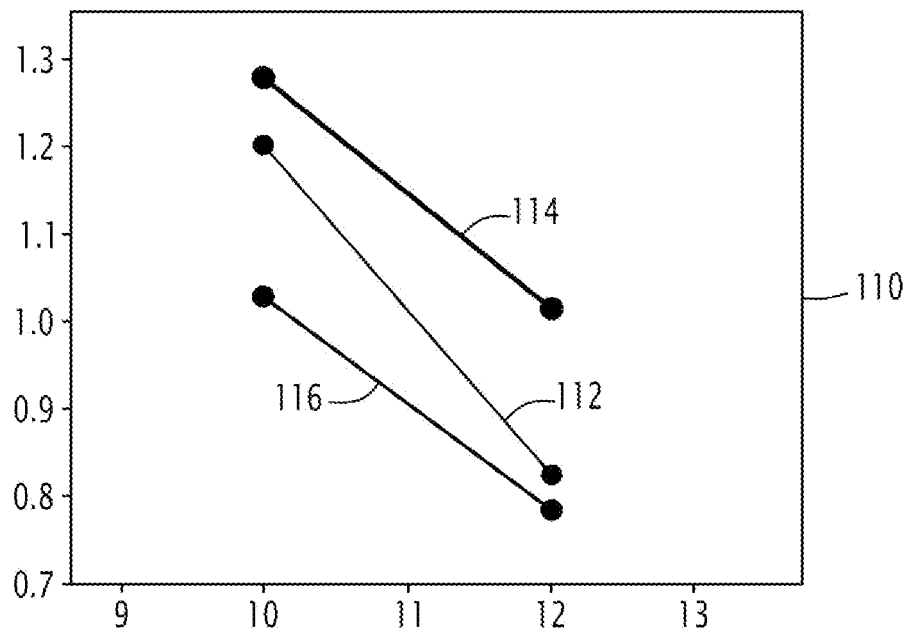
[Fig. 5]



[Fig. 6]



[Fig. 7]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 911819
FR 2210144

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	<p>THIENE M ET AL: "Optimal sensor placement for maximum area coverage (MAC) for damage localization in composite structures", SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB, vol. 25, no. 9, 10 août 2016 (2016-08-10), pages 1-21, XP020308043, ISSN: 0964-1726, DOI: 10.1088/0964-1726/25/9/095037 [extrait le 2016-08-10]</p> <p>* abrégé *</p> <p>* page 4, alinéa 3.Fitness... *</p> <p>* page 10, colonne de droite, alinéa dernier *</p> <p>* page 16, alinéa 6.Optimization... - page 17 *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15	<p>G01N29/22 G01N29/04</p>
	A	<p>QING XINLIN ET AL: "Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications", SENSORS, vol. 19, no. 3, 28 janvier 2019 (2019-01-28), pages 1-27, XP093020280, DOI: 10.3390/s19030545</p> <p>* abrégé; tableau 3 *</p> <p>* page 3 *</p> <p>* page 8, alinéa dernier - page 9, ligne 7 *</p> <p>* page 10, lignes 4-8 *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	
			<p>DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)</p> <p>G01N</p>
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
10 mars 2023		Filipas, Alin	
<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 & : membre de la même famille, document correspondant</p>			