



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
02.10.2002 Bulletin 2002/40

(51) Int Cl.7: **G10K 11/175, G10K 11/16**

(21) Numéro de dépôt: **01870065.8**

(22) Date de dépôt: **27.03.2001**

(84) Etats contractants désignés:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE TR**
Etats d'extension désignés:
AL LT LV MK RO SI

- **Magain, Pascal**
6470 Montbliart (BE)
- **Maseri, Fabrizio**
5310 Bolinne (BE)
- **Kergen, Richard**
4347 Fexhe-le-haut Clocher (BE)

(71) Demandeur: **Recherche et Développement
GROUPE COCKERILL SAMBRE**
4000 Liège (BE)

(74) Mandataire: **Van Malderen, Michel et al**
Office van Malderen
85/043 Boulevard de la Sauvenière
4000 Liège (BE)

(72) Inventeurs:
• **Goffaux, Cécile**
5336 COURRIERE (BE)

(54) **Enveloppes ou parois présentant des propriétés ajustables d'isolement et/ou d'absorption acoustique**

(57) La présente invention se rapporte à un dispositif d'isolement et/ou de correction acoustique dans le domaine des ondes de fréquence audible, c'est-à-dire entre 15 Hz et 20 kHz, et de préférence comprises entre 100 et 5000 Hz, caractérisé en ce qu'il présente, au sein d'un milieu de base, une répétition périodique à deux

dimensions d'une cellule de base, ladite cellule comprenant au moins un motif géométrique anguleux, ledit motif étant constitué d'au moins deux côtés, pour former une structure de matériaux juxtaposés présentant de forts contrastes d'impédances acoustiques, c'est-à-dire de densités et/ou de vitesses de propagation desdites ondes.

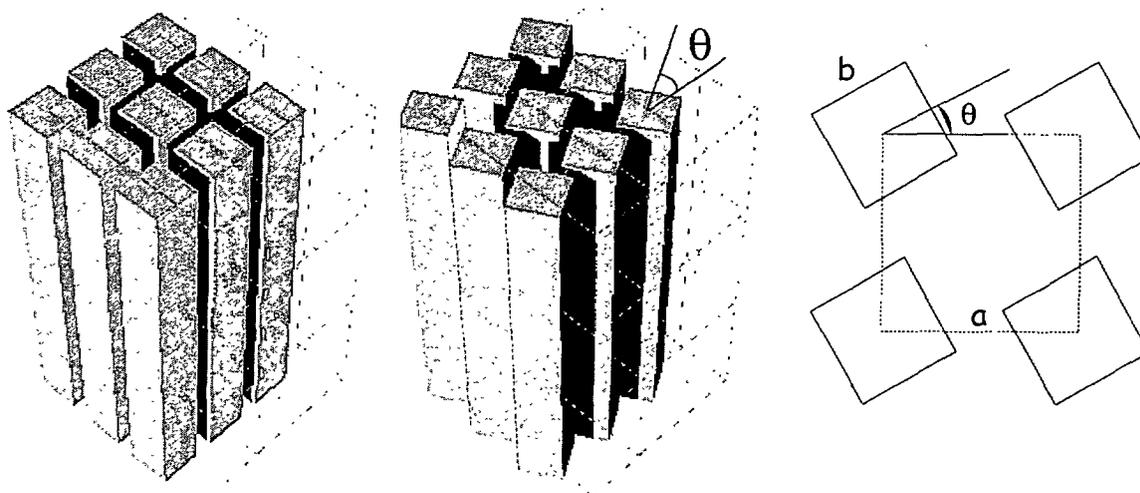


FIG. 1

Description

Objet de l'invention

[0001] La présente invention se rapporte à des structures originales, constituées de motifs anguleux, permettant de combiner une fonction d'enveloppe ou de séparation avec des propriétés remarquables d'isolement et d'absorption acoustique.

Etat de la technique et arrière-plan scientifique

[0002] Aujourd'hui, la qualité acoustique est une notion extrêmement importante qui se rapporte à différents secteurs du bâtiment comme le résidentiel, le bâtiment public ou encore le bâtiment à usage professionnel. Afin d'assurer une qualité de vie correcte dans ces bâtiments, il est indispensable de se protéger du bruit de voisinage, du bruit routier, ferroviaire ou encore aérien.

[0003] Les techniques traditionnelles d'isolation ou d'absorption acoustique mettent en jeu des propriétés ou lois physiques bien connues comme les effets d'inertie mécanique (loi de masse-densité), les effets d'amortissement viscoélastique, les cavités rayonnantes et/ou absorbantes. Une description simplifiée est présentée ci-dessous au § 1.

[0004] Ces techniques d'isolation acoustique requièrent généralement une étanchéité à l'air maximale qui va souvent à l'encontre du confort sanitaire ou encore hygrothermique (conditionnement d'air). Toutefois, une exception à cette règle dans les domaines du conditionnement d'air ou des échangeurs de chaleurs est la mise en oeuvre de lentilles acoustiques qui permettent de séparer les trajectoires du flux d'air et du flux acoustique afin de n'absorber que ce dernier. Il est important de signaler que la lentille acoustique travaille par réfraction et de ce fait le son doit être atténué dans l'espace de réception (voir § 1.3).

[0005] Comme expliqué plus loin (voir § 2), le recours à un matériau artificiel structuré périodiquement, appelé *crystal phononique*, est une technique d'isolation acoustique qui, à notre connaissance, n'a jamais été exploitée industriellement. Le cristal phononique est un dispositif acoustique qui permet, sous certaines conditions, de séparer un flux d'air et un flux acoustique, à l'instar de la lentille acoustique. Ici, la différence notable est que le flux acoustique est fortement réfléchi vers l'espace d'émission.

[0006] Enfin, il faut signaler la possibilité de contrôler activement le niveau de pression acoustique en un endroit donné d'un espace en faisant interférer une onde acoustique incidente et une onde générée en opposition de phase (WO-A-89 03472, JP-A-08 069 286, SU-A-1 629 576, US-A-4 887 692, JP-A-11 093 670). L'interférence de ces deux ondes engendre l'annihilation de l'onde gênante. Ce type de problématique sort du cadre de cette invention et reste aussi assez difficile à mettre en oeuvre pour le contrôle acoustique dans une zone éten-

due de l'espace de réception (ce qui est précisément recherché en isolation acoustique).

1. Etat de la technique dans le domaine de l'isolation et de l'absorption en traitement acoustique

[0007] En terme de techniques classiques d'isolation acoustique, on distingue trois cas :

- 10 - les parois simples ;
- les parois doubles ;
- les techniques de correction/absorption acoustique.

15 1.1 Isolement acoustique par parois simples

[0008] Dans le cas d'une paroi simple (un seul matériau homogène) rigide et indéformable, la paroi se comporte alors comme un piston mobile indéformable. L'indice d'affaiblissement acoustique R (exprimé en dB) correspondant n'est fonction que de la masse surfacique, de la fréquence et de l'angle d'attaque de l'onde incidente. Il est donné par la loi de masse-densité qui s'exprime comme suit :

$$R=10.\log\left(\frac{\pi m v .\cos\theta}{\rho_0 .c}\right)^2$$

30 où m est la masse surfacique, v la fréquence de l'onde incidente, θ l'angle d'incidence mesuré par rapport à la normale à la paroi, c la vitesse de propagation du son et ρ_0 la densité de l'air. Typiquement, R augmente de 6 dB par octave ou par doublement de m et diminue de manière monotone en fonction de θ .

[0009] Dans le cas d'une paroi simple rigide mais poreuse, la loi de masse-densité reste valable mais la porosité influence l'indice d'affaiblissement acoustique à haute fréquence.

40 [0010] Dans le cas réel d'une paroi simple homogène mais déformable élastiquement, on peut considérer que la plaque entre en vibration sous l'effet de l'onde de pression incidente qui peut être décrite comme la superposition de modes normaux de flexion. Pour une paroi d'épaisseur h, constituée d'un matériau de masse volumique ρ , de module d'élasticité E et de coefficient de Poisson η , la fréquence critique fondamentale est donnée par l'expression suivante :

$$v_c = \frac{c^2}{2\pi .h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\eta^2)}{E}}$$

50 Lorsque la fréquence v de l'onde incidente correspond à v_c (phénomène de coïncidence), la paroi vibre à une amplitude maximale. L'indice d'affaiblissement acoustique s'en trouve fortement réduit, suite à l'excitation du mode propre et l'amplitude de vibration est fonction du

facteur de perte. Pour $v < v_c$, la paroi se comporte comme une paroi rigide (6 dB/octave) mais pour $v > v_c$, l'indice d'affaiblissement acoustique croît alors de 9 dB/octave. Pour que le phénomène de coïncidence soit utile, il est nécessaire d'obtenir une fréquence critique aussi basse que possible (par exemple en augmentant l'épaisseur h).

1.2 Isolement acoustique par parois doubles

[0011] Une paroi double est une paroi constituée de deux parois simples couplées mécaniquement par un matériau purement élastique (cavité). Dans ce cas, le système présente une fréquence propre qui peut s'exprimer comme :

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}$$

où $k = \frac{E}{h}$ est la constante de rigidité du matériau élastique, h l'épaisseur de la cavité, m_1 et m_2 les masses surfaciques des deux parements. Pour $v < v_0$, l'indice d'affaiblissement de la paroi est alors donné par la loi de masse-densité d'une paroi simple de masse surfacique égale à $m_1 + m_2$. Pour $v > v_0$, l'indice d'affaiblissement croît alors de 18 dB/octave. L'obtention d'une fréquence propre pour des parois lourdes est assez aisée. Par contre, lorsqu'il s'agit de parois légères, il est généralement nécessaire de choisir une épaisseur h importante.

[0012] La réflexion sur la paroi 2 des ondes acoustiques transmises par la paroi 1 est susceptible de créer des ondes stationnaires pour des fréquences v_n égales à :

$$v_n = n \cdot \frac{c}{2h}$$

Il faut donc un peu déchanter car la paroi double peut rayonner au travers des modes propres de la cavité avec pour conséquence une réduction significative de l'indice d'affaiblissement acoustique (12 dB/octave contre 18 dB/octave). Ce phénomène peut être atténué par un non parallélisme des parois ou encore par l'ajout d'un matériau absorbant dans la cavité.

1.3 Isolement/correction acoustique par absorption

[0013] Il est possible de diminuer la durée de réverbération d'un local en absorbant rapidement l'énergie acoustique injectée dans la salle de réception. Ce phénomène est recherché pour améliorer l'intelligibilité de l'écoute (parole ou musique). Toutefois, il est également possible d'utiliser ces techniques, dites de correction acoustique (espace d'émission = espace de réception),

pour faire de l'isolement acoustique. On connaît deux techniques particulières :

- les résonateurs de Helmholtz ;
- les lentilles acoustiques (JP-A-62 277 044, JP-A-04 173 420, JP-A-04 173 426, JP-A-02 267 433).

[0014] Un résonateur de Helmholtz peut être considéré comme un résonateur mécanique en forme de bouteille dont le corps est de volume V et dont le col est de longueur l et de section S . Dans ce cas, la fréquence de résonance de la bouteille est donnée par la relation :

$$v_{\text{réson.}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}}$$

où c est la vitesse du son dans l'air.

[0015] Lorsque $v = v_{\text{réson.}}$, le résonateur vide vibre et restitue plus longtemps l'énergie acoustique correspondant à la fréquence de résonance (réverbération). Lorsque le résonateur est rempli d'un matériau absorbant, on a par contre une absorption maximale à cette fréquence (correction acoustique). En pratique, on utilise une cavité fermée par un panneau perforé qui n'est autre qu'un ensemble d'oscillateurs de Helmholtz mis en parallèle. Ce type de panneau peut aussi être utilisé pour faire de l'isolement acoustique.

[0016] Une lentille acoustique est aussi un dispositif qui peut être utilisé pour faciliter l'intelligibilité de la parole en milieu bruyant mais aussi pour réellement faire de l'isolement acoustique lorsque des échanges d'air doivent être réalisés entre l'espace d'émission et de réception du son. En effet, la lentille est constituée d'un réflecteur acoustique interférentiel comprenant des lamelles de métal et d'air mises en forme selon une forme "optique" comme une lentille plan convexe ou biconvexe. De par sa forme, la lentille acoustique permet de focaliser le flux acoustique au foyer de la lentille. Il est aisé de comprendre qu'au foyer, l'intelligibilité d'un son émis peut se trouver améliorée car le niveau sonore utile est simplement augmenté par rapport au bruit de fond.

[0017] La lentille acoustique trouve également une utilité dans le domaine d'écrans acoustiques perméables au passage de l'air (conditionnement et purification de l'air). En effet, une onde acoustique, étant une onde de pression, est évidemment transportée par l'air. On peut montrer que l'utilisation d'une lentille acoustique asymétrique permet de séparer les trajectoires du flux d'air et du flux acoustique qui est réfracté et focalisé sur un matériau absorbant situé en dehors de l'axe de circulation du flux d'air. Il est donc utile de noter que la lentille agit alors plutôt comme une technique de correction acoustique dans l'espace de réception et non comme une technique d'isolement acoustique.

2. Etat de l'art scientifique dans le domaine de l'isolement acoustique par cristaux phononiques

[0018] Un matériau macroscopiquement homogène ne peut présenter des variations importantes dans le spectre de transmission des fréquences audibles. La raison profonde de cette "difficulté" doit être recherchée dans le fait que, dans cette région spectrale, les longueurs d'ondes varient avec la fréquence de manière strictement monotone et que la dispersion est complètement absente. La vitesse de propagation c est une constante, indépendante de la longueur d'onde ou de la fréquence :

$$\omega = kc = \frac{2\pi}{\lambda}$$

où ω ($\omega = 2\pi\nu$) est la pulsation, k est le nombre d'onde et λ est la longueur d'onde.

[0019] Cette relation est largement vérifiée pour tous les milieux homogènes, qu'ils apparaissent sous forme solide, liquide ou gazeuse. Le coefficient de proportionnalité est une des vitesses transverses ou longitudinale de propagation du son c . Une relation de dispersion aussi simple ne conduit qu'à des variations très lentes de la densité spectrale de modes ce qui n'offre que trop peu de marge pour ajuster l'opacité acoustique spectrale par un choix judicieux du matériau. L'épaisseur et la densité joueront toutefois leur rôle bien connu dans l'atténuation du son.

[0020] Dans la dernière décennie, on a pu voir se développer un intérêt croissant dans la recherche de matériaux artificiels présentant des propriétés physiques spéciales. Dans ce cadre, l'étude de la propagation des ondes sonores dans des structures élastiques hétérogènes a vu le jour. Elle présente un intérêt dans le contrôle de l'isolation et de l'absorption acoustique.

[0021] Pour faire apparaître une dispersion et permettre une modulation de la réflectance et de la transmission, il est nécessaire d'introduire des inhomogénéités d'extension spatiale déterminée et distribuées périodiquement selon un réseau à deux ou trois dimensions. La structure obtenue est appelée *cristal phononique*. L'introduction périodique judicieuse d'inhomogénéités (motifs) a pour conséquence d'engendrer la dispersion des ondes se propageant dans la structure et, pour certaines gammes de fréquences, de créer des interférences destructives. Le spectre des modes élastiques peut donc présenter une ou plusieurs bandes de fréquence dans le domaine acoustique pour lesquelles il n'existe pas de mode de vibration propre qui puisse participer à la propagation du son [M.M. SIGALAS et E.N. ECONOMOU, Elastic and acoustic wave band structure, *Journal of Sound and Vibration* **158**, p.377 (1992) ; A.A. RUFFA, Acoustic wave propagation through periodic bubbly liquids, *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, p.1 (1992)].

[0022] On parle alors de largeur de bande interdite acoustique et on utilise aussi la terminologie anglaise

de "gap" acoustique. Ainsi, une onde incidente de fréquence comprise dans cette bande interdite doit être réfléchiée et s'éteindre exponentiellement dans le cristal, laissant, après une profondeur suffisante, une amplitude négligeable. L'atténuation qui en résulte est remarquable. Le cristal devient donc un filtre acoustique en mode réflexion dans différentes plages fréquentielles qui peuvent être sélectionnées par un choix judicieux de la périodicité de l'assemblage.

[0023] Il y a donc un intérêt particulier à agencer périodiquement et de manière judicieuse certains matériaux afin de faire apparaître ces gaps interdisant le transport de l'énergie acoustique. Un gap de large bande, idéalement une largeur de bande interdite s'étendant à tout le spectre audible ou pour toutes les incidences, est évidemment une propriété spectrale tout à fait spectaculaire, qui ne peut être remplie que pour certaines conditions spécifiques. Pour un tel cristal, le choix des distributions spatiales de la masse volumique, des vitesses de propagation transverses et longitudinales, de la symétrie, de la topologie et du facteur de remplissage des motifs dans la maille élémentaire devront être adaptés spécifiquement en relation avec les longueurs d'ondes mises en jeu.

[0024] A notre connaissance, seul le document EP-A-375 549 met en évidence l'utilité pratique d'une distribution périodique ou non de matériaux élastiquement différents. Ce document divulgue un appareil pour effectuer des sondages acoustiques dans des formations géologiques souterraines accessibles via un puits de forage. Cet appareil présente un corps longitudinal portant un émetteur et un récepteur acoustiques travaillant à une fréquence déterminée. Ledit corps présente entre l'émetteur et le récepteur un réseau périodique de discontinuités qui causent des interférences multiples permettant d'atténuer l'énergie des ondes acoustiques se propageant le long du corps à la fréquence considérée. Le dispositif décrit ne permet cependant pas d'être employé comme filtre sonore. En effet, de par sa conception, les ondes se propagent le long d'un long cylindre d'acier, ce qui rend inexploitable cette invention en terme de cloison d'isolation. Plusieurs paramètres comme l'ajustement de la distribution des trous ou l'ajustement des contrastes de grandeurs élastiques dans le système n'y ont d'ailleurs pas non plus été exploités.

Buts de l'invention

[0025] La présente invention vise à fournir une solution permettant de s'affranchir des inconvénients de l'état de la technique.

[0026] La présente invention vise en particulier à l'utilisation de structures pour la réalisation de parois de séparation destinées à protéger l'environnement, des habitations ou des immeubles destinés à recevoir du public contre les nuisances acoustiques d'une source de bruit située dans la même région de l'espace (absorp-

tion ou correction acoustique) ou dans la région complémentaire de l'espace (isolation acoustique), délimitées par ladite structure. Les structures visées par cette invention peuvent aussi concerner les enveloppes ou capotages isolant spatialement une source de bruit ou encore un volume à protéger.

[0027] L'invention vise encore à proposer des parois ou enveloppes pouvant avoir différentes fonctionnalités telles qu'à titre d'exemple :

- une fonction d'isolation acoustique entre deux espaces (émission et réception du son) ou de correction ou d'absorption acoustique (dans le même espace) apportée par la répétition périodique de motifs géométriques constitués de matériaux divers ;
- une fonction de séparation étanche ou non (conditionnement d'air ou évacuation/traitement de polluants) entre deux espaces ;
- une fonction structurale éventuelle lorsque les parois participent au support d'autres parois adjacentes, au support de personnes, de mobilier, de marchandises ou de véhicules ;
- une fonction esthétique ;
- une fonction sécurité (anti-effraction).

[0028] Il est entendu que les parois ou cloisons basées sur cette invention doivent aussi être compatibles avec les impératifs techniques et de sécurité en usage dans le secteur de la construction afin de proposer un produit qui puisse être mis en oeuvre par l'homme de métier.

Résumé de l'invention

[0029] L'objet de la présente invention consiste à proposer un principe constructif permettant de réaliser des dispositifs à isolement et/ou absorption acoustique élevés, dans le domaine audible (entre 15 Hz et 20 kHz et de préférence entre 100 et 5000 Hz), basés sur la répétition périodique bidimensionnelle, au sein d'un milieu de base, d'une cellule de base, contenant au moins un motif géométrique anguleux, lui même constitué d'au moins deux côtés. Lesdits dispositifs sont de plus caractérisés par un choix judicieux de la juxtaposition de matériaux d'impédances acoustiques (c.-à-d. de densités et/ou de vitesses de propagation des ondes) fort contrastées.

[0030] Il est bon de noter que le type de structures qui est proposé dans la présente invention autorise aussi l'utilisation de matériaux absorbants (matériaux poreux, fibreux,...) qui peuvent être placés dans les "cristaux", en remplaçant totalement ou partiellement le milieu de base dans les espaces entre les motifs, afin d'augmenter encore l'isolement acoustique de la structure par absorption. Toute modification en terme de nature de l'absorbant apportée aux cristaux originaux présentés dans cette invention ne constituerait en rien une innovation.

[0031] Avantagusement, le motif anguleux est cons-

titué par une cornière à lèvres égales ou inégales, un profilé, de préférence H,I,U ou C, un bardage, un tube, un tube épais ou une barre creuse ou pleine de section polygonale.

[0032] Nous présentons maintenant trois familles de formes d'exécution préférées de ces dispositifs selon l'invention, qui répondent aux critères mentionnés ci-dessus : (a) périodicité, (b) hauts contrastes d'impédances acoustiques (contrastes de densités et/ou de vitesses de propagation) et (c) un motif géométrique anguleux à au moins deux côtés.

Description des figures

[0033] La figure 1 représente schématiquement un assemblage possible d'un premier panneau périodique. Il consiste en un ensemble de barres d'acier à section carrée disposées selon un réseau carré simple. Le côté des barres est donné par b sur la vue de droite et la périodicité du réseau est donnée par a sur la même vue. A gauche de la figure, une perspective donne le système de barres alignées par rapport au réseau. Au milieu, un angle de rotation θ de 30 degrés est atteint. Cette rotation permet d'ajuster à souhait la largeur du gap (voir figure 2).

[0034] La figure 2 présente en haut une évolution des fréquences délimitant le premier gap dans l'exemple décrit à la figure 1 en fonction de l'angle de rotation. Dans ce cas, la périodicité est de 10 cm et le côté des barres est de 7 cm. Plus l'angle de rotation est important et plus le gap s'élargit. En bas, une abaque représente la largeur réduite du gap en fonction de l'angle de rotation pour différents facteurs de remplissage f. Dans ces exemples, la périodicité est de 10 cm. Les paramètres élastiques utilisés dans les calculs pour les différents matériaux sont la densité (ρ), la vitesse longitudinale (c_l) et la vitesse transverse (c_t) :

$\rho_{\text{air}} = 1 \text{ kgm}^{-3}$, $c_{l,\text{air}} = 340 \text{ ms}^{-1}$, $c_{t,\text{air}} = 0 \text{ ms}^{-1}$;
 $\rho_{\text{acier}} = 7800 \text{ kgm}^{-3}$, $c_{l,\text{acier}} = 5050 \text{ ms}^{-1}$, $c_{t,\text{acier}} = 3080 \text{ ms}^{-1}$.

[0035] La figure 3 représente schématiquement un assemblage de tôles profilées en acier (ou bardages) mises côte à côte de manière à former des cavités d'air isolées qui se répètent périodiquement. Le réseau périodique est un réseau rectangle centré. L'incidence des ondes sera supposée perpendiculaire à la direction uniforme. Pour ce système particulier, chaque tôle possède une périodicité latérale de 183 mm, une hauteur de 20 mm et une épaisseur de 2mm.

[0036] La figure 4 représente à gauche, le spectre de transmission théorique d'un paquet d'ondes traversant un assemblage de trois périodes du réseau centré de tôles décrit à la figure 3. La transmission à travers une tôle pleine contenant la même masse d'acier est ajoutée en pointillés. Une amélioration de l'atténuation est nettement visible sur une large plage fréquentielle à basse fréquence. A droite de la figure, le même calcul a été effectué en considérant le remplissage partiel des al-

véoles les plus grandes par un matériau de type plâtre ou béton. On note une nette amélioration pour des fréquences inférieures à 500 Hz. A nouveau la comparaison avec un panneau homogène dont les caractéristiques élastiques sont obtenues en pondérant la contribution de l'acier et du plâtre est tracée.

Paramètres du plâtre : $\rho_{pl} = 900 \text{ kgm}^{-3}$, $c_{l,pl} = 1600 \text{ ms}^{-1}$, $c_{t,pl} = 1300 \text{ ms}^{-1}$.

[0037] La figure 5 représente schématiquement une vue aérienne d'une structure périodique bidimensionnelle composée de barres d'acier pleines de 8 mm de côté (en blanc), enrobées d'un polymère (en gris foncé sur le dessin) de 2 mm d'épaisseur et disposées dans une matrice d'époxy (gris clair) selon un réseau carré de 13 mm.

[0038] La figure 6 représente un spectre de transmission théorique à travers quatre périodes d'un assemblage tel que décrit à la figure 5. De nettes coupures dans la transmission sont visibles à très basse fréquence. A nouveau, une comparaison avec un panneau uniforme de densité et vitesses effectives calculées comme une moyenne pondérée de celles de l'acier et du polymère est donnée. L'amélioration de l'atténuation est à nouveau très nette.

Paramètres de l'époxy : $\rho_{epoxy} = 1180 \text{ kgm}^{-3}$, $c_{l,epoxy} = 2535 \text{ ms}^{-1}$, $c_{t,epoxy} = 1157 \text{ ms}^{-1}$. Paramètres du polymère : $\rho_{poly} = 1300 \text{ kgm}^{-3}$, $c_{l,poly} = 25 \text{ ms}^{-1}$, $c_{t,poly} = 6 \text{ ms}^{-1}$.

Description de plusieurs formes d'exécution préférées de l'invention

1. Dispositifs perméables à l'air selon la direction salle d'émission / salle de réception - Assemblage périodique de motifs isolés à haut contraste de densités

1.1 Description générale

[0039] La première famille de dispositifs est caractérisée par tout type d'agencement périodique de motifs anguleux de haute densité et à au moins deux côtés (cornières L, tubes carrés ou rectangulaires, ...), isolés les uns par rapport aux autres selon un réseau de Bravais bidimensionnel (symétrie carrée, rectangulaire, hexagonale, ...), qu'il soit centré ou non.

- Choix des dimensions caractéristiques

[0040] La connaissance des milieux périodiques permet de prédire la fréquence médiane du premier gap (sur l'échelle des fréquences) grâce à une loi d'échelle empirique reliée à la période de répétition du motif (normes des vecteurs de base désignées par a et a'), à la symétrie du réseau (via α , d'ordre de grandeur voisin de l'unité) et à la vitesse c de propagation des ondes dans le milieu de base :

$$v = a \cdot \frac{c}{\left[\frac{(\alpha + \alpha')}{2} \right]}$$

[0041] Cette loi indique que plus la période de répétition du motif est grande et plus la fréquence sera faible. Augmenter la taille du système complet d'un facteur deux aura pour conséquence le déplacement du gap à des fréquences deux fois plus basses. Il faut cependant remarquer que cette augmentation de a ou de a' doit s'accompagner proportionnellement d'une augmentation de la taille des motifs afin de conserver un même facteur de remplissage f , défini par le rapport de la surface occupée par le motif à la surface de la maille. En effet, la largeur du gap acoustique et f sont intimement liés (voir exemple ci-dessous).

[0042] Cette loi nous indique aussi que plus le milieu de base possède une vitesse de propagation faible et plus le gap sera localisé à basse fréquence. Les gaz (air, hydrogène, azote, ...) sont en général les matériaux idéaux.

- Choix des matériaux

[0043] La nature des matériaux retenus pour la fabrication de ces dispositifs est très importante. Les motifs doivent présenter un très grand contraste de densités avec le milieu ou matériau de base qui est dans le cas présent un gaz comme par exemple l'air, l'azote, l'hydrogène, l'argon, le CO_2 , etc. Ces matériaux peuvent être solides ou même liquides (s'ils sont bien entendu supportés par une structure enveloppe solide) et de manière avantageuse être choisis pour autant qu'ils aient une densité supérieure à 1000 kg.m^{-3} environ. A titre d'exemple, on peut citer les métaux (fer, acier, aluminium, mercure, plomb, ...) et leurs alliages, les verres, les bétons, les plâtres, les polymères, les bois, les céramiques, etc. Comme liquide, citons notamment l'eau ou l'huile, voire les gels. Outre l'intérêt dans le domaine de l'acoustique et leur propriétés de conductivité thermique, des métaux comme par exemple l'acier ou l'aluminium possèdent une rigidité mécanique qui autorise également l'utilisation d'un panneau comme élément structurel.

- Motifs pleins ou creux - Choix de l'épaisseur

[0044] Les motifs fermés peuvent être pleins ou creux. Dans ce dernier cas, une épaisseur suffisante permet d'assimiler le comportement d'un motif creux et d'un motif plein, ce qui présente un avantage économique et un allègement du dispositif. A titre d'exemple, une épaisseur critique de 2 mm d'acier est suffisante. Une alternative est de remplacer l'air contenu dans les inclusions par un matériau bon marché de haute densité.

- Nombre de périodes

[0045] Le nombre de périodes constituant le panneau, dans la direction de propagation du son, joue un rôle déterminant dans la valeur de l'atténuation au sein d'un gap. Plus ce nombre augmente et plus le gap devient profond. L'atténuation devient presque parfaite. L'emploi de moins de 10 périodes, de préférence trois à cinq périodes, semble être un compromis raisonnable dans l'optimisation du problème atténuation-compacité.

1.2 EXEMPLE 1 : réseau carré et motifs à section carrée (a = a') - système air/acier.

[0046] La figure 1 représente une illustration de la première famille envisagée. Il s'agit d'un ensemble de rangées périodiques (trois sur le schéma) de barres d'acier à section carrée disposées dans l'air selon un réseau carré. La périodicité du réseau, c.-à-d. la distance centre à centre entre les barres, est donnée par la grandeur a sur le croquis de la figure 1 et le côté des barres par b sur le même croquis. L'orientation des barres par rapport au réseau bidimensionnel carré est donnée par l'angle θ sur la figure 1.

[0047] Une étude de la transmission d'un paquet d'ondes à incidence normale à travers une telle structure montre l'apparition de plusieurs gaps. Par la loi d'échelle introduite ci-dessus, nous pouvons comprendre que le premier gap d'un système possédant une période de 10 cm sera centré sur la fréquence de :

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{340}{0.1} = 1700 \text{ Hz,}$$

le facteur α étant estimé à un demi pour ce système et la vitesse du son dans l'air étant de 340 ms^{-1} .

[0048] Cependant, la largeur du gap dépend fortement de l'angle d'orientation du motif anguleux par rapport au réseau. La figure 2 (en haut) montre l'évolution des fréquences délimitant le gap en fonction de l'angle de rotation pour un système de 10 cm de période et des barres de 7 cm de côté. Plus l'angle de rotation θ augmente et plus le gap s'élargit.

[0049] L'explication de cet effet repose sur des considérations géométriques. Le contraste d'impédances acoustiques entre l'acier et l'air est si grand que les ondes sont naturellement réfléchies sur les barres. A zéro degré, l'espace libre laissé entre les barres est tellement grand que les ondes peuvent se propager dans la structure sans être arrêtées par les barres réfléchissantes. Plus l'angle augmente et plus des réflexions multiples sur les barres vont être obtenues dans la structure. Ces réflexions, multidirectionnelles, engendrent des interférences destructives de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'angle augmente, d'où l'ouverture d'un gap de plus en plus large dans la structure périodique.

[0050] Notons que, sur la même figure, la fréquence médiane du gap se situe bien aux alentours de 1700 Hz

comme prévu par la loi d'échelle (environ 10% d'erreur). Augmenter la taille du système complet d'un facteur deux (système de 20 cm de période et barres de 14 cm de côté) aura pour conséquence le déplacement du gap à des fréquences deux fois plus basses, avec une fréquence médiane située à 850 Hz. Bien que cette diminution de la fréquence du gap soit intéressante, la structure ainsi formée devient alors très encombrante puisque son épaisseur a doublé.

[0051] Une abaque destinée à l'homme de métier est présentée à la figure 2 (en bas). Elle présente l'évolution de la largeur réduite du gap, définie comme le rapport de la largeur du gap à sa fréquence médiane, en fonction de l'angle de rotation ainsi que du facteur de remplissage f valant dans ce cas particulier par le rapport b^2/a^2 (a valant 10 cm dans les exemples).

[0052] Notons que pour des facteurs de remplissage supérieur à 0.5, il existe un angle critique au-delà duquel les barres rentrent en contact. Dans ce cas les inclusions ne sont plus isolées ce qui gêne considérablement la fabrication. C'est pourquoi les courbes ne sont plus dessinées au-delà de cet angle (θ_c) défini par la loi suivante :

$$\cos\theta_c = \sqrt{f}$$

1.3 Avantages et inconvénients

[0053] Un avantage des cristaux phononiques non remplis par un *filler* est la perméabilité à l'air et l'imperméabilité au son. Il s'agit d'une caractéristique tout à fait particulière de l'invention qui permet de constituer des parois facilitant l'évacuation de calories (échangeurs de chaleur) et de polluants (aération et confort hygrothermique) tout en étant imperméables au son. Dans ce cadre d'application, il faut à nouveau signaler l'existence de dispositifs appelés "lentilles acoustiques" qui ne sont pas imperméables au son mais qui réfractent le flux acoustique en laissant inchangé le flux d'air.

[0054] Pour le cas des structures perméables à l'air, la présente invention autorise donc la possibilité de réaliser des échanges d'air entre les deux espaces séparés ainsi que des échanges thermiques dans l'air traversant la structure (systèmes à échangeur). Pour cette dernière application, l'utilisation de motifs métalliques comme, par exemple l'acier ou l'aluminium qui possèdent une conductivité thermique élevée, est particulièrement intéressante.

[0055] Un autre avantage remarquable et propre aux structures perméables à motifs anguleux est d'autoriser une ajustabilité de la largeur du gap acoustique contrôlable aisément par simple rotation des motifs autour de leur axe de symétries sans devoir changer le système initial d'inclusions. L'exemple 1 en est une illustration.

[0056] Toutefois, pour des dimensions caractéristiques raisonnables (période de plusieurs centimètres), ce type de cristal permet d'obtenir des gaps acoustiques

situés dans les moyennes et hautes fréquences de la gamme audible (typiquement 1000-5000 Hz).

2. Dispositifs non perméables à l'air - Assemblage périodique de motifs reliés ou imbriqués à haut contraste de densités

2.1 Description générale

[0057] La seconde famille de dispositifs est caractérisée par tout type d'agencement périodique de motifs anguleux de haute densité et à au moins deux côtés (cornières L, tubes carrés ou rectangulaires, ...) selon un réseau de Bravais bidimensionnel (symétrie carrée, rectangulaire, hexagonale, ...), qu'il soit centré ou non. Les motifs seront reliés entre eux de manière à former des cavités ou alvéoles isolant le milieu de base. L'avantage d'un grand contraste de densités a déjà été suggéré dans l'exemple précédent. De plus, si ce contraste est bien adapté, on voit qu'il permet de créer des gaps à des fréquences nettement plus basses que celles trouvées ci-dessus. Par des considérations géométriques semblables à celles présentées supra, il sera plus favorable pour l'apparition d'un large gap d'isoler des cavités de basse densité (ici de l'air) dans une matrice solide (ici l'acier). Les ondes vont être confinées principalement dans ces cavités, ce qui se traduit par une transmission très sélective en fréquence. De plus, les gaps, établis entre ces transmissions sélectives, permettront une isolation à très basse fréquence.

- Choix des dimensions caractéristiques

[0058] Ici également, la fréquence médiane du premier gap peut être obtenue avec la même loi d'échelle empirique décrite pour la famille 1 de prototypes (voir aussi les conclusions s'y référant).

- Choix des matériaux

[0059] Ici également, les motifs doivent être choisis avec les mêmes critères que pour la famille 1.

- Motifs pleins ou creux

[0060] Les motifs fermés peuvent être pleins ou creux. Il peut être intéressant de remplir certaines alvéoles afin de modifier le phénomène de réflexion multiple mais aussi les propriétés d'élasticité de la structure. Ceci est illustré dans l'exemple 2.

- Nombre de périodes

[0061] Mêmes remarques que pour le cas de la famille 1.

2.2 EXEMPLE 2 : réseau rectangle centré à motifs alvéolaires obtenus en assemblant des bardages d'acier

dans de l'air (2.2.1) et/ou en remplissant partiellement certaines alvéoles au moyen d'un filler (2.2.2)

2.2.1

[0062] La figure 3 illustre un assemblage possible de tôles profilées en acier mises côte à côte de manière à former des cavités isolées d'air qui se répètent périodiquement. Ces profilés existent déjà sur le marché, ce qui rend l'invention réalisable par l'homme de métier. Le réseau périodique est un réseau rectangle centré. L'épaisseur de chaque tôle est de 2 mm. Chacune d'elle possède une hauteur de 20 mm et une périodicité latérale de 183 mm. Deux périodes constituent le panneau dans ce schéma, ce qui implique que l'épaisseur totale du panneau est dans ce cas de 160 mm. Nous allons immédiatement montrer les avantages d'une telle conception. Notons que la périodicité latérale peut être sensiblement différente. La même remarque peut s'appliquer à la périodicité dans le sens de l'épaisseur mais par souci de compacité, une valeur maximale de 20 mm semble indiquée.

[0063] La figure 4 montre les résultats théoriques de la transmission calculée pour un assemblage de trois périodes (partie gauche). Un très large gap à basse fréquence s'étend de 500 à 2500 Hz. La comparaison avec une tôle d'acier pleine d'une masse équivalente traduit une forte atténuation relative au cas homogène dans ce gap (98 % à 1000 Hz). De plus, en dessous de ce gap, c.-à-d. en dessous de 500 Hz, une atténuation d'environ 90% à 400 Hz ou encore 80 % à 200 Hz est aussi trouvée. Pour des raisons de stabilité des calculs, on a placé un fluide de plus haute densité que l'air de part et d'autre du panneau, à savoir l'eau, et de ce fait, les effets liés à la périodicité ont pu être plus facilement mis en évidence.

2.2.2

[0064] En remplissant une partie des alvéoles par un matériau *filler* de type plâtre, béton, voire même acier, la céramique ou toute autre substance minérale, les polymères, etc., plus dense que le milieu de base de remplissage des alvéoles (ici par exemple de l'air), une atténuation nettement plus importante à des fréquences inférieures à 500 Hz est trouvée. Ceci devient donc une propriété remarquable pour l'isolation à basse fréquence. Le remplissage d'une partie des alvéoles par le matériau *filler* doit cependant être réalisé de manière périodique dans le réseau. Les résultats sont présentés sur la partie droite de la figure 4. A nouveau, la transmission à travers un panneau homogène dont les caractéristiques élastiques sont obtenues par pondération entre le *filler*, ici du plâtre, et l'acier est tracée. La comparaison montre la grande performance de l'isolation du système périodique à basse fréquence selon l'invention.

2.3 Avantages et inconvénients

[0065] Les structures imperméables possèdent un avantage inaccessible aux structures perméables à l'air, à savoir la possibilité d'obtenir des transmissions très faibles aux plus basses fréquences du domaine audible pour des épaisseurs de parois ou enveloppes plus réduites. Ce type de structure est facile à réaliser mais reste encore relativement encombrant.

3. Dispositifs non perméables à l'air - Assemblage périodique de motifs isolés à haut contraste de vitesses

3.1 Description générale

[0066] La troisième famille de dispositifs est aussi caractérisée par tout type d'agencement périodique de motifs anguleux de haute densité, de préférence solides, et à au moins deux côtés (cornières L, tubes carrés ou rectangulaires, ...) dans une matrice solide (*filler*) de plus basse densité, selon un réseau de Bravais bidimensionnel (structure carrée, rectangulaire, hexagonale, ...), qu'il soit centré ou non. Les motifs sont enrobés d'une épaisseur plus ou moins grande de polymère présentant des vitesses de propagation très faibles en comparaison avec les inclusions (motifs) et le filler, ce qui garantit un haut contraste de vitesses au sein du système. Ce polymère pourrait en soi aussi constituer le filler.

[0067] Par l'exemple 1, il est aisé de comprendre que l'emploi d'un matériau solide entourant les inclusions solides isolées va induire l'existence d'un gap à des fréquences nettement plus élevées puisque la vitesse de propagation des ondes dans les solides est importante (loi d'échelle). Une solution immédiate à ce problème est d'utiliser un polymère possédant une très basse vitesse de propagation (inférieure à 100 ms^{-1}) comme matériau de base. On peut alors obtenir des gaps à très basses fréquences tout en conservant des systèmes de faibles tailles. Cependant cette solution peut s'avérer dans certains cas onéreuse puisqu'une grande quantité de polymère sera nécessaire.

[0068] Pour des raisons de prix de revient des dispositifs acoustiques de cette famille, on propose également de remplacer une partie du polymère par un matériau filler léger et rigide (dans cet exemple, l'époxy) et on montre comment un haut contraste de vitesse au sein d'un système solide composé de trois matériaux peut générer des coupures à des basses fréquences tout en gardant un système compact.

- Choix des matériaux

[0069] La nature des matériaux retenus pour la fabrication de ces dispositifs est très importante. Les motifs ainsi que le filler doivent présenter des vitesses de propagation très grandes comparées à celle du polymère.

Tout matériau solide suffisamment dense pourrait donc constituer les motifs (acier, aluminium, plomb, ...). De la même manière tout matériau solide plus léger pourrait servir de matériau *filler* (l'époxy, béton allégé, plâtre, ...). Quant au polymère, il sera choisi de manière à présenter des vitesses faibles. On cite dans la littérature un matériau de vitesses très faibles ($< 100 \text{ ms}^{-1}$) [L. BOUSSE, E. DIJKSTRA et O. GUENAT, Technical Digest, Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, p.272 (1996)].

- Choix des dimensions caractéristiques.

[0070] Le changement de nature du polymère aura pour conséquence le changement de gamme de fréquence des coupures. Une augmentation de la vitesse transverse du polymère augmentera linéairement la gamme de fréquence. Il faudra alors dilater de manière homothétique le système en vue de revenir à une gamme similaire.

- Motifs pleins ou creux

[0071] Les motifs fermés doivent être pleins car le contraste de densités entre les éléments est insuffisant ici pour obtenir une réflexion totale des ondes à la surface des inclusions. Les ondes traverseront donc toute la structure.

- Nombre de périodes

[0072] Mêmes remarques que pour le cas des familles 1 et 2.

3.2 EXEMPLE 3 : réseau carré et motifs à section carrée enrobés d'un polymère. Système Epoxy/polymère/acier

[0073] La figure 5 donne une vue aérienne d'une structure périodique bidimensionnelle composée de barres d'acier carrées pleines de 8 mm de côté, enrobées d'un polymère de 6 ms^{-1} de vitesse transverse et de 23 ms^{-1} de vitesse longitudinale [L. BOUSSE *et al.*, *ibid.*] appliqué en 2 mm d'épaisseur. Les barres sont alors disposées dans une matrice époxy selon un réseau carré de 13 mm de période.

[0074] La transmission à travers quatre périodes d'un tel cristal est envisagée à la figure 6. Dans ce cas, une normalisation est effectuée par rapport au milieu de base, l'époxy, que nous supposons être de part et d'autre du panneau. Sur la même figure, la transmission acoustique calculée pour un panneau homogène dont les caractéristiques sont obtenues par moyenne pondérée des caractéristiques des éléments constituant le panneau est aussi tracée. Pour des fréquences très basses, une atténuation relative importante est obtenue : 60% à 550 Hz et 98% à 1600 Hz. On obtient donc des coupures à très basse fréquence avec un système très compact (ici environ 60 mm d'épaisseur). Ceci représente un

avantage considérable. Il vient essentiellement du fait qu'il existe une région localisée de l'espace ou la vitesse transverse est anormalement basse par rapport au reste du système : le polymère. Ceci se traduit par des résonances soit dans cette région soit dans les inclusions d'acier.

3.3 Avantages et inconvénients

[0075] Cette géométrie bidimensionnelle à base de trois matériaux possède l'avantage considérable de pouvoir obtenir une atténuation importante à très basse fréquence (typiquement 500 Hz) tout en conservant une épaisseur de parois de dimensions centimétriques.

[0076] Il existe plusieurs variantes intéressantes à ce système. Le fait d'introduire par exemple, selon un même réseau périodique, des barres ayant des formes différentes y compris cylindriques, à section polygonale ou ronde, des tailles différentes, des masses différentes ou étant enrobées d'une épaisseur différente de polymère ou encore des barres entourées de *fillers* différents, implique une modification des fréquences de résonances. Ceci a pour effet de multiplier le nombre de fréquences de coupure. Par exemple, la présence de deux types différents de barres engendrera une superposition des fréquences de coupure, ce qui permettra d'élargir les plages fréquentielles d'atténuation.

Revendications

1. Dispositif d'isolement et/ou de correction acoustique dans le domaine des ondes de fréquence audible, c'est-à-dire entre 15 Hz et 20 kHz, et de préférence comprise entre 100 et 5000 Hz, **caractérisé en ce qu'il** présente, au sein d'un milieu de base, une répétition périodique à deux dimensions d'une cellule de base, ladite cellule comprenant au moins un motif géométrique anguleux, ledit motif étant constitué d'au moins deux côtés, pour former une structure de matériaux juxtaposés présentant de forts contrastes d'impédances acoustiques, c'est-à-dire de densités et/ou de vitesses de propagation des ondes.
2. Dispositif selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les espaces entre les motifs constituant ladite structure sont entièrement ou partiellement remplis par un matériau absorbant acoustiquement, de préférence poreux ou fibreux, ledit matériau absorbant remplaçant entièrement ou partiellement le milieu de base.
3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le motif anguleux est constitué par une cornière à lèvres égales ou inégales, un profilé, de préférence H,I,U ou C, un bardage, un tube, un tube épais ou une barre creuse ou pleine de section po-

lygonale.

4. Dispositif selon la revendication 1, 2 ou 3, **caractérisé en ce qu'il** est perméable à l'air et qu'il comporte l'agencement, selon un réseau de Bravais, de motifs anguleux de haute densité, isolés les uns des autres.
5. Dispositif selon la revendication 1, 2 ou 3, **caractérisé en ce qu'il** est imperméable à l'air et qu'il comporte l'agencement de motifs anguleux de haute densité, selon un réseau de Bravais, lesdits motifs étant reliés entre eux de sorte à former des cavités ou alvéoles isolant le milieu de base.
6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le spectre de fréquences transmises par ledit dispositif présente au moins un gap acoustique dont la fréquence médiane est essentiellement donnée par une relation proportionnelle à la vitesse de propagation des ondes (c) dans le milieu de base et inversement proportionnelle à la somme des vecteurs de base du réseau périodique (a,a').
7. Dispositif selon la revendication 4, **caractérisé en ce qu'il** comprend un ensemble de barres d'acier de section carrée, disposées selon un réseau carré simple, qui peuvent être tournées d'un angle (θ) quelconque par rapport audit réseau.
8. Dispositif selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** la valeur dudit angle (θ) détermine la largeur dudit gap acoustique.
9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** ledit milieu de base possède une densité faible et est de préférence un gaz tel que l'air, l'hydrogène ou l'azote.
10. Dispositif selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** les alvéoles sont remplies d'un ou plusieurs gaz, de préférence l'air, l'azote, l'hydrogène, le dioxyde de carbone ou l'argon.
11. Dispositif selon la revendication 10, **caractérisé en ce qu'une** partie des alvéoles est remplie de manière périodique par un matériau filler, de préférence plus dense que le gaz constituant le milieu de base de remplissage des alvéoles.
12. Dispositif selon la revendication 11, **caractérisé en ce que** le matériau filler est sélectionné dans le groupe comprenant l'acier, le béton, le plâtre, la céramique, une autre substance minérale ou un polymère.

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 4 à 12, **caractérisé en ce que** le réseau de Bravais bidimensionnel est à symétrie carrée, rectangulaire ou hexagonale, centré ou non. 5
14. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 5 à 13, **caractérisé en ce que** ledit motif est fermé et plein ou creux, un motif creux étant de préférence rempli d'air ou d'une matière à densité supérieure à celle de l'air. 10
15. Dispositif selon la revendication 13 ou 14, **caractérisé en ce que**, dans la direction de propagation du son, le nombre de périodes du réseau est inférieur à 10 et de préférence compris entre 3 et 5. 15
16. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 4 à 15, **caractérisé en ce que** ledit motif de haute densité comprend un ou plusieurs matériaux, de nature solide, de préférence sélectionné(s) dans le groupe comprenant les métaux et leurs alliages, de préférence encore le fer, l'acier, l'aluminium, le mercure et le plomb, ainsi que le verre, le béton, le plâtre, la céramique, les minéraux, les polymères et le bois. 20
25
17. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 4 à 16, **caractérisé en ce que** ledit motif de haute densité comprend au moins un matériau liquide, supporté par une structure solide, de préférence un tube, et de préférence sélectionné dans le groupe comprenant l'eau, l'huile ou les gels. 30
18. Dispositif selon la revendication 5, **caractérisé en ce qu'il** est constitué de l'assemblage de bardages ou tôles profilées en acier dans l'air, disposées côte à côte de manière à former des cavités isolées d'air à répétition périodique, de préférence selon un réseau rectangle centré. 35
40
19. Dispositif selon la revendication 1, 2 ou 3, **caractérisé en ce qu'il** est imperméable à l'air et qu'il comporte l'agencement de motifs anguleux de haute densité, selon un réseau de Bravais bidimensionnel, lesdits motifs de haute densité étant isolés les uns par rapport aux autres et disposés dans une matrice solide (filler) de plus basse densité. 45
20. Dispositif selon la revendication 19, **caractérisé en ce que** lesdits motifs sont enrobés d'une épaisseur d'un polymère présentant une faible vitesse de propagation du son. 50
21. Dispositif selon la revendication 19 ou 20, **caractérisé en ce que** lesdits motifs sont pleins. 55
22. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 19 à 21, **caractérisé en ce qu'il** comprend une structure périodique bidimensionnelle, composée de barres d'acier pleines, de section polygonale ou ronde, enrobées d'un polymère et disposées dans une matrice époxy selon un réseau carré.
23. Dispositif selon la revendication 22, **caractérisé en ce que** lesdites barres d'acier peuvent présenter plusieurs formes ou tailles ou masses, ou encore peuvent être enrobées de différentes épaisseurs de polymère ou encore peuvent être entourées de fillers différents.

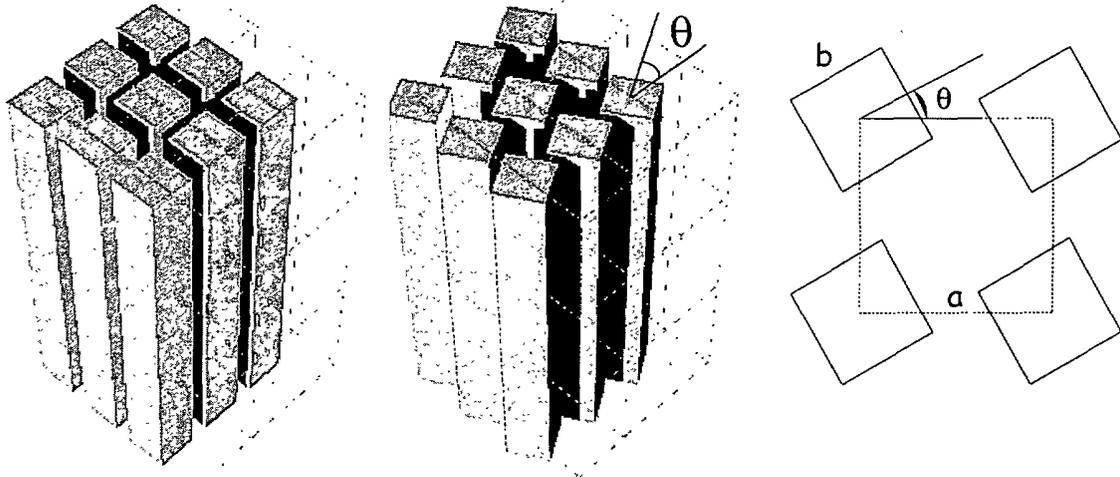


FIG. 1

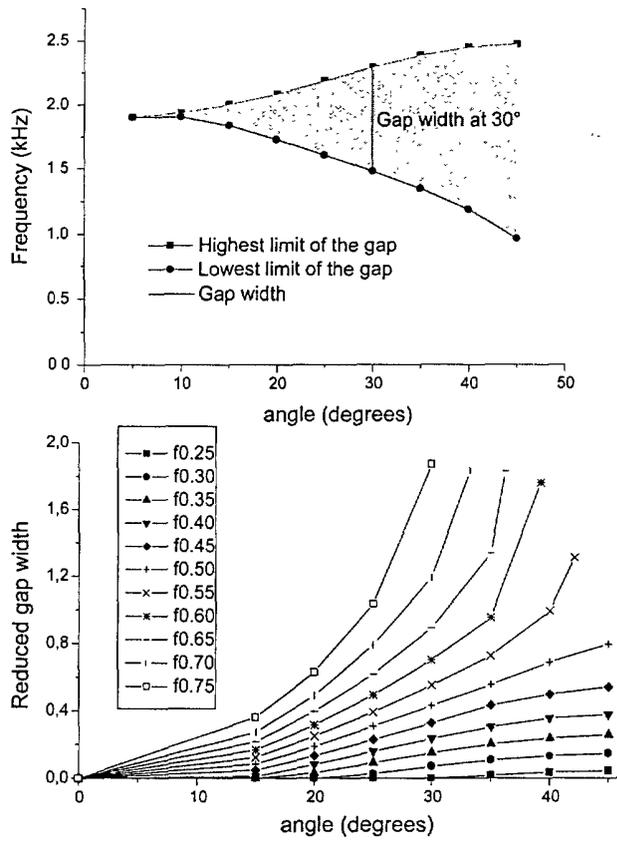


FIG. 2

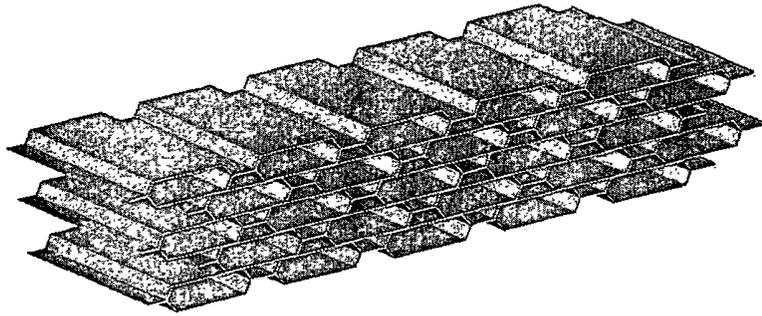


FIG. 3

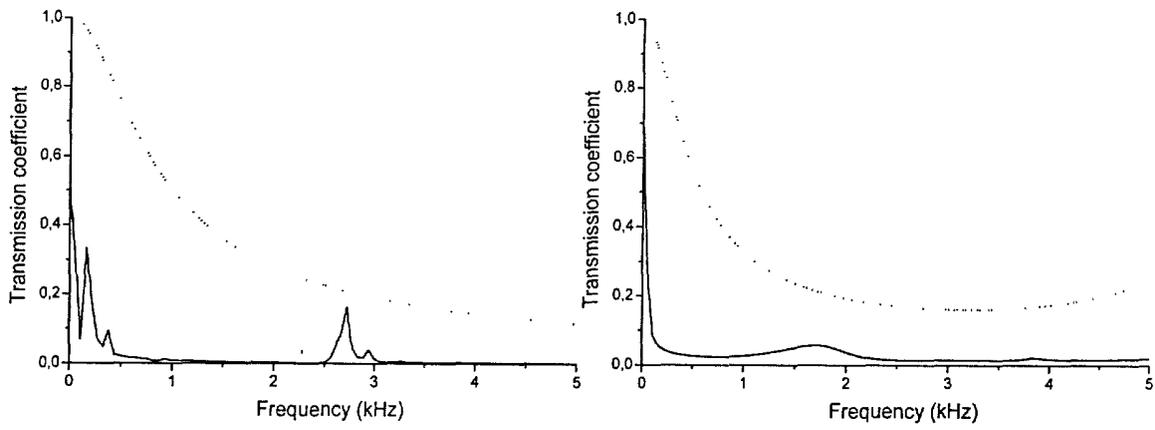


FIG. 4

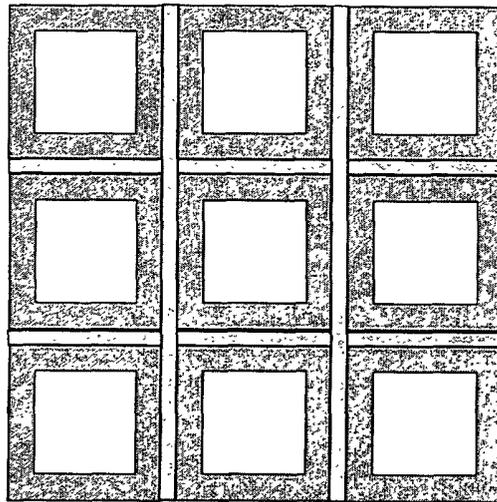


FIG. 5

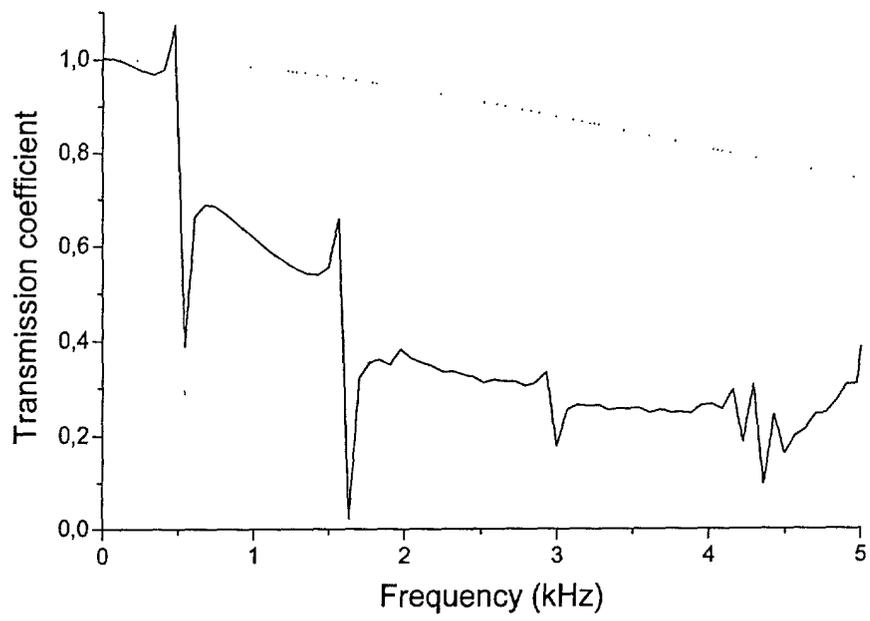


FIG. 6



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 01 87 0065

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.Cl.7)
X	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 015, no. 320 (P-1238), 15 août 1991 (1991-08-15) & JP 03 114099 A (NEC CORP), 15 mai 1991 (1991-05-15) * abrégé *	1-3,5,6, 13,14, 16,17, 19,21	G10K11/175 G10K11/16
A	FR 2 312 831 A (BRIDGESTONE TIRE CO LTD) 24 décembre 1976 (1976-12-24) * le document en entier *	1	
A	DE 38 25 626 A (KRUPP STAHL AG) 16 février 1989 (1989-02-16) * le document en entier *	1	
A	DE 37 07 650 C (FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT) 9 juin 1988 (1988-06-09) * le document en entier *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.7)
			G10K E04B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
LA HAYE		31 août 2001	Fordham, A
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
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			

EPO FORM 1503 03 B2 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 01 87 0065

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

31-08-2001

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 03114099 A	15-05-1991	AUCUN	
FR 2312831 A	24-12-1976	JP 1000161 C	30-05-1980
		JP 52099624 A	20-08-1977
		JP 54033644 B	22-10-1979
		JP 1006657 C	31-07-1980
		JP 52124716 A	20-10-1977
		JP 54042728 B	15-12-1979
		JP 1000139 C	30-05-1980
		JP 51141103 A	04-12-1976
		JP 54034966 B	30-10-1979
		JP 1183368 C	27-12-1983
		JP 51141106 A	04-12-1976
		JP 58017067 B	04-04-1983
		JP 960647 C	28-06-1979
		JP 51141424 A	06-12-1976
		JP 53042970 B	16-11-1978
		JP 975154 C	19-10-1979
		JP 52082301 A	09-07-1977
		JP 54004241 B	05-03-1979
		JP 52082302 A	09-07-1977
		JP 56013954 B	01-04-1981
		BR 7700953 A	18-10-1977
		DE 2624026 A	23-12-1976
		GB 1557778 A	12-12-1979
		GB 1560901 A	13-02-1980
		US 4069768 A	24-01-1978
DE 3825626 A	16-02-1989	AUCUN	
DE 3707650 C	09-06-1988	AUCUN	

EPO FORM P0480

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82