

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication : **3 127 579**

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

②1 N° d'enregistrement national : **21 10340**

⑤1 Int Cl⁸ : **G 01 N 29/12 (2022.01), G 01 N 29/34, G 01 N 29/46**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 PROCÉDE DE DETECTION D'UN DÉFAUT PAR ULTRASONS.

②2 Date de dépôt : 30.09.21.

③0 Priorité :

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

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 14.03.25 Bulletin 25/11.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *SAINTE-GOBAIN CENTRE DE
RECHERCHES ET D'ETUDES EUROPEEN Société
par actions simplifiée (SAS) — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : PINSON Sébastien, PAYAN Cédric et
BOINET Mickaël.

⑦3 Titulaire(s) : *SAINTE-GOBAIN CENTRE DE
RECHERCHES ET D'ETUDES EUROPEEN Société
par actions simplifiée (SAS).*

⑦4 Mandataire(s) : CABINET NONY.

FR 3 127 579 - B1



Description

Titre de l'invention : PROCÉDE DE DETECTION D'UN DEFAUT PAR ULTRASONS

Domaine technique

[0001] L'invention concerne un procédé de détection d'un défaut dans une pièce, en particulier une pièce céramique ou vitrocéramique.

Etat de la technique

[0002] La détection de défauts internes dans une pièce par analyse d'ondes acoustique est connue.

[0003] La méthode la plus ancienne consiste à mesurer et analyser la vitesse de transmission d'une onde acoustique dans la pièce. Son champ d'application est cependant limité à des pièces de forme simple et constituées en un matériau homogène et uniforme. On sait également analyser l'atténuation de l'onde acoustique injectée, par analyse linéaire, c'est-à-dire en considérant que, dans un environnement déterminé, les fréquences de résonance dépendent exclusivement de la pièce, à savoir de sa forme et de son matériau constitutif (qui détermine la célérité des ondes). Ce type d'analyse a montré cependant également ses limites pour discriminer des pièces de structure complexe ou en un matériau hétérogène.

[0004] La spectroscopie de résonance ultrasonore non linéaire (ou « *Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy* » en anglais ou « NRUS ») ou, plus généralement la spectroscopie de résonance acoustique non linéaire (ou « *Nonlinear resonant acoustic spectroscopy* » en anglais ou « NRAS ») sont des méthodes plus récentes exploitant le fait que le module d'élasticité du matériau constituant la pièce n'est pas constant, mais varie en fonction des contraintes mécaniques générées dans la pièce par l'onde d'excitation. Les fréquences de résonance dépendent ainsi de l'amplitude de l'onde d'excitation. Cette méthode repose en particulier sur une analyse de l'évolution du spectre de fréquences de résonance en fonction de l'amplitude de l'onde injectée.

[0005] Typiquement, si, dans un mode de sollicitation déterminé,

- f_0 est la première fréquence de résonance linéaire de la pièce, c'est-à-dire en considérant que le module d'élasticité de la pièce est constant, la fréquence de résonance linéaire étant classiquement évaluée par simulation numérique ou mesurée par analyse de la réponse à l'injection d'une onde de faible amplitude dans ledit mode de sollicitation, et

- f est la fréquence de résonance mesurée pour des ondes de plus grande amplitude de l'onde d'excitation,

la méthode évalue le décalage fréquentiel $|f-f_0|/f_0$ en fonction de ladite amplitude. Elle

exploite ensuite une différence d'évolution du décalage fréquentiel selon la présence ou l'absence d'un endommagement, comme décrit dans US6330827B1.

[0006] La demande FR2960061A1 décrit une utilisation de la technique NRUS pour explorer le domaine de l'élasticité non linéaire de matériaux tels que les roches.

[0007] Cependant, les inventeurs ont découvert que l'application de la technique NRUS décrite dans l'art antérieur n'est pas toujours fiable, notamment si la pièce est de forme complexe. En outre, en présence simultanée de plusieurs défauts, par exemple des défauts de type physique (comme une fissure) et chimique (comme un changement local de composition élémentaire ou de phase cristallographique), les décalages fréquents induits par ces défauts peuvent se compenser.

[0008] Il existe donc un besoin pour un procédé de détection d'un défaut dans une pièce présentant une fiabilité améliorée, même quand cette pièce présente une géométrie et/ou une structure interne complexe(s) ou qu'elle présente plusieurs défauts.

[0009] Un but de l'invention est de répondre, au moins partiellement, à ce besoin.

Résumé de l'invention

[0010] Plus précisément, la présente invention a pour objet un procédé de détection d'un défaut dans une région d'intérêt au sein d'une pièce à tester, ledit procédé comprenant les étapes successives suivantes :

a) pour une pièce de référence identique à la pièce à tester mais dépourvue de défaut, a1) de préférence par simulation numérique, détermination d'un ensemble de modes de résonance définissant chacun :

- une fréquence de résonance de la pièce de référence en considérant que le module d'élasticité de la pièce de référence est constant, et

- un champ de contraintes ou de déformations mécaniques sur et/ou dans la pièce de référence générées lorsque la pièce de référence est en résonance à ladite fréquence de résonance ;

a2) sélection du mode de résonance, qualifié de « mode de résonance optimal », générant, dans la région d'intérêt, une contrainte ou une déformation mécanique maximale par rapport aux autres modes de résonance ;

b) détermination d'un mode de sollicitation, dit « optimal », activant principalement ledit mode de résonance optimal, un mode de sollicitation définissant au moins une onde d'excitation, une zone d'injection de l'onde d'excitation dans la pièce de référence, et une zone de sortie où une onde de sortie résultant de la traversée de l'onde d'excitation depuis la zone d'injection jusqu'à la zone de sortie est captée ;

c) analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire à partir du mode de sollicitation optimal, de manière à déterminer un paramètre de non-linéarité pour chacune des dites pièces à tester et de référence ;

d) classement de la pièce à tester en fonction de la différence entre les paramètres de non-linéarité pour la pièce à tester et pour la pièce de référence.

[0011] Comme on le verra plus en détail dans la suite de la description, les inventeurs ont découvert que la sélection d'une fréquence de résonance optimale en fonction de la région d'intérêt améliore considérablement la fiabilité de la détection d'un défaut par spectroscopie de résonance non linéaire quand cette dernière est réalisée à partir d'un mode de sollicitation activant principalement le mode de résonance correspondant. En particulier, la détection est fiable pour une pièce de forme ou de structure interne complexe.

[0012] De manière remarquable, la focalisation sur la région d'intérêt conduit à déterminer une fréquence de résonance optimale qui n'est pas nécessairement la fréquence de résonance qui conduit au plus de contraintes ou de déformations mécaniques de la pièce de référence considérée dans son ensemble.

[0013] L'analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire à partir du mode de sollicitation optimal peut être classiquement réalisée en appliquant à la pièce considérée (à tester ou de référence) le mode de sollicitation optimal et des modes de sollicitation dérivés qui ne diffèrent du mode de sollicitation optimal que par l'amplitude de l'onde d'excitation injectée. On examine ensuite l'évolution de la fréquence de résonance, à partir de la fréquence de résonance optimale, sous l'effet de l'évolution de ladite amplitude, pour déterminer le paramètre de non-linéarité.

[0014] Pour la pièce de référence, l'application d'un mode de sollicitation peut être réalisée sur la pièce elle-même ou sur un modèle numérique de la pièce.

[0015] De préférence, un procédé selon l'invention présente une ou plusieurs des caractéristiques optionnelles suivantes :

- [0016]
- à l'étape a1), les modes de résonance sont déterminés par simulation numérique, la modélisation de la pièce de référence prenant en compte les dimensions et la géométrie de la pièce de référence, la masse volumique apparente du matériau constituant la pièce de référence, le module d'élasticité dudit matériau, et le coefficient de Poisson dudit matériau ;
 - à l'étape a2), on compare des modèles numériques tridimensionnels de la pièce de référence représentant chacun un champ desdites contraintes ou desdites déformations mécaniques généré lorsque la pièce de référence est en résonance à une fréquence de résonance respective ;
 - le volume de la région d'intérêt est inférieur à 0,2 fois et supérieur à 0,01 fois le volume de la pièce de référence ;
 - les étapes a) et b) sont réalisées simultanément, la recherche du mode de sollicitation optimal étant réalisée de la manière suivante :
 - simulation numérique d'une pluralité de modes de sollicitation, la simulation

numérique déterminant pour chaque mode de sollicitation, un champ de contraintes mécaniques dans la pièce de référence et une onde de sortie théorique (c'est-à-dire une simulation de l'onde de sortie dans ce mode de sollicitation) ;

- analyse des champs de contraintes mécaniques et des ondes de sortie théoriques de manière à sélectionner, comme mode de sollicitation optimal, le mode de sollicitation générant, dans la région d'intérêt, une contrainte mécanique ou une déformation maximale et mettant en résonance la pièce de référence ;

- à l'étape c), le paramètre de non-linéarité est la pente d'une droite représentative de l'évolution d'un décalage de fréquence en fonction de l'évolution de l'amplitude de l'onde de sortie lorsque ladite amplitude de l'onde de sortie est modifiée, de préférence augmentée, depuis le mode de sollicitation optimal, le décalage de fréquence, pour une amplitude de l'onde de sortie, étant le rapport de la valeur absolue de la différence entre la fréquence de résonance optimale (f_0) dans le mode de résonance optimal et la fréquence de résonance (f) déterminée pour ladite amplitude de l'onde de sortie, divisé par la fréquence de résonance optimale (f_0) ;
- à l'étape d), on compare le paramètre de non-linéarité de la pièce à tester à un seuil déterminé à partir du paramètre de non-linéarité de la pièce de référence, puis on classe la pièce à tester en fonction de la différence entre le paramètre de non-linéarité de la pièce à tester et le seuil, de préférence en fonction du signe de ladite différence ;
- le défaut est un espace vide au sein de la pièce à tester, ou un espace rempli par un matériau différent du reste de la pièce à tester ;
- la pièce est en un matériau inorganique ;
- la pièce est en un métal, de préférence fritté, un matériau céramique, un matériau vitrocéramique ou en un mélange de ces matériaux, en particulier un composite ;
- dans le mode de sollicitation optimal, le pic principal d'un spectre de fréquence de l'onde de sortie est à une fréquence comprise entre 1 Hz et 200 KHz, de préférence inférieure à 100 KHz, de préférence supérieure à 20 KHz ;
- l'onde de sortie est à une onde acoustique ;
- ladite pièce à tester est choisie parmi :
 - un bloc ou linteau de gorge,
 - un bloc de cuve,
 - une brique ou un bloc de mur ou de côté,

- un bloc de coin ou d'angle,
- une brique à nez,
- un bloc ou une dalle de sole,
- une brique ou un sommier de voute,
- une brique ou un bloc d'entourage de tuyère,
- une brique de trou ou chenal de coulée,
- un bloc porte électrode,
- une pièce de bec réfractaire de four verrier,
- un bloc d'injecteur,
- une gorge de four de verrerie,
- une pièce d'un échangeur thermique du four,
- une plaque ou une tuile réfractaire d'un revêtement de chaudière,
- une coquille de protection de tube de réchauffeur d'un incinérateur,
- une tuile d'un incinérateur,
- une pièce céramique d'un absorbeur solaire,
- une tuile ou une pièce de protection d'une chambre de turbine de combustion.

[0017] La déformation d'une pièce est le résultat de l'application d'une contrainte mécanique correspondante. Dans le cadre de la présente invention, les contraintes mécaniques et les déformations mécaniques sont donc équivalentes. Dans un souci de clarté, la suite de la description n'évoque que les contraintes mécaniques. Cette description est cependant applicable pour des déformations mécaniques.

[0018] L'invention concerne également un procédé de tri de pièces extérieurement identiques fabriquées sur une ligne de production, dans lequel on met en œuvre un procédé de détection selon l'invention pour chaque pièce, considérée comme une pièce à tester, les étapes a) et b) et l'analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire à partir du mode de sollicitation optimal réalisée sur la pièce de référence étant de préférence communes à l'ensemble des pièces. L'ensemble de pièces peut comporter par exemple plus de 10, plus de 100 ou plus de 1000 pièces à tester.

[0019] L'invention concerne enfin un dispositif de détection destiné à la détection d'un défaut dans une pièce à tester, le dispositif comportant :

- un résonateur apte à injecter, dans la pièce à tester, une onde d'excitation à travers une zone d'injection de la pièce à tester ;
- un récepteur apte à capter une onde de sortie à travers un zone de sortie de la pièce à tester, l'onde de sortie résultant de la traversée de la pièce à tester par l'onde d'excitation ;
- un ordinateur connecté au récepteur de manière à recevoir l'onde de sortie, l'ordinateur ayant une mémoire dans laquelle est enregistré un paramètre de non-

linéarité résultant d'une analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire réalisée, conformément à l'étape c), à partir d'un mode de sollicitation optimal déterminé conformément aux étapes a) et b), pour une pièce de référence identique à la pièce à tester mais dépourvue de défaut, l'ordinateur étant programmé pour

- réaliser une dite analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire pour la pièce à tester, à partir du mode de sollicitation optimal conformément à l'étape c), de manière à déterminer le paramètre de non-linéarité pour ladite pièce à tester, puis
- déterminer une différence entre les paramètres de non-linéarité pour la pièce à tester et pour la pièce de référence, puis
- classer la pièce à tester en fonction de ladite différence.

[0020] Dans un mode de réalisation préféré, le paramètre de non-linéarité pour la pièce de référence est déterminé avec l'ordinateur, conformément aux étapes a) et b).

[0021] Bien entendu, les caractéristiques optionnelles des étapes a) à d) décrites pour un procédé selon l'invention sont applicables aux étapes correspondantes mises en œuvre par l'ordinateur.

[0022] De préférence, l'opérateur procède de la manière suivante :

- réalisation des étapes a) et b) et, pour la pièce de référence, de l'étape c) ;
- positionnement du résonateur et du récepteur sur les zones d'injection et de sortie, respectivement ;
- injection de l'onde d'excitation de manière à solliciter la pièce à tester suivant le mode de sollicitation optimal ;
- lancement d'un programme de l'ordinateur de manière à exécuter l'étape c) pour la pièce à tester, puis l'étape d).

Brève description des figures

[0023] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront encore à la lecture de la description détaillée qui va suivre et à l'examen du dessin annexé dans lequel :

- [Fig.1] la [Fig.1] est une photo d'une pièce céramique de forme complexe, en l'occurrence une photo d'une pièce de cuvette d'avant-corps d'un four de verrier ;
- [Fig.2] la [Fig.2] représente, pour une pièce parallélépipédique rectangle, les modèles enrichis pour six modes de résonance ;
- [Fig.3] la [Fig.3] illustre schématiquement un mode de sollicitation optimal de ladite pièce parallélépipédique rectangle, ainsi qu'un dispositif de détection selon l'invention ;
- [Fig.4] la [Fig.4] représente une partie d'un spectre de fréquence pour l'onde de sortie reçue en zone de sortie dans le mode de sollicitation optimal de la [Fig.3] ;
- [Fig.5] la [Fig.5] illustre l'évolution du décalage fréquentiel, en ordonnées, en fonction de l'amplitude de l'onde de sortie, pour huit pièces en corindon à liaison

nitruure de même forme, en partant, pour réaliser l'analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire, d'un mode de sollicitation non optimal, selon la technique antérieure, (graphique de gauche) et d'un mode de sollicitation optimal, selon l'invention (graphique de droite, les deux ovales en traits interrompus regroupant les pièces présentant un défaut (« crack ») et les pièces ne présentant pas de défaut (« sound »), respectivement ;

- [Fig.6] la [Fig.6] fournit les paramètres non-linéaires définis à partir des graphiques de gauche (graphique de gauche de la [Fig.6]) et de droite (graphique de droite de la [Fig.6]) de la [Fig.5], respectivement ;

- [Fig.7] la [Fig.7] représente, pour la pièce objet du premier exemple, les modèles enrichis pour quatre modes de résonance ;

- [Fig.8] la [Fig.8] illustre la sélectivité que permet un procédé selon l'invention, comme décrit pour le deuxième exemple.

[0024] Sur les différentes figures, des références identiques sont utilisées pour désigner des organes identiques ou similaires.

Définitions

[0025] L'amplitude d'une onde est classiquement la hauteur du pic principal d'un spectre de fréquence de ladite onde, le pic principal étant le pic le plus élevé.

[0026] Sauf indication contraire, tous les pourcentages relatifs aux compositions sont des pourcentages en masse.

[0027] La porosité totale est classiquement égale à $100 \times (\text{densité absolue} - \text{densité apparente}) / \text{densité absolue}$.

[0028] Les mesures de la densité apparente sont effectuées suivant la norme ISO5017 sur un barreau prélevé à cœur de la pièce, en zone saine. La densité absolue est classiquement mesurée sur poudre broyée, au moyen d'un pycnomètre à hélium.

[0029] « Comporter », « présenter » ou « comprendre » doivent être interprétés de manière large, non limitative.

Description détaillée

[0030] Un procédé selon l'invention peut être mis en œuvre pour détecter un défaut dans une pièce à tester quelconque. Il est particulièrement bien adapté à une pièce à tester comportant, de préférence constitué en un matériau inorganique, de préférence un métal fritté, une céramique ou une vitrocéramique.

[0031] De préférence, la pièce à tester est en un matériau réfractaire, c'est-à-dire en un matériau inorganique non métallique, par exemple fondu ou fritté.

[0032] De préférence, le module d'élasticité (MOE) de la pièce à tester est compris entre 1 et 500 GPa, de préférence entre 5 à 100 GPa, à température ambiante.

[0033] De préférence, la masse volumique apparente de la pièce à tester est comprise entre

0,5 et 10 g/cm³, de préférence entre 1 et 6 g/cm³.

- [0034] La pièce à tester peut être monobloc ou être un assemblage rigide de blocs.
- [0035] Elle peut en particulier peser plus de 0,5 kg, plus de 1 kg, plus de 5 kg et/ou moins de 1000 kg, moins de 100 kg, moins de 50 kg ou moins de 20 kg.
- [0036] La pièce à tester est de préférence choisie parmi :
- un bloc ou linteau de gorge,
 - un bloc de cuve,
 - une brique ou un bloc de mur ou de côté,
 - un bloc de coin ou d'angle,
 - une brique à nez,
 - un bloc ou une dalle de sole,
 - une brique ou un sommier de voute,
 - une brique ou un bloc d'entourage de tuyère,
 - une brique de trou ou chenal de coulée,
 - un bloc porte électrode,
 - une pièce de bec réfractaire de four verrier,
 - un bloc d'injecteur,
 - une gorge de four de verrerie,
 - une pièce d'un échangeur thermique du four,
 - une plaque ou une tuile réfractaire d'un revêtement de chaudière,
 - une coquille de protection de tube de réchauffeur d'un incinérateur,
 - une tuile d'un incinérateur,
 - une pièce céramique d'un absorbeur solaire,
 - une tuile ou une pièce de protection d'une chambre de turbine de combustion.
- [0037] Le défaut est une modification locale, le plus souvent non désirée, de :
- la géométrie de la pièce à tester ; ou
 - la composition chimique de la pièce à tester ; ou
 - de la microstructure de la pièce à tester.
- [0038] Le défaut peut être notamment un espace vide ou un espace rempli par un matériau différent du reste de la pièce. Il peut s'agir par exemple d'une fissure, d'une retassure, ou d'une inclusion.
- [0039] Le défaut peut être aussi une variation chimique ou structurale, notamment cristallographique
- [0040] Les dimensions du défaut peuvent être quelconque. En particulier, sa plus grande dimension (longueur) peut être comprise entre 1 µm et 100 mm.
- [0041] **Avant l'étape a)**, le procédé peut inclure la détermination de la région d'intérêt, c'est-à-dire d'une région interne à la pièce à tester et dans laquelle la probabilité d'occurrence d'un défaut est élevée.

- [0042] En particulier, l'expérience peut mettre en évidence une région des pièces dans laquelle des défauts apparaissent de manière répétée. Une telle région peut être choisie comme région d'intérêt. La constatation de la présence d'un défaut dans une pièce peut nécessiter la destruction de la pièce, par exemple par découpe et observation selon plusieurs plans de section. Une méthode non destructive, telle que la radiographie ou la tomographie, peut également être utilisée pour constater la présence d'un défaut, si les dimensions de la pièce le permettent.
- [0043] Il est aussi possible de réaliser une analyse locale, par exemple une mesure chimique élémentaire locale sur un échantillon prélevé sur la pièce, par exemple au moyen d'un microscope équipé d'une sonde EDS ou EDX ou au moyen d'une analyse de phase, par exemple par diffraction X.
- [0044] La région d'intérêt peut avoir une forme quelconque.
- [0045] Lorsque la forme générale du défaut à détecter est connue, la région d'intérêt est de préférence déterminée de manière à englober le défaut, de préférence de manière la plus précise possible.
- [0046] Le volume de la région d'intérêt est de préférence supérieur à celui du défaut. Il est de préférence inférieur à 5 fois, 3 fois, 2 fois ou 1,5 fois le volume du défaut.
- [0047] Lorsque la forme du défaut à détecter est connue, la région d'intérêt présente de préférence une forme similaire, dans lequel le défaut s'étend.
- [0048] Le volume de la région d'intérêt est de préférence inférieur 1000 cm^3 et/ou supérieur à $0,1 \text{ cm}^3$.
- [0049] Le volume de la région d'intérêt est de préférence inférieur à 0,5 fois, de préférence inférieur à 0,3 fois, de préférence inférieur à 0,2 fois, de préférence inférieur à 0,1 fois, de préférence inférieur à 0,05 fois, et/ou supérieur à 0,01 fois le volume de la pièce à tester.
- [0050] Dans un mode de réalisation, la région d'intérêt est délimitée par un volume de révolution dans lequel est inscrit le défaut. Selon la forme du défaut, le volume de révolution peut être un cylindre (dans le cas d'un défaut allongé dans une seule dimension de l'espace) ou une sphère.
- [0051] **A l'étape a)**, on analyse une pièce de référence pour rechercher un mode de résonance optimal.
- [0052] La pièce de référence est une pièce identique à la pièce à tester, hormis, éventuellement, dans la région dans laquelle le défaut est recherché, c'est-à-dire dans la région d'intérêt. Par « identique », on entend « présentant sensiblement la même géométrie (c'est-à-dire la même forme), aux tolérances de fabrication près, et constitué en le même matériau (même composition, même microstructure), aux variations dues aux matières premières et à la conduite du procédé de fabrication près ». Les tolérances dimensionnelles de fabrication sont classiquement de moins d'un millimètre dans le

domaine des réfractaires, et de moins de 100 microns dans le domaine des céramiques techniques. Les tolérances de composition sont classiquement de +/-5% pour un composant dont la teneur est supérieure à 30% en masse, et inférieures à +/- 1% pour un autre composant.

- [0053] La pièce de référence étant de même forme générale que la pièce à tester, par souci de clarté, on appelle également « région d'intérêt » la région équivalente de la pièce de référence, c'est-à-dire la région qui se superposerait à la région d'intérêt de la pièce à tester si cette dernière pouvait être « superposée » avec la pièce de référence pour être confondue avec elle.
- [0054] **A l'étape a1)**, de préférence avec un logiciel adapté et un ordinateur, on détermine des modes de résonance de la pièce de référence, en considérant que le module d'élasticité de la pièce de référence est constant (acoustique linéaire). Chaque mode de résonance définit une fréquence de résonance de la pièce de référence et un champ de contraintes mécaniques généré lorsque la pièce de référence est en résonance à ladite fréquence de résonance.
- [0055] De préférence, on utilise un logiciel conventionnel, par exemple ComSol® ou Abacus®.
- [0056] Classiquement, un modèle numérique de la pièce de référence est d'abord généré. Un tel modèle est une représentation tridimensionnelle, dans l'espace, de la pièce de référence. Les dimensions et la géométrie de la pièce de référence sont définies par un maillage de points, ou « voxels ».
- [0057] De préférence, la densité de maillage ou « densité volumétrique des points de maillage », est définie de manière qu'au moins un point du maillage soit présent dans la région d'intérêt.
- [0058] De préférence, au moins la masse volumique apparente du matériau constituant la pièce de référence, le module d'élasticité dudit matériau et son coefficient de Poisson sont entrées dans le logiciel.
- [0059] L'homme du métier sait déterminer la masse volumique apparente. Par exemple, pour un matériau en une céramique, en un métal ou en un verre, elle peut être mesurée directement sur la pièce de référence ou sur un échantillon de la pièce selon la norme ISO 5017. Le module d'élasticité peut être mesuré par des essais dynamiques, de préférence selon la norme ASTM C1259-01, notamment pour une pièce de référence céramique pour laquelle le coefficient de Poisson est en général égal à 0,2.
- [0060] Classiquement par un calcul par éléments finis, le logiciel détermine, en une pluralité de points de la pièce de référence, de préférence au moins en surface de la pièce de référence, les contraintes mécaniques, en particulier en traction et/ou en tension, et/ou en compression et/ou en torsion et/ou en cisaillement, selon différentes directions. Alternativement, ou en complément, le logiciel peut déterminer une propriété équivalente

aux contraintes mécaniques, comme une déformation.

- [0061] Le logiciel peut calculer la valeur absolue d'une contrainte mécanique, ou une valeur relative calculée par rapport la valeur en un endroit prédéfini de la pièce de référence. Par ailleurs, en un point de la pièce, les contraintes mécaniques varient dans le temps sous l'effet de l'onde d'excitation. Le logiciel peut par exemple fournir la valeur moyenne ou la valeur maximale d'une contrainte mécanique ou l'amplitude de sa variation.
- [0062] De préférence, le logiciel présente les contraintes mécaniques sous forme graphique, de préférence sous la forme d'un modèle « enrichi », donc l'aspect, par exemple la couleur, dépend localement de la contrainte mécanique locale. Une vue d'un modèle enrichi est donc une carte représentant un champ de contraintes.
- [0063] Dans un mode de réalisation, les contraintes mécaniques locales ne sont représentées qu'en surface du modèle. Dans un mode de réalisation, le logiciel permet de générer des plans de coupe et de visualiser les contraintes mécaniques locales dans le plan de coupe.
- [0064] Le nombre de modes de résonance déterminés peut être supérieur à 3, à 5, à 10 et/ou inférieur à 30 ou à 20. Classiquement, il est possible de saisir ce nombre dans le logiciel afin qu'il fournisse les principaux modes de résonance.
- [0065] **A l'étape a2)**, on sélectionne, parmi les modes de résonance déterminés à l'étape a1), le mode de résonance « optimal » qui génère, dans la région d'intérêt, une contrainte mécanique maximale. Autrement dit, dans la région d'intérêt, c'est le mode de résonance optimal qui produit la contrainte mécanique (ou la déformation mécanique) la plus élevée par rapport à celles produites dans les autres modes de résonance dans ladite région d'intérêt.
- [0066] Avantageusement, une simple comparaison visuelle des différents modèles enrichis, obtenus pour les différents modes de résonance, permet d'identifier immédiatement le mode de résonance générant des contraintes maximales dans la région d'intérêt de la pièce de référence, et donc de déterminer la fréquence de résonance associée, dite « optimale ».
- [0067] Plusieurs modes de résonance peuvent générer des contraintes maximales dans la région d'intérêt de la pièce de référence. Dans cette situation exceptionnelle, le mode de résonance optimal est de préférence le mode de résonance qui, en pratique, est le plus facile à mettre en œuvre.
- [0068] Les inventeurs ont découvert que les étapes a1) à a2) permettent de définir un mode de résonance optimal permettant, par des analyses par spectrométrie de résonance non-linéaire de type NRUS ou NRAS connues, de détecter de manière particulièrement fiable un défaut dans la pièce à tester.
- [0069] La [Fig.2] représente, pour six modes de résonance, les modèles enrichis cor-

respondant obtenus avec le logiciel ComSol®, pour un bloc parallélépipédique rectangle 2. Chaque modèle enrichi représente, en nuances de gris, la déformation locale à la surface du bloc, pour un mode de résonance respectif. Plus le gris est sombre, plus la déformation est importante. Dans une même région, on constate immédiatement que les déformations locales, et donc les contraintes mécaniques locales, varient considérablement en fonction du mode de résonance considéré.

- [0070] Pour une région d'intérêt au centre du bloc, il apparaît immédiatement que le premier mode de résonance (modèle en haut à gauche) est le mode de résonance optimal.
- [0071] **A l'étape b)**, on détermine d'abord un mode de sollicitation optimal, activant principalement ledit mode de résonance optimal.
- [0072] Un mode de sollicitation définit des conditions dans lesquelles une pièce est mise en vibration, c'est-à-dire précise, pour un régime vibratoire, les conditions d'excitation nécessaires pour obtenir ce régime vibratoire. Un mode de sollicitation peut ainsi préciser
- une zone d'injection, c'est-à-dire une zone à la surface de la pièce par laquelle une onde d'excitation pénètre dans la pièce,
 - une zone de sortie, c'est-à-dire une zone à la surface de la pièce par laquelle l'onde d'excitation est reçue après avoir traversé, au moins partiellement, la pièce, cette onde étant alors appelée « onde de sortie », et
 - les caractéristiques de l'onde d'excitation, qui, lorsqu'elle est injectée par la zone d'injection, conduisent au régime vibratoire.
- [0073] La [Fig.3] représente un dispositif de détection 3 selon l'invention, dans une position de service. Ce dispositif comporte un ordinateur 4, un résonateur 5, sous la forme d'un marteau, et un récepteur 6. Cette figure illustre un mode de sollicitation optimal pour le bloc 2 de la [Fig.2]. On distingue la zone d'excitation 7 sur laquelle un impact, symbolisé par la flèche, est produit, la zone de sortie 8 et la région d'intérêt 9.
- [0074] Les caractéristiques de l'onde d'excitation ne sont pas limitées. L'onde d'excitation peut être en particulier une impulsion, une succession d'impulsions, un signal périodique ou non, ou une succession de tels signaux.
- [0075] Elle peut être une onde sinusoïdale, par exemple injectée au moyen d'un disque piézoélectrique, comme décrit dans US6330827B1.
- [0076] Une analyse spectrale conventionnelle de l'onde de sortie génère un spectre de fréquence comportant un ensemble de pics. Le sommet du pic le plus élevé, ou « pic principal » est localisé à une fréquence dite « de résonance ».
- [0077] Un mode de sollicitation « active » un mode de résonance lorsque le spectre de fréquence de l'onde de sortie comporte un pic à la fréquence de résonance de ce mode. Un mode de sollicitation peut théoriquement n'activer qu'un unique mode de résonance. En pratique, et notamment pour une pièce de forme complexe, un mode de sollicitation active plusieurs modes de résonance, plus ou moins intensément. Un mode

de sollicitation « active principalement » un mode de résonance lorsque, sur le spectre de fréquence, le pic le plus élevé est à la fréquence de résonance de ce mode de résonance.

- [0078] L'onde d'excitation est de préférence choisie pour activer principalement le mode de résonance optimal.
- [0079] La fréquence de résonance optimale dépend notamment des dimensions et de la forme de la pièce. De préférence, l'onde d'excitation est choisie de manière que son spectre de fréquence présente un pic principal centré sur une fréquence principale supérieure à 1 Hz, de préférence supérieure à 50 Hz, de préférence supérieure à 100 Hz, et/ou inférieure à 100 KHz, de préférence inférieure à 50 KHz.
- [0080] De préférence, l'onde d'excitation est choisie de manière que le pic principal du spectre de fréquence de l'onde de sortie soit centré sur une fréquence principale supérieure à 1 Hz, de préférence supérieure à 50 Hz, de préférence supérieure à 100 Hz, et/ou inférieure à 100 KHz, de préférence inférieure à 50 KHz.
- [0081] Le résonateur permettant l'injection de l'onde d'excitation peut être par exemple un marteau, un pot vibrant ou un transducteur piézoélectrique. Le résonateur peut également être écarté de la pièce, par exemple être un haut-parleur audio. Le résonateur peut être un appareil de chauffage pour injecter une onde d'excitation sous la forme d'un flash thermique ou d'une onde laser.
- [0082] En pratique, l'onde d'excitation peut être injectée dans la pièce par impact, par exemple par une série d'impacts dans la zone d'injection, ou « zone d'impact ». Un impact permet avantageusement d'injecter une onde d'excitation présentant un large spectre de fréquence.
- [0083] Un marteau en un matériau dur, par exemple en carbure de silicium, permet d'injecter une onde d'excitation dont le spectre de fréquence présente des pics élevés pour des fréquences élevées. Un tel marteau est bien adapté pour des pièces de petites dimensions.
- [0084] Un marteau en un matériau mou, par exemple en caoutchouc, permet d'injecter une onde d'excitation dont le spectre de fréquence présente des pics élevés pour des fréquences faibles. Un tel marteau est bien adapté pour des pièces de grandes dimensions.
- [0085] De simples essais permettent de choisir un marteau adapté.
- [0086] Le récepteur disposé dans la zone de sortie pour capter l'onde de sortie peut être par exemple un transducteur de détection ou de réception, en particulier un microphone, un accéléromètre, une caméra rapide ou un laser.
- [0087] De préférence, l'onde d'excitation est une onde périodique ayant la fréquence de résonance optimale, ou une onde dont la fréquence principale est la fréquence de résonance optimale.

- [0088] De simples essais, optionnellement simulés par ordinateur, permettent de déterminer un mode de sollicitation activant principalement le mode de résonance optimal, c'est-à-dire le mode de sollicitation optimal.
- [0089] Pour guider ces essais, on peut initialement écarter le plus possible la zone de sortie de la zone d'injection, en plaçant cependant ces zones dans des zones dans lesquelles les contraintes mécaniques sont élevées. En déplaçant la zone d'injection, on peut constater l'évolution de la taille des pics sur les spectres de fréquence successifs. Il suffit donc de déplacer la zone d'injection jusqu'à ce que la hauteur du pic centré sur la fréquence de résonance optimale soit supérieure à la hauteur des autres pics. De préférence, on poursuit ce déplacement jusqu'à une position dans laquelle ce pic se détache le plus possible des autres pics, c'est-à-dire jusqu'à une position activant le plus faiblement possible les autres modes de résonance.
- [0090] De préférence, la zone d'injection est choisie pour être la plus proche possible de la région d'intérêt.
- [0091] La direction de l'injection de l'onde d'excitation, ou « direction d'impact », est de préférence sensiblement parallèle à la direction principale de la déformation dans le mode de résonance optimal.
- [0092] Lorsque la région d'intérêt présente une forme générale aplatie, la direction d'impact est de préférence sensiblement perpendiculaire au plan général suivant lequel la région d'intérêt s'étend. De préférence, elle forme, avec ce plan général, un angle inférieur à 30° , de préférence inférieur à 20° , de préférence inférieur à 10° . Par exemple pour détecter une fissure, la direction d'impact est de préférence perpendiculaire au plan de la fissure.
- [0093] De préférence, la pièce sur laquelle un mode de sollicitation est appliqué est disposée sur un support configuré de manière à rester au plus près des conditions de vibration libre et à minimiser les effets du poids et du contact avec le support. De préférence, la pièce est posée sur une mousse. De préférence, la pièce repose sur ses parties les plus rigides. Par exemple, si la pièce est une cuvette d'avant corps (CAC), il est préférable qu'elle repose sur son fond. De préférence encore, les points d'appui sur le support sont au niveau de nœuds de vibration.
- [0094] La [Fig.4] représente le spectre de fréquence de l'onde de sortie dans le mode de sollicitation optimal illustré sur la [Fig.3]. On distingue en particulier le pic principal 10 centré sur la fréquence de résonance optimale de 6 496 kHz du mode de résonance représenté sur la [Fig.3].
- [0095] Dans un mode de réalisation, les étapes a) et b) sont réalisées simultanément, la recherche du mode de sollicitation optimal étant réalisée de la manière suivante :
- simulation numérique d'une pluralité de modes de sollicitation, la simulation numérique déterminant pour chaque mode de sollicitation, un champ de contraintes

mécaniques dans la pièce de référence et une onde de sortie théorique ;

- analyse des champs de contraintes mécaniques et des ondes de sortie théoriques de manière à sélectionner, comme mode de sollicitation optimal, le mode de sollicitation générant, dans la région d'intérêt, une contrainte mécanique maximale et mettant en résonance la pièce de référence.

- [0096] On considère que la pièce de référence est en résonance si le spectre de fréquence de l'onde de sortie fait apparaître un pic principal dont la hauteur (amplitude de l'onde de sortie) est au moins 1,5 fois, de préférence au moins deux fois, de préférence au moins trois fois plus grande que celle des autres pics.
- [0097] On peut utiliser un logiciel capable, à partir d'un modèle de la pièce de référence, de calculer les champs de contraintes mécaniques et de simuler une onde de sortie en une zone de sortie sous l'effet d'une simulation d'une onde d'excitation dans une zone d'excitation de ladite pièce de référence.
- [0098] **A l'étape c)**, on réalise une analyse des ondes de sortie obtenues dans le mode de sollicitation optimal pour la pièce de référence et la pièce à tester. La même analyse, par spectrométrie de résonance non-linéaire, est réalisée pour les deux pièces. Cette analyse repose sur les principes des méthodes NRAS ou NRUS.
- [0099] Cette analyse est conventionnelle et connue de l'homme du métier. Elle permet de déterminer un paramètre de non-linéarité représentatif de la variation du module d'élasticité de la pièce lorsqu'on modifie l'amplitude de l'onde d'excitation du mode de sollicitation optimal déterminé à l'étape b).
- [0100] US6330827B1 fournit des détails sur une analyse par spectrométrie de résonance ultrasonore non-linéaire.
- [0101] L'amplitude de l'onde de sortie suit l'évolution de l'amplitude de l'onde d'excitation. Faire varier l'amplitude de l'onde d'excitation est donc équivalent à faire évoluer l'amplitude de l'onde de sortie. L'onde de sortie est cependant plus facile à analyser et donc utilisée en pratique.
- [0102] En pratique, on choisit donc un paramètre de non-linéarité représentatif d'une variation de la fréquence de résonance de la pièce lorsque l'amplitude de l'onde de sortie varie.
- [0103] De préférence, le paramètre de non-linéarité est représentatif d'une variation d'un décalage fréquentiel de la fréquence de résonance par rapport à la fréquence de résonance optimale f_0 , lorsque l'amplitude de l'onde de sortie varie à partir du mode de sollicitation optimal.
- [0104] En pratique, l'amplitude de l'onde d'excitation est de préférence progressivement augmentée pour limiter l'influence négative de phénomènes d'hystérésis. L'amplitude initiale de l'onde d'excitation ou de l'onde de sortie est de préférence choisie la plus faible possible, mais suffisante pour que le bruit mesuré dans l'onde de sortie soit rela-

tivement négligeable, par exemple pour être supérieure à 2 fois ou 3 fois l'amplitude du bruit. Elle est ensuite augmentée, de préférence jusqu'à une amplitude finale au moins 2 fois, de préférence au moins 3 fois, voire au moins 5 ou 10 fois supérieure à l'amplitude initiale.

- [0105] Le décalage fréquentiel est de préférence, pour une amplitude de l'onde de sortie, le rapport de la valeur absolue de la différence entre la fréquence de résonance optimale f_0 et la fréquence de résonance f déterminée pour ladite amplitude, divisé par f_0 , c'est-à-dire $|f_0 - f|/f_0$. La fréquence de résonance f peut être déterminée classiquement par analyse spectrale, étant la fréquence du pic le plus élevé.
- [0106] Les décalages fréquentiels sont de préférence calculés comme décrit par US6330827B1.
- [0107] Le paramètre de non-linéarité est de préférence la pente d'une droite représentative de l'évolution du décalage fréquentiel lorsque l'amplitude de l'onde de sortie varie, notamment de manière linéaire ou logarithmique. Ladite droite est de préférence la droite qui définit la direction générale de la ligne brisée qui relie une pluralité de points donnant chacun une amplitude de l'onde de sortie et le décalage fréquentiel correspondant. Elle est de préférence déterminée par régression linéaire.
- [0108] La pente de cette droite est affectée par la présence d'un défaut dans la pièce, ce qui est exploité pour déterminer la présence d'un défaut.
- [0109] Le paramètre de non-linéarité, notamment ladite pente, dépend non seulement des dimensions, de la forme et du matériau constitutif de la pièce analysée, mais aussi des dimensions et de la nature du défaut.
- [0110] Une différence entre les paramètres de non-linéarité déterminés pour la pièce de référence et pour la pièce à tester permet ainsi de détecter la présence d'un défaut dans la pièce à tester. Les inventeurs ont découvert qu'un procédé selon l'invention permet d'accroître la fiabilité de cette détection.
- [0111] **A l'étape d)**, cette différence est utilisée pour détecter la présence éventuelle d'un défaut, par exemple d'une fissure.
- [0112] Les inventeurs ont en effet constaté que le paramètre de non-linéarité est particulièrement différent selon qu'une pièce comporte ou non un défaut dans la région d'intérêt.
- [0113] La pièce à tester peut être ainsi classée dans la catégorie des pièces présentant un défaut dans la région d'intérêt, ou dans la catégorie des pièces ne présentant pas de défaut dans la région d'intérêt. Dans un mode de réalisation, elle est mise au rebut si elle présente un défaut.
- [0114] Selon l'expérience acquise par les inventeurs, la pente, en valeur absolue, déterminée pour une pièce à tester présentant un défaut, est supérieure de plus de 50%, voire de plus de 100% à celle mesurée sur une pièce à tester n'en présentant pas.

[0115] Dans un mode de réalisation, on détermine, par des essais, une pente maximale et/ou une pente minimale pour délimiter un domaine d'acceptation de la pièce à tester.

Exemples

[0116] Les exemples suivants sont fournis à des fins illustratives et ne limitent pas l'invention.

[0117] **Selon un premier exemple**, la pièce à tester est une cuvette d'avant-corps de four verrier 12, en réfractaire fritté à base de grains d'alumine zircone et silice (voir [Fig.1]). Des essais ont montré que ce type de cuvette peut présenter des fissures radiales, non visibles de l'extérieur, s'étendant depuis le trou de coulée 14.

[0118] La région d'intérêt a donc été définie comme une région s'étendant à la périphérie du trou de coulée.

[0119] Un modèle de la pièce de référence a été créé avec le logiciel ComSol®. Le maillage du modèle a été déterminé de manière à inclure au moins un point dans la région d'intérêt.

[0120] La masse volumique apparente, le module d'élasticité à 20°C et le coefficient de Poisson du matériau réfractaire constituant la pièce de référence sont respectivement 2,6 Kg/m³, 38 GPa et 0,2. Ces données ont été entrées dans le logiciel.

[0121] Le logiciel a ensuite été paramétré pour que la surface du modèle enrichi représente les contraintes de Von Mises. Cet enrichissement permet de mettre en évidence les phénomènes traction/compression locales aussi bien que les contraintes de cisaillement.

[0122] Le logiciel a ensuite déterminé quatre modes de résonance et les fréquences de résonance correspondantes, à savoir 280 Hz, 366 Hz, 876 Hz, et 1040 Hz. Les modèles enrichis correspondant sont représentés sur la [Fig.7]. La surface du modèle est d'autant plus foncée que les contraintes mécaniques locales (ou de manière équivalent la déformation locale) sont élevées. Le modèle enrichi du mode de résonance n°3 est celui qui montre la plus grande amplitude de déformation au pourtour du trou de coulée, dans la région d'intérêt. Le mode de résonance n°3 est donc optimal.

[0123] Parmi les autres modes de résonance, le mode de résonance n°4 est celui qui a la fréquence de résonance la plus élevée et conduit aux plus fortes contraintes mécaniques. Il n'est cependant pas optimal selon l'invention, car ces contraintes mécaniques ne sont pas localisées dans la région d'intérêt. Il est choisi comme exemple comparatif.

[0124] Sur la [Fig.7], la référence 7 indique la zone d'injection et la référence 8 indique la zone de sortie. Les ondes d'excitation ont été injectées en frappant la zone d'injection à l'aide d'un marteau d'acousticien. L'onde de sortie a été captée avec un accéléromètre dans la zone de sortie 8.

- [0125] Le mode de sollicitation pour le mode de résonance n°3 a été appliqué dans 8 pièces de la même production.
- [0126] Pour chaque pièce, plusieurs essais ont été réalisés, en modifiant à chaque fois l'amplitude de l'onde d'excitation, et donc l'amplitude de l'onde de sortie. Un spectre de fréquences (amplitudes selon les fréquences) a été réalisé pour chaque onde de sortie reçue. La fréquence de résonance a été déterminée à partir de ce spectre.
- [0127] On a ensuite calculé, pour chaque pièce et pour chaque amplitude d'onde de sortie, le décalage fréquentiel et tracé un point donnant le décalage fréquentiel en fonction de l'amplitude d'onde de sortie ([Fig.5]). Puis, par régression linéaire avec les points ainsi déterminés pour une même pièce, on a déterminé une droite et la pente de cette droite.
- [0128] Cette pente est le paramètre de non-linéarité NL du décalage fréquentiel de résonance $(f-f_0)/f_0$ en fonction de l'amplitude de l'onde de sortie. Elle est représentée sur la [Fig.6].
- [0129] Le mode de sollicitation pour le mode de résonance n°4, c'est-à-dire activant principalement ledit mode de résonance n°4, a ensuite été réalisé en frappant la partie latérale 7 de la pièce à l'aide du marteau d'acousticien. L'onde de sortie a été captée dans la partie inférieure gauche 8 de la pièce.
- [0130] Le paramètre de non-linéarité a ensuite été déterminé pour chaque pièce, comme décrit précédemment pour le mode de résonance optimal n°3.
- [0131] Chaque pièce a ensuite été coupée afin d'observer sa structure interne et vérifier la présence ou non de fissures.
- [0132] Les figures 5 et 6 illustrent les résultats obtenus, le graphique de gauche correspondant au mode de résonance n°4 et celui de droite correspondant au mode de résonance optimal n°3. Sur la [Fig.5], les amplitudes des ondes de sortie sont fournies en abscisse et les décalages fréquentiels en ordonnées. Sur la [Fig.6], les numéros des échantillons sont fournis en abscisse et les paramètres de non-linéarité en ordonnées.
- [0133] Ces figures montrent que l'invention améliore considérablement la discrimination entre les pièces comportant des fissures et celles qui en sont dépourvues.
- [0134] **Selon un deuxième exemple**, des blocs réfractaires E1-E5 sensiblement parallélépipédiques rectangles d'épaisseur 95 mm, de largeur 135 mm environ et de longueur 500 mm, constitués de Corindon liés par une phase de nitrure de silicium, ont été fabriqués.
- [0135] Des prises d'échantillons ont permis de faire les constats suivants :
- [0136]
- Le bloc E1 présentait une structure interne sans aucun défaut interne visible.
 - Les blocs E2, E3 et E4 présentaient le même aspect externe que le bloc E1, mais une structure interne avec un cœur de couleur grise ou noire, ce qui ne pose pas de problème en application.
 - Le bloc E5 présentait le même aspect externe que le bloc E1, mais une

structure interne avec un cœur noir ou gris et des fissures internes susceptibles de fragiliser le produit en service.

- [0137] La région d'intérêt est donc le cœur du bloc, susceptible d'être fissuré.
- [0138] La caractérisation des 5 blocs montre qu'ils présentent une densité apparente similaire de $3,2 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, un module d'élasticité d'environ 50 GPa pour un coefficient de Poisson de 0,2. Les blocs E2, E3 et E4 présentent une teneur en silicium métal (analyse chimique à partir d'échantillons prélevés à cœur de bloc) de 1% environ. Les blocs E1 et E5 présentent une teneur en Si résiduel inférieure à 0,5% en masse.
- [0139] Une simulation numérique à l'aide du logiciel ComSol® réalisée comme décrit dans l'exemple précédent a permis d'identifier le mode de résonance optimal, en l'occurrence un mode de résonance en flexion.
- [0140] Chaque bloc a ensuite été sollicité suivant un mode de sollicitation optimal, l'onde d'excitation étant injectée par l'impact d'un marteau à une extrémité du bloc, sur le bord d'une grande face, le récepteur, en l'occurrence un microphone, étant positionné à l'extrémité opposée. Comme pour l'exemple précédent, l'amplitude de l'onde d'excitation a ensuite été augmentée pour déterminer les paramètres de non-linéarité.
- [0141] Les résultats ont été reportés dans le tableau 1 ci-dessous.
- [0142] Chaque bloc présente une signature acoustique propre, et en particulier une fréquence de résonance principale (fréquence du pic le plus élevé sur le spectre de fréquence de l'onde de sortie) qui lui est propre. On observe que la fréquence de résonance principale seule, même dans le mode de sollicitation optimal, ne permet pas de détecter spécifiquement le bloc E5.
- [0143] En revanche, on observe que le paramètre de non-linéarité NL permet de détecter spécifiquement le bloc E5 parce que l'analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire a été réalisée à partir du mode de résonance optimal, focalisé sur le cœur des blocs.
- [0144] [Tableaux 1]

Bloc	E1	E2 à E4	E5
Première fréquence de résonance (Hz)	1050	1120 à 1180	1150
Paramètre de non-linéarité NL	5	6 à 10	18
Observation	Pas de défaut visible	« Cœur noir »	« Cœur noir » avec fissures

- [0145] Des échantillons ont ensuite été prélevés et ont montré que ce suivi permet d'écarter de manière très sélective les blocs fissurés, qui présentent tous un paramètre de non-linéarité supérieur au seuil de 15. En revanche, les blocs non fissurés présentent tous

un paramètre de non-linéarité inférieur au seuil de 15.

[0146] Comme cela apparaît clairement à présent, grâce à l'invention, aucun essai complexe et coûteux, destructif ou non, n'est nécessaire pour déterminer, de manière fiable, la présence d'un défaut dans la région d'intérêt.

[0147] Avantageusement, à la différence de procédés utilisant la radiographie ou la tomographie aux rayons X notamment, un procédé selon l'invention peut être implémenté sur une ligne de production de façon simple et à un coût réduit.

[0148] Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits en détail ci-dessus. En particulier, elle peut être mise en œuvre pour détecter plusieurs défauts dans une même pièce à tester.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de détection d'un défaut dans une région d'intérêt (9) au sein d'une pièce à tester, ledit procédé comprenant les étapes successives suivantes :

a) pour une pièce de référence (2) identique à la pièce à tester mais dépourvue de défaut,

a1) détermination d'un ensemble de modes de résonance définissant chacun :

- une fréquence de résonance de la pièce de référence en considérant que le module d'élasticité de la pièce de référence est constant, et

- un champ de contraintes ou de déformations mécaniques sur et/ou dans la pièce de référence générées lorsque la pièce de référence est en résonance à ladite fréquence de résonance ;

a2) sélection du mode de résonance, qualifié de « mode de résonance optimal », générant, dans la région d'intérêt, une contrainte ou une déformation mécanique maximale par rapport aux autres modes de résonance ;

b) détermination d'un mode de sollicitation, dit « optimal », activant principalement ledit mode de résonance optimal, un mode de sollicitation définissant au moins une onde d'excitation, une zone d'injection de l'onde d'excitation dans la pièce de référence, et une zone de sortie où une onde de sortie résultant de la traversée de l'onde d'excitation depuis la zone d'injection jusqu'à la zone de sortie est captée ;

c) analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire à partir du mode de sollicitation optimal, de manière à déterminer un paramètre de non-linéarité pour chacune desdites pièces à tester et de référence ;

d) classement de la pièce à tester en fonction de la différence entre les paramètres de non-linéarité pour la pièce à tester et pour la pièce de référence.

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication précédente, dans lequel, à l'étape a1), les modes de résonance sont déterminés par simulation numérique, la modélisation de la pièce de référence prenant en compte les dimensions et la géométrie de la pièce de référence, la masse volumique apparente du matériau constituant la pièce de référence, le module d'élasticité dudit matériau, et le coefficient de Poisson dudit matériau.

[Revendication 3]

Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, à l'étape a2), on compare des modèles numériques tridimen-

sionnels de la pièce de référence représentant chacun un champ desdites contraintes ou déformations mécaniques générés lorsque la pièce de référence est en résonance à une fréquence de résonance respective.

[Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le volume de la région d'intérêt est inférieur à 0,2 fois et supérieur à 0,01 fois le volume de la pièce de référence.

[Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les étapes a) et b) sont réalisées simultanément, la recherche du mode de sollicitation optimal étant réalisée de la manière suivante :

- simulation numérique d'une pluralité de modes de sollicitation, la simulation numérique déterminant pour chaque mode de sollicitation, un champ de contraintes mécaniques dans la pièce de référence et une onde de sortie théorique ;
- analyse des champs de contraintes mécaniques et des ondes de sortie théoriques de manière à sélectionner, comme mode de sollicitation optimal, le mode de sollicitation générant, dans la région d'intérêt, une contrainte mécanique maximale et mettant en résonance la pièce de référence.

[Revendication 6] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, à l'étape c), le paramètre de non-linéarité est la pente d'une droite représentative de l'évolution d'un décalage de fréquence en fonction de l'évolution de l'amplitude de l'onde de sortie lorsque ladite amplitude de l'onde de sortie est modifiée, de préférence augmentée, depuis le mode de sollicitation optimal, le décalage de fréquence, pour une amplitude de l'onde de sortie, étant le rapport de la valeur absolue de la différence entre la fréquence de résonance optimale (f_0) dans le mode de résonance optimal et la fréquence de résonance (f) déterminée pour ladite amplitude de l'onde de sortie, divisé par la fréquence de résonance optimale (f_0).

[Revendication 7] Procédé selon la revendication immédiatement précédente, dans lequel, à l'étape d), on compare le paramètre de non-linéarité de la pièce à tester à un seuil déterminé à partir du paramètre de non-linéarité de la pièce de référence, puis on classe la pièce à tester en fonction de la différence entre le paramètre de non-linéarité de la pièce à tester et le seuil, de préférence en fonction du signe de ladite différence.

[Revendication 8] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le défaut est un espace vide au sein de la pièce à tester, ou un espace rempli par un matériau différent du reste de la pièce à tester.

- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la pièce est en un matériau inorganique.
- [Revendication 10] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la pièce est en un métal, un matériau céramique, un matériau vitrocéramique ou en un mélange de ces matériaux.
- [Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, dans le mode de sollicitation optimal, le pic principal d'un spectre de fréquence de l'onde de sortie est à une fréquence comprise entre 1 Hz et 100 KHz.
- [Revendication 12] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'onde de sortie est à une onde acoustique.
- [Revendication 13] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ladite pièce à tester est choisie parmi :
- un bloc ou linteau de gorge,
 - un bloc de cuve,
 - une brique ou un bloc de mur ou de côté,
 - un bloc de coin ou d'angle,
 - une brique à nez,
 - un bloc ou une dalle de sole,
 - une brique ou un sommier de voute,
 - une brique ou un bloc d'entourage de tuyère,
 - une brique de trou ou chenal de coulée,
 - un bloc porte électrode,
 - une pièce de bec réfractaire de four verrier,
 - un bloc d'injecteur,
 - une gorge de four de verrerie,
 - une pièce d'un échangeur thermique du four,
 - une plaque ou une tuile réfractaire d'un revêtement de chaudière,
 - une coquille de protection de tube de réchauffeur d'un incinérateur,
 - une tuile d'un incinérateur,
 - une pièce céramique d'un absorbeur solaire,
 - une tuile ou une pièce de protection d'une chambre de turbine de combustion.
- [Revendication 14] Procédé de tri de pièces extérieurement identiques fabriquées sur une ligne de production, dans lequel on met en œuvre un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes pour chaque pièce, considérée comme une pièce à tester, les étapes a) et b) et l'analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire à partir du mode de sollicitation

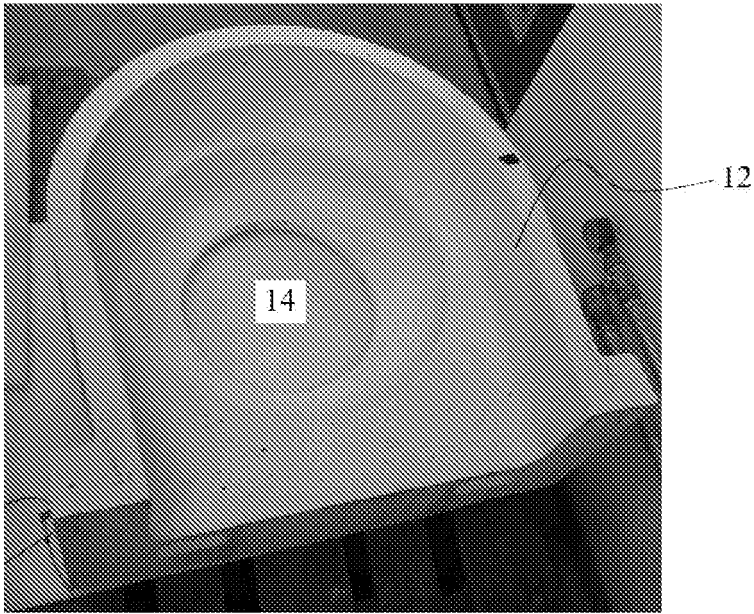
optimal réalisée sur la pièce de référence étant de préférence communes à l'ensemble des pièces.

[Revendication 15]

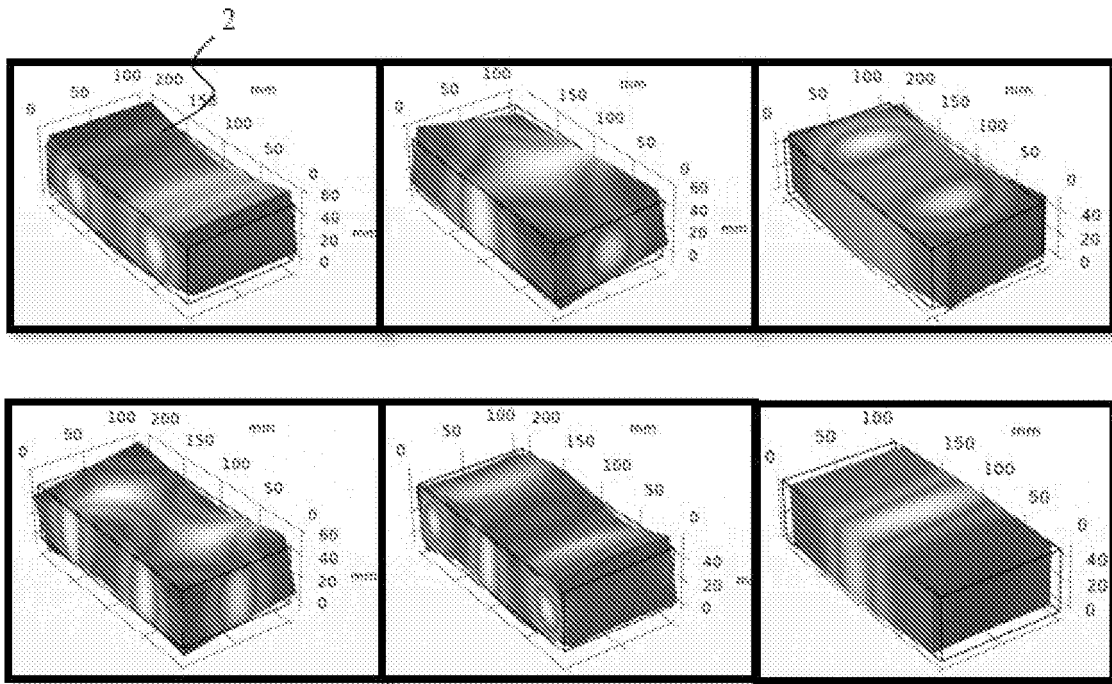
Dispositif de détection destiné à la détection d'un défaut dans une pièce à tester, le dispositif comportant :

- un résonateur (5) apte à injecter, dans la pièce à tester, une onde d'excitation à travers une zone d'injection (7) de la pièce à tester ;
- un récepteur (6) apte à capter une onde de sortie à travers une zone de sortie de la pièce à tester, l'onde de sortie résultant de la traversée de la pièce à tester par l'onde d'excitation ;
- un ordinateur (4) connecté au récepteur de manière à recevoir l'onde de sortie, l'ordinateur ayant une mémoire dans laquelle est enregistré un paramètre de non-linéarité résultant d'une analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire réalisée, conformément à l'étape c) d'un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, à partir d'un mode de sollicitation optimal déterminé conformément aux étapes a) et b) dudit procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, pour une pièce de référence identique à la pièce à tester mais dépourvue de défaut, l'ordinateur étant programmé pour
 - réaliser une dite analyse par spectrométrie de résonance non-linéaire pour la pièce à tester, à partir du mode de sollicitation optimal conformément à l'étape c), de manière à déterminer le paramètre de non-linéarité pour ladite pièce à tester, puis, conformément à une étape d) dudit procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes,
 - déterminer une différence entre les paramètres de non-linéarité pour la pièce à tester et pour la pièce de référence, puis
 - classer la pièce à tester en fonction de ladite différence.

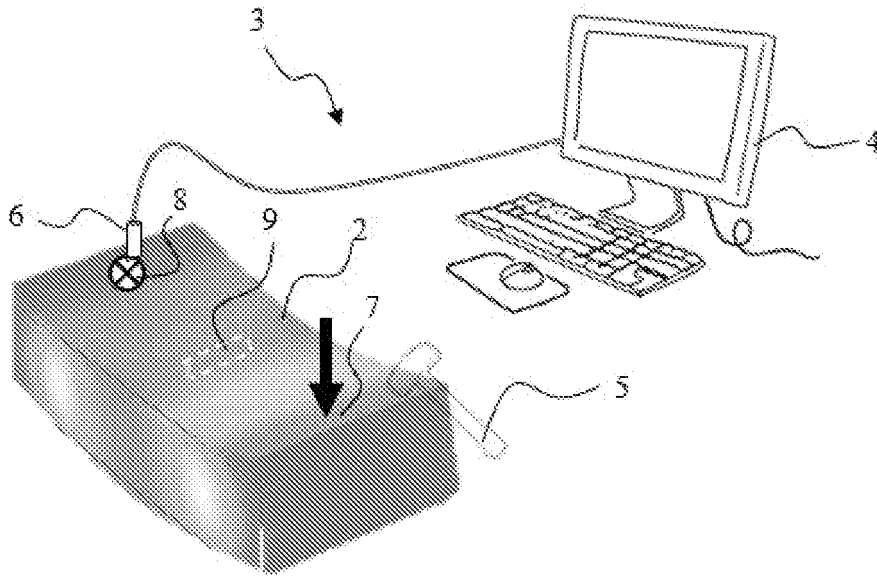
[Fig. 1]



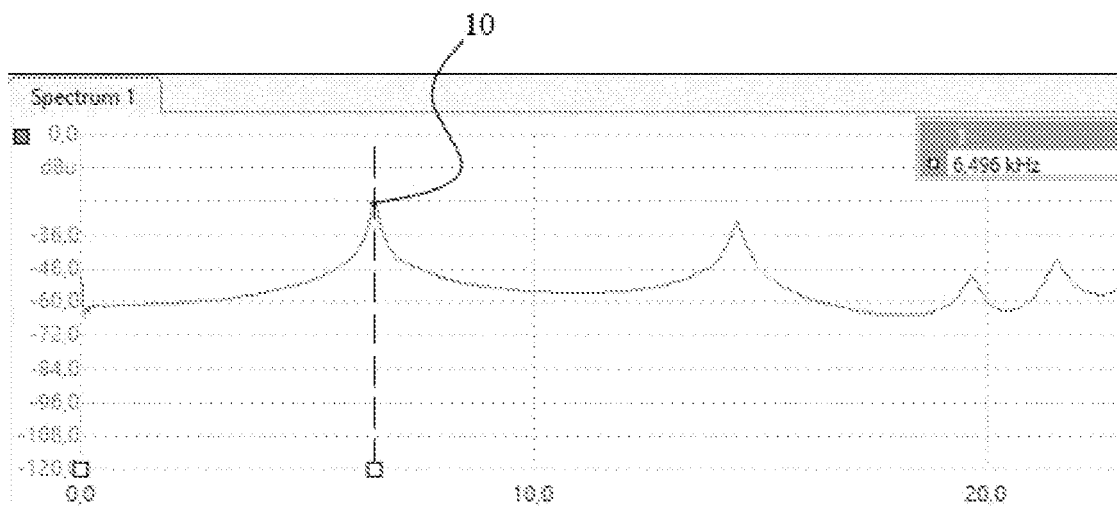
[Fig. 2]



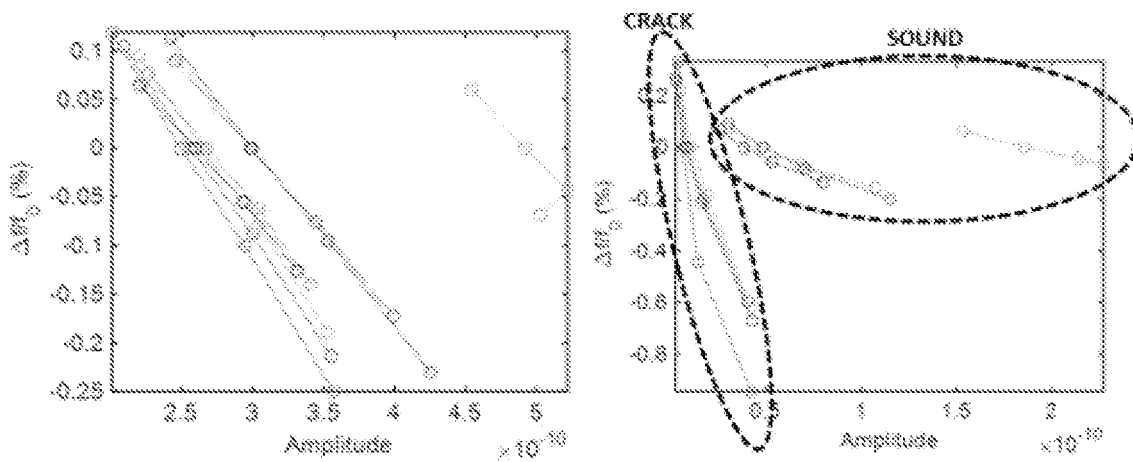
[Fig. 3]



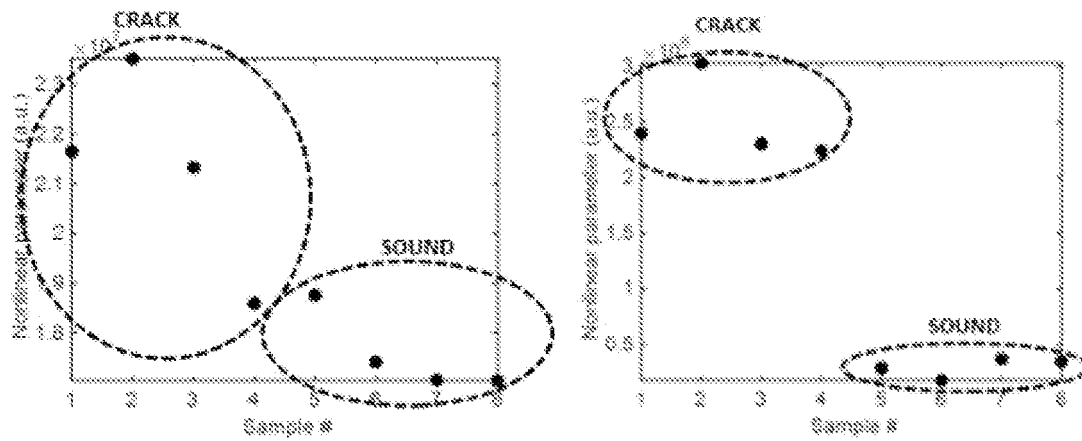
[Fig. 4]



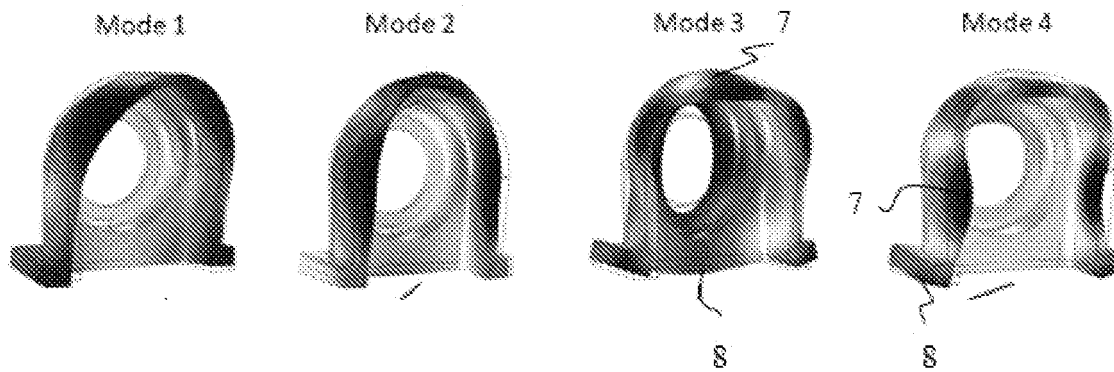
[Fig. 5]



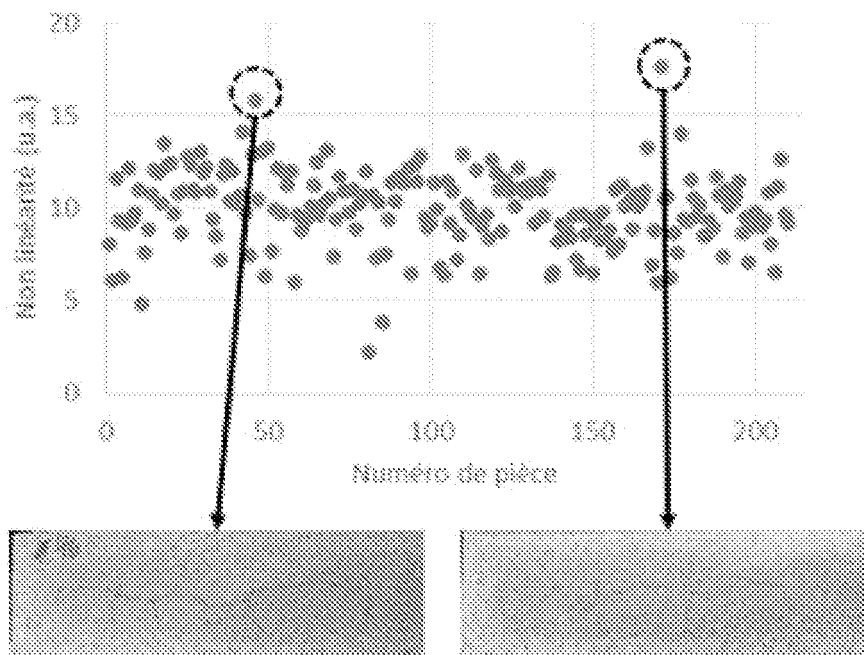
[Fig. 6]



[Fig. 7]



[Fig. 8]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

US 6 330 827 B1 (JOHNSON PAUL A [US] ET AL) 18 décembre 2001 (2001-12-18)

GLIOZZI A S ET AL: "Modelling localized nonlinear damage and analysis of its influence on resonance frequencies; Modelling localized nonlinear damage", JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 39, no. 17, 7 septembre 2006 (2006-09-07), pages 3895-3903, XP020094727, ISSN: 0022-3727, DOI: 10.1088/0022-3727/39/17/028

LOTT M ET AL: "Three-dimensional modeling and numerical predictions of multimodal nonlinear behavior in damaged concrete blocks", THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747, vol. 144, no. 3, 5 septembre 2018 (2018-09-05), pages 1154-1159, XP012231329, ISSN: 0001-4966, DOI: 10.1121/1.5053692 [extrait le 2018-09-05]

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

NEANT

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT