

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
25 novembre 2004 (25.11.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/102084 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : **F25B 9/14**

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2004/005483

(22) Date de dépôt international : 18 mai 2004 (18.05.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0305982 19 mai 2003 (19.05.2003) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) : **UNIVERSITE DU MAINE** [FR/FR]; Avenue Olivier Messiaen, F-72085 Le Mans (FR). **CENTRE NATIONAL DE**

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - CNRS [FR/FR]; 3, rue Michel-Ange, F-75016 Paris (FR). **ECOLE CENTRALE DE LYON** [FR/FR]; 36, Avenue Guy de Colongue, F-69134 Ecully (FR).

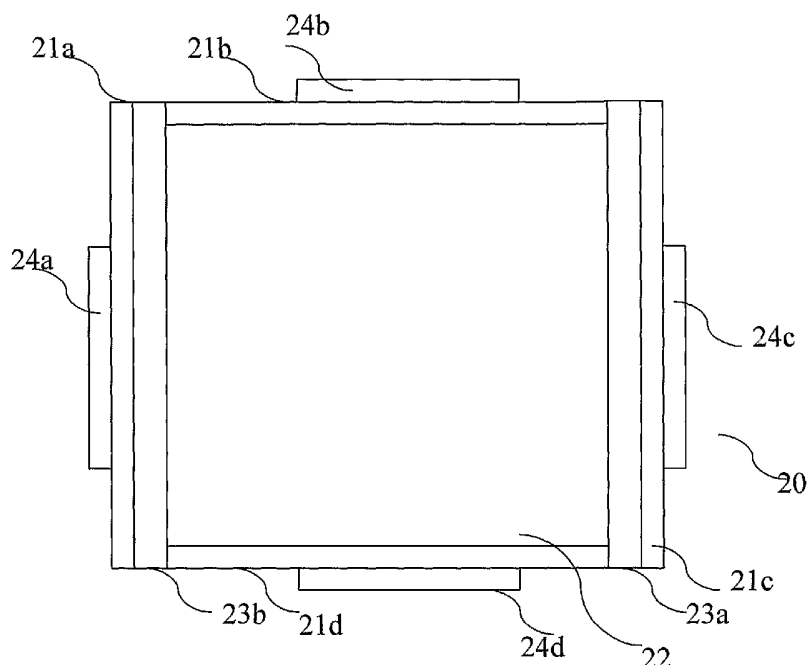
(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **BRUNEAU, Michel** [FR/FR]; 26, rue des Albatros, F-72000 Le Mans (FR). **BLANC-BENON, Philippe** [FR/FR]; 16, rue Philippe de la Salle, F-69004 Lyon (FR). **DURAND, Stéphane** [FR/FR]; 11, rue de Lauberdrière, F-72700 Pruille le Chetif (FR). **LOTTON, Pierrick** [FR/FR]; rue de la Chapelle, F-72540 Crannes en Champagn (FR). **GAVIOT, Etienne** [FR/FR]; 118, rue des Cochereaux, F-72000 Le Mans (FR). **GUSEV, Vitaly** [FR/FR]; 43, rue Coëffort, F-72000 Le Mans (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: COMPACT THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR

(54) Titre : REFRIGERATEUR THERMOACOUSTIQUE COMPACT



(57) Abstract: The invention relates to a thermoacoustic device (20), comprising a cavity, containing a fluid amongst other things, at least one pair of transducers (24a, 24c) for the generation of an acoustic pressure in the fluid and a particular velocity field in the fluid, the transducers of a pair (24a, 24c) being placed facing each other on the sides (21a, 21c) of the cavity and supplied with electrical signals. The device is characterised in also comprising means for adaptation of the electrical signals for the control of the fields in the cavity.

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/102084 A1



(74) **Mandataire : MAILLET, Alain**; Cabinet Le Guen Maillet, 5, place Newquay, B.P. 70250, F-35802 Dinard Cedex (FR).

(81) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,

ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont requises

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) **Abrégé :** La présente invention concerne un dispositif thermoacoustique (20) comprenant une cavité contenant entre autre un fluide, au moins une paire de transducteurs (24a, 24c) générant un champ de pression acoustique dans le fluide et un champ de vitesse particulaire du fluide, les transducteurs d'une paire (24a, 24c) étant placés en vis-à-vis sur des côtés (21a, 21c) de la cavité et alimentés par des signaux électriques, le dispositif étant remarquable en ce qu'il comporte en outre des moyens d'adaptation des signaux électriques pour contrôler les champs dans la cavité.

Réfrigérateur thermoacoustique compact

La présente invention concerne un dispositif thermoacoustique permettant de réaliser des transferts thermiques à partir d'énergie acoustique.

Plus précisément, la présente invention concerne un dispositif de réfrigération pouvant être utilisé dans des domaines tels que la cryogénie, la réfrigération
5 domestique, la climatisation, et l'évacuation de la chaleur entre autre de composants électroniques.

Les ondes acoustiques consistent en un déplacement particulière fonction du point dans l'espace et du temps auquel sont associées notamment des variations de pression et de température. Loin de toute paroi, la propagation d'une onde acoustique
10 peut souvent être considérée comme adiabatique, c'est-à-dire que les transferts d'énergie thermique entre particules de fluide soumises à une oscillation acoustique peuvent être négligés.

Dans ces conditions, la température locale évolue en phase avec la pression acoustique. Cette différence locale de température engendre un gradient instantané de
15 température dans le fluide. Le gradient instantané de température est si faible que le flux de chaleur qui en résulte est négligeable en première approximation.

COPIE DE CONFIRMATION

Le principe de la thermoacoustique est de faire interagir, en terme d'échanges thermiques, le fluide dans lequel se propage l'onde acoustique avec un matériau solide ou corps poreux.

Le matériau solide, présentant une capacité calorifique et une conductivité
5 thermique beaucoup plus élevées que celles du fluide, conserve une température locale constante à l'échelle d'un cycle acoustique, impose cette température aux particules qui sont en contact direct avec lui et, par diffusion, perturbe les oscillations en son voisinage.

La présence de la paroi du matériau solide tend donc à imposer en son
10 voisinage immédiat des oscillations isothermes aux particules, le comportement des particules restant adiabatique à distance de la paroi. Il existe alors une zone de transition à proximité de la paroi où les phénomènes sont polytropiques. Il y a déphasage entre la pression et la température du fluide dans cette zone de transition, associé à une consommation ou génération d'énergie acoustique.

15 De façon schématique, les échanges de chaleur et le travail acoustique peuvent se décomposer comme suivant en considérant le mouvement d'une particule au voisinage d'une paroi du matériau.

Il y a une première phase dans laquelle la particule se déplace tout en subissant une compression quasi adiabatique ou polytropique puis une élévation de
20 sa température.

Il y a une seconde phase dans laquelle la particule ralentit, s'arrête et fait demi-tour, sa température étant supérieure à celle du matériau solide, un transfert de chaleur s'établit de la particule vers la paroi du matériau.

Il y a une troisième phase dans laquelle la particule parcourt le chemin
25 inverse et subit un abaissement de la température dû à une dilatation quasi adiabatique ou polytropique.

Et enfin il y a une quatrième phase dans laquelle lorsque la particule ralentit, s'arrête et fait demi tour, sa température est inférieure à celle du matériau solide et un flux de chaleur s'établit de la paroi du matériau vers la particule.

30 Ainsi, globalement, la particule a assuré le transport de la chaleur d'un endroit à un autre du matériau.

Au cours de ce cycle, la particule a consommé de l'énergie acoustique, ceci venant du fait que globalement elle a cédé de la chaleur avant sa phase de détente ou dilatation et a reçu de la chaleur avant sa phase de compression. Une partie de

l'énergie étant utilisée pour assurer le transfert de chaleur, c'est un fonctionnement en réfrigérateur.

Bien entendu, ce même dispositif thermoacoustique peut assurer la fonction de pompe à chaleur.

5 Un dispositif thermoacoustique est constitué de plusieurs éléments : une source acoustique, un matériau solide, des échangeurs de chaleur, des résonateurs et un fluide.

La source acoustique est classiquement un haut-parleur électrodynamique ou piézoélectrique.

10 Les parois du matériau solide sont agencées de manière à constituer un ensemble poreux.

Ce corps poreux est par exemple constitué d'un empilement de plaques parallèles devant présenter une capacité calorifique et une conductivité thermique bien supérieures à celles du fluide afin de pouvoir imposer des oscillations isothermes aux particules du fluide en contact avec ses parois.

Il doit aussi présenter une conductivité thermique relativement faible pour limiter le flux de chaleur retour s'opposant au flux de chaleur thermoacoustique par simple conduction thermique.

Par exemple, des matières plastiques, des matériaux céramiques sont utilisés.

20 Le fluide utilisé doit avoir de bonnes propriétés, en particulier un bon rapport entre les effets visqueux et les effets thermiques (nombre de Prandtl faible). Il peut être constitué d'air, de mélanges gazeux, hélium-xénon ou autre.

Les échangeurs assurent le transport de la chaleur aux extrémités de l'empilement. Ils sont formés d'empilements courts de plaques métalliques parallèles, généralement en cuivre, traversés par des tubes dans lesquels circule par exemple de l'eau.

Les réfrigérateurs thermoacoustiques classiques sont constitués dans leur version la plus simple d'une source acoustique couplée à un résonateur comprenant l'empilement de plaques et les échangeurs. Ce système couplé fonctionne à sa première fréquence de résonance, le résonateur présentant alors un comportement proche d'un résonateur demi ou quart d'onde.

Le fonctionnement à la résonance permet d'obtenir, au niveau de l'empilement placé entre un ventre de pression et un ventre de vitesse particulière,

des amplitudes de pression acoustique et de vitesse particulière, ainsi qu'une phase relative entre ces deux grandeurs, favorables au processus thermoacoustique.

Cependant, l'utilisation d'un résonateur implique la présence d'un volume perdu, correspondant au volume du résonateur inoccupé par l'empilement.

5 Dans le cadre de la réduction de l'encombrement des systèmes thermoacoustiques avec un maintien de performances égales, ce volume perdu constitue une limite au gain de place recherché.

Dans la demande de brevet publiée aux Etats-Unis sous le numéro US 2002/0166325, est décrite l'utilisation de résonateurs mécaniques en
10 remplacement d'une partie d'un résonateur demi ou quart d'onde afin de réduire l'encombrement d'un appareil thermoacoustique. Leur fonction est d'imiter les conditions dynamiques à une position du résonateur et il est même envisagé l'utilisation de deux résonateurs mécaniques afin de pallier les problèmes de vibrations liés à ce type de dispositifs.

15 La publication « Thermoacoustics with idealized heat exchangers and no stack » de Ray Scott Wakeland and Robert M. Keolian parue dans la revue « Journal of the Acoustical Society of America » décrit une modélisation de dispositifs thermoacoustiques ne disposant pas d'empilement.

Les dispositifs thermoacoustiques sans empilement fonctionnent
20 similairement aux dispositifs avec empilement. Ces dispositifs, par contre, nécessitent une pression beaucoup plus importante à performance équivalente que celle nécessaire dans les dispositifs thermoacoustiques avec empilement.

Dans cette publication, est aussi décrite une configuration non résonante, sans empilements et à un transducteur. Est aussi décrite dans cette publication une
25 configuration équivalente à la configuration précédemment mentionnée à la quelle on associe une configuration miroir pour éviter les vibrations du dispositif thermoacoustique.

Ainsi, dans l'état de la technique, l'amplitude relative et la phase relative de la pression acoustique et de la vitesse particulière sont essentiellement imposées par
30 les caractéristiques des dispositifs thermoacoustiques. Ces caractéristiques ne correspondent pas nécessairement à une configuration optimale.

En d'autres mots, la configuration mécanique du système impose des conditions d'utilisations particulières. En effet, la condition d'accord du résonateur est essentielle pour un fonctionnement optimal. Cet accord dépend essentiellement

des dimensions de la cavité, des caractéristiques mécaniques de la source acoustique, de la géométrie et de la position de l'empilement dans ladite cavité.

Les dimensions de la cavité imposent, pour un bon fonctionnement du dispositif thermoacoustique, une fréquence de fonctionnement particulière.

5 Finalement, les solutions proposées dans l'état de la technique ne permettent pas de réaliser des dispositifs thermoacoustiques d'encombrement réduit à performances égales.

Le but de l'invention est de remplacer le résonateur par une cavité dont les dimensions intérieures sont ramenées à celles de l'empilement et dans laquelle les
10 champs de pression et de vitesse particulière sont créés par un jeu de haut-parleurs placés et alimentés de manière à contrôler le processus thermoacoustique.

A cette fin, l'invention propose un dispositif thermoacoustique comprenant une cavité contenant entre autre un fluide, au moins une paire de transducteurs générant un champ de pression acoustique dans le fluide et un champ de vitesse
15 particulière du fluide, les transducteurs d'une paire étant placés en vis-à-vis sur des côtés de la cavité et alimentés par des signaux électriques, caractérisé en ce que le dispositif comporte en outre des moyens d'adaptation des signaux électriques pour contrôler les champs de pression et de vitesse particulière dans ladite cavité.

Ainsi, l'adaptation des signaux électriques va permettre d'obtenir une
20 efficacité plus importante que celle obtenue dans l'état de la technique. Par une simple adaptation des signaux électriques, l'invention fait abstraction des contraintes liées à la configuration de la cavité et va permettre d'obtenir à encombrement identique et selon le besoin une efficacité, un gradient de température, un flux de chaleur supérieur.

25 Plus particulièrement, les moyens d'adaptation des signaux électriques pour contrôler les champs de pression et de vitesse particulière dans ladite cavité contrôlent les champs de pression et de vitesse indépendamment.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, la cavité contient en outre un corps poreux.

30 Grâce à ce corps poreux, l'invention ne nécessite pas un champ de pression aussi important que celui nécessaire aux dispositifs thermoacoustiques sans corps poreux à performance équivalentes.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les moyens d'adaptation sont composés de moyens de déphasage d'un signal électrique

alimentant un transducteur par rapport à un autre signal électrique alimentant l'autre transducteur de la même paire.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les moyens d'adaptation des signaux électriques comportent en outre des moyens d'ajustement
5 d'au moins une des amplitudes d'un des signaux électriques.

Ainsi, en déphasant un des signaux électriques on joue sur la phase entre les signaux électriques et par suite la vitesse particulaire, plus précisément le champ de vitesse particulaire, est très faible voire s'annule au centre de l'empilement quand les débits des deux sources sont égaux, et la pression acoustique, plus précisément le
10 champ de pression acoustique, est très faible voire s'annule au centre de l'empilement quand les débits des deux sources sont égaux mais de signe opposé.

De plus, en adaptant amplitudes et phases les unes par rapport aux autres l'invention permet d'adapter chacun des champs aux conditions optimales de fonctionnement. Par exemple, en augmentant une des amplitudes par rapport à
15 l'autre, le déplacement d'un des transducteurs est augmenté et le champ préalablement annulé est contrôlé.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les moyens d'adaptation des signaux électriques comportent en outre des moyens d'ajustement des fréquences des signaux électriques.

20 Ainsi, une fréquence optimale pourra être déterminée et ceci indépendamment de la cavité. La fréquence peut alors être ajustée de manière à obtenir un transfert de chaleur dont l'efficacité est optimale.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, la cavité est un cylindre et le dispositif comporte une paire de transducteurs placés aux extrémités dudit
25 cylindre.

Cette configuration est particulièrement économique en ce sens qu'elle ne nécessite qu'une paire de transducteurs. Le coût du dispositif est alors diminué.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le cylindre est de dimensions inférieures au quart de la longueur d'onde de la fréquence de
30 fonctionnement.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le corps poreux est conformé pour occuper la quasi totalité du cylindre.

Ainsi, le dispositif thermoacoustique est applicable dans un nombre important de domaines nécessitant un dispositif thermoacoustique de faible encombrement.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le corps poreux est un monolithe de céramique à canaux.

Ce type de monolithe est particulièrement avantageux, il dispose d'une géométrie régulière, rigide et conductivité thermique anisotrope adaptée à l'application. Il est aussi de faible coût.

Le monolithe occupant la totalité du cylindre, l'écart de température obtenu est beaucoup plus important du fait que le monolithe est beaucoup plus long à longueur de cavité égale que dans l'état de la technique.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les fréquences des signaux électriques sont ajustées en fonction du corps poreux.

Contrairement à l'état de la technique où les fréquences sont imposées par la configuration de la cavité, les caractéristiques du corps poreux et la source acoustique, seules les caractéristiques du corps poreux et plus particulièrement les dimensions de ses canaux vont nécessiter l'utilisation d'une fréquence prédéterminée. Ainsi, un changement de type de corps poreux n'impliquera alors qu'une simple modification de la fréquence pour optimiser les champs dans la cavité. Le dispositif peut donc être utilisé dans de multiples applications.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le dispositif comporte en outre au moins un échangeur de chaleur.

L'exploitation du champ thermique généré au sein de la cavité est alors assurée par les échangeurs de chaleur afin de refroidir ou de réchauffer un quelconque système.

Selon une variante de l'invention, le dispositif comporte deux paires de transducteurs.

En utilisant deux paires de transducteurs, l'optimisation des champs, et plus particulièrement l'adaptation des signaux électriques, sera beaucoup plus aisée à réaliser. Ainsi, une paire de transducteurs va générer le champ de pression dans la cavité, tandis que l'autre paire va générer le champ de vitesse dans la cavité. De cette façon, il est alors très simple de faire varier et d'ajuster les champs de manière à ce qu'ils soient optimum et ainsi d'optimiser les propriétés recherchées en fonction de l'application visée sans avoir à réaliser une cavité de grand encombrement.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les moyens d'adaptation comportent en outre des moyens de déphasage des signaux électriques

alimentant les transducteurs d'une paire par rapport à au moins un des signaux électriques alimentant l'autre paire de transducteurs.

Ainsi, cette possibilité de réglage de la phase va augmenter significativement les performances du dispositif par rapport à l'état de la technique.

5 Le réglage de la phase entre le champ de pression et le champ de vitesse, le réglage indépendant de l'amplitude du champ de pression et du champ de vitesse, grâce à l'invention sont désormais accessibles dans les dispositifs thermoacoustiques.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les moyens de déphasage des signaux électriques alimentant les transducteurs déphasent les signaux
10 électriques pour obtenir une phase prédéterminée entre le champ de pression et le champ de vitesse dans la cavité.

Ainsi, les amplitudes et déphasages des signaux électriques de contrôle des transducteurs sont réalisés de façon optimale pour l'application recherchée.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, la cavité est une cavité
15 parallélépipédique, les transducteurs de chaque paire étant placés sur des faces opposées de la cavité parallélépipédique.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, la cavité est de dimensions inférieures au quart de la longueur d'onde de fonctionnement, le corps poreux est conformé pour occuper la quasi totalité de la cavité.

20 Ainsi, le dispositif thermoacoustique est applicable dans un nombre important de domaines nécessitant un dispositif thermoacoustique de faible encombrement.

L'empilement occupant la totalité du cylindre, l'écart de température obtenu est beaucoup plus important du fait que l'empilement est beaucoup plus long à longueur de cavité donné que dans l'état de la technique.

25 Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le corps poreux est constitué d'un empilement de feuilles parallèles d'une épaisseur prédéterminée et espacées les unes des autres d'un espacement prédéterminé.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les transducteurs sont des haut-parleurs électrodynamiques, des transducteurs électromagnétiques, électrostatiques, à électret, thermoacoustiques, optoacoustiques ou à plasma.
30

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les transducteurs sont des transducteurs piézoélectriques.

Les transducteurs piézoélectriques, notamment en raison de leur faible encombrement, contribuent aussi à la miniaturisation du dispositif.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le dispositif comporte en outre des moyens de mesure du champ de pression dans la cavité, des moyens de génération de commandes des moyens d'adaptation, lesdites commandes étant générées à partir des informations fournies par les moyens de mesure du champ de
5 pression.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le dispositif comporte en outre des moyens de mesure du champ de vitesse particulaire du fluide dans la cavité, des moyens de génération de commandes des moyens d'adaptation, lesdites commandes étant générées à partir des informations fournies par les moyens de
10 mesure du champ de vitesse particulaire.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, le dispositif comporte en outre des moyens de mesure du champ thermique du fluide dans la cavité, des moyens de génération de commandes des moyens d'adaptation, lesdites commandes étant générées à partir des informations fournies par les moyens de mesure du champ
15 thermique.

Selon une caractéristique additionnelle de l'invention, les commandes sont générées à partir des informations fournies par les moyens de mesure du champ de pression, du champ de vitesse particulaire et du champs thermique.

Ainsi, la commande des moyens d'adaptation des signaux électriques à partir
20 des informations fournies par les moyens de mesure va permettre de réaliser un système asservi permettant d'adapter les champs à des consignes et aussi de corriger les disparités qui sont susceptibles d'exister lors de la production en grande série du dispositif.

Les caractéristiques de l'invention mentionnées ci-dessus, ainsi que d'autres, apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'un exemple de réalisation, ladite description étant faite en relation avec les dessins joints, parmi
25 lesquels:

la Fig. 1 représente une vue schématique d'un premier dispositif thermoacoustique selon l'invention,

30 la Fig. 2a représente une vue schématique d'un second dispositif thermoacoustique selon l'invention,

la Fig. 2b représente une vue schématique de l'empilement contenu dans la cavité du second dispositif,

la Fig. 3 représente le schéma bloc d'un système de commande du second dispositif thermoacoustique, et

La Fig. 4 représente le schéma bloc d'un système de commande du dispositif thermoacoustique tel que décrit en Fig. 1.

5

L'idée générale de l'invention est de gérer de façon indépendante les champs de pression et de déplacement acoustique. Ils ne sont pas gérés par les propriétés des champs résonants et leur couplage avec une source.

La possibilité de régler les amplitudes de pression et de déplacement ainsi que leur phase relative permet de contrôler celles-ci en fonction du paramètre thermique
10 désiré pour l'application.

A la Fig. 1, une vue schématique du premier dispositif 10 est représentée.

Nous allons, dans un premier temps, expliquer les fondements théoriques de l'invention qui permettront de comprendre le fonctionnement du premier et du
15 second dispositifs thermoacoustiques de l'invention.

La Fig. 1 représente un dispositif thermoacoustique 10 dans lequel deux transducteurs électroacoustiques notés 11a et 11b sont placés aux extrémités d'un cylindre 15 en regard l'un de l'autre. Le cylindre 15 est de dimensions très petites par rapport à la longueur d'onde associée à la fréquence de fonctionnement.

20 Les quantités p_1 , p_2 et $p(z)$ représentent les pressions acoustiques dans les cavités notées respectivement 14, 13 et dans l'empilement 12.

Les quantités U_1 , U_2 et $U(z)$ représentent les débits acoustiques respectivement du transducteur 11a, 11b et dans l'empilement 12.

Les transducteurs électroacoustiques 11a et 11b sont préférentiellement et de
25 manière non limitative des haut-parleurs électrodynamiques et entretiennent un champ sinusoïdal quasi-plan voire quasi uniforme de fréquence $f = \omega / 2\pi$.

Les plaques, constituant l'empilement 22, étant rigides, de capacité calorifique et de conductivité thermique nettement supérieures à celles de l'air présent dans le cylindre faisant office de fluide, perturbent la forme de la vitesse
30 particulière, de la température et par la suite de la masse volumique de l'onde quasi-plane.

L'empilement 12, de longueur sensiblement égale à celle du cylindre 15, est le siège de l'effet thermoacoustique proprement dit.

Les deux cavités 14 et 13 sont considérées comme petites en regard de la longueur d'onde de l'onde acoustique et la pression dans ces cavités est donc uniforme. Cette pression peut donc être exprimée en fonction des débits entrants et sortants dans les cavités respectives suivant la loi :

$$\begin{aligned} p_1 &= \rho_0 c_0^2 (U_1 - U(-z_s)) / (i\omega V_0), \\ p_2 &= \rho_0 c_0^2 (U_2 - U(z_s)) / (i\omega V_0), \end{aligned}$$

où U_1 et U_2 sont les débits acoustiques entrant dans la cavité fournis par les transducteurs 11a et 11b, $U(-z_s)$ et $U(z_s)$ les débits acoustiques entrant dans l'empilement 12 respectivement à chacune des ses extrémités, ρ_0 la masse volumique du fluide, V_0 le volume des deux cavités 13 et 14, c_0 la célérité adiabatique et l'origine de la coordonnée z étant prise au centre de l'empilement.

Il est à remarquer que, par soucis de simplification, les cavités 14 et 13 sont considérées être de même volume. Bien entendu, les volumes peuvent aussi être différents.

Les équations qui régissent la propagation dans l'empilement 12 peuvent être réduites aux deux équations suivantes pour la pression acoustique p et le débit acoustique moyen $U = S_s u$, en l'absence de gradient de température et dans le cadre de l'acoustique linéaire

$$\begin{aligned} \partial_z p + Z_v U &= 0 \\ \partial_z U + Y_h p &= 0 \end{aligned}$$

où Z_v et Y_h sont respectivement l'impédance et l'admittance linéique équivalente aux effets d'inertie corrigés des effets visqueux et de compressibilité corrigé des effets thermiques, définis comme suit :

$$\begin{aligned} Z_v &= i\omega \rho_0 / (S_s (1 - f_v)) \\ Y_h &= i\omega S_s (1 + (\gamma - 1) f_h) / \rho_0 c_0^2 \end{aligned}$$

où $S_s = S_i y_0 / (y_0 + e_s)$ est la section de fluide utile dans la zone de l'empilement 12, S_i la section du cylindre, γ le rapport des capacités calorifiques, f_v la fonction qui représente les effets de couches limites visqueuses et f_h la fonction qui représente les effets des couches limites thermiques. y_0 est la moitié d'un espace entre deux plaques de l'empilement et e_s la moitié de l'épaisseur des plaques.

Ces équations mènent à l'équation de propagation pour la pression acoustique :

$$\partial_{zz}^2 p + k^2 p = 0$$

avec

5

$$k = \sqrt{-Z_v \cdot y_h}$$

la solution de l'équation de propagation prenant ainsi la forme

$$p(z, f) = (Ae^{-ikz} + Be^{ikz})e^{i\omega t}$$

et le débit

10

$$U = -\partial_z p / Z_v = ik(Ae^{-ikz} - Be^{ikz})e^{i\omega t} / Z_v.$$

les constantes d'intégration A et B sont déterminées en écrivant les conditions de continuité de la pression et du débit acoustique en $z = -z_s$ et $z = +z_s$. Il vient :

15

$$A = ((\alpha + \beta)U_1 e^{ikz_s} + (\alpha - \beta)U_2 e^{-ikz_s}) / ((\alpha + \beta)^2 e^{2ikz_s} - (\alpha - \beta)^2 e^{-2ikz_s})$$

$$B = ((\alpha - \beta)U_1 e^{-ikz_s} + (\alpha + \beta)U_2 e^{ikz_s}) / ((\alpha + \beta)^2 e^{2ikz_s} - (\alpha - \beta)^2 e^{-2ikz_s})$$

Où

20

$$\alpha = ik / Z_v = \sqrt{y_h / Z_v}$$

$$\beta = i\omega V_0 / \rho_0 c_0^2$$

Les deux expressions exprimant alors le champ acoustique en tout point de l'empilement, montrent conformément à l'invention, que la pression acoustique est essentiellement proportionnelle à la somme des débits volumiques des transducteurs, tandis que la vitesse particulaire est elle essentiellement proportionnelle à la différence des débits des sources.

25

En effet, le champ acoustique au centre de l'empilement est approximativement :

30

$$p(0) = \frac{(\alpha + \beta)e^{ikz_s} + (\alpha - \beta)e^{-ikz_s}}{(\alpha + \beta)^2 e^{2ikz_s} - (\alpha - \beta)^2 e^{-2ikz_s}} (U_1 + U_2)$$

$$u(0) = \frac{(\alpha + \beta)e^{ikz_s} - (\alpha - \beta)e^{-ikz_s}}{(\alpha + \beta)^2 e^{2ikz_s} - (\alpha - \beta)^2 e^{-2ikz_s}} \frac{\alpha}{S_s} (U_1 - U_2)$$

5 Ces équations montrent que dans le cadre du dispositif décrit, la vitesse particulière s'annule au centre de l'empilement quand les débits des deux sources sont égaux et que la pression acoustique s'annule au centre de l'empilement quand les débits des deux sources sont égaux mais de signe opposé.

Le débit volumique d'un transducteur 11 tel qu'un haut-parleur
10 électrodynamique ou un transducteur piézoélectrique étant proportionnel à la tension électrique appliquée à ce transducteur, la pression acoustique est essentiellement proportionnelle à la somme des tensions appliquées aux transducteurs 11, tandis que la vitesse particulière est elle essentiellement proportionnelle à la différence des tensions appliquées aux transducteurs.

15 Ainsi, conformément à l'invention, en jouant sur les amplitudes des signaux appliqués aux deux transducteurs 11, en ajustant la phase relative entre ces deux signaux, il est possible de générer un champ de pression acoustique et un champ de vitesse particulière élevés et à relation de phase relative adaptée au niveau de l'empilement 12 ou du dispositif poreux équivalent et donc de réaliser un dispositif
20 de réfrigération acoustique 10 sans avoir recours à un champ résonant demi ou quart d'onde. La longueur d'onde peut donc être très supérieure à la longueur du dispositif.

L'emploi de deux sources 11 permet de gérer la pression acoustique, le déplacement particulière et leurs phases respectives.

Pour cela, les sources 11 sont alimentées en opposition de phase, ce qui
25 confère un mouvement d'ensemble à la colonne de fluide contenue dans la cavité.

L'une d'entre elles est alimentée par une tension d'amplitude supérieure, impliquant ainsi un déplacement plus important de sa membrane et engendrant ainsi un effet de compression.

L'influence de cette tension supérieure sur le champ de vitesse particulière est
30 ici moindre que sur le champ de pression.

Ainsi, les champs de pression et de vitesse particulière dans la cavité sont contrôlés indépendamment.

Dans la Fig. 1, deux transducteurs électroacoustiques notés 11a et 11b sont placés aux extrémités d'un cylindre 15 en regard l'un de l'autre. Le cylindre 15 est

de dimensions très petites par rapport à la longueur d'onde des signaux générés par les transducteurs 11. L'emploi de deux transducteurs ou sources 11a et 11b permet de gérer la pression acoustique, le déplacement particulaire et leurs phases respectives. Deux transducteurs 11a et 11b en regard l'un de l'autre et en opposition
5 de phase, assurent la génération du champ de vitesse, et le champ de pression est généré par un déplacement additionnel de l'un des transducteurs 11.

Le cylindre 15 est par exemple réalisé dans une matière telle que du « Plexiglas », il a une longueur de 8,5 cm, un diamètre intérieur de 44 mm et une épaisseur de 5 mm.

10 Il est à remarquer que le diamètre ou la forme du cylindre 15 n'est pas nécessairement constante sur toute sa longueur. Celui-ci peut être plus étroit au niveau du corps poreux ou au contraire de section beaucoup plus importante au niveau dudit corps poreux.

Deux flasques circulaires (non représentées) d'un même matériau sont placés
15 aux extrémités du cylindre 15 afin de permettre la fixation des transducteurs 11.

Les transducteurs électroacoustiques 11a et 11b sont par exemple des haut-parleurs électrodynamiques et entretiennent dans le dispositif 10 un champ sinusoïdal quasi-plan de fréquence $f=\omega/2\pi$. Ce sont par exemple des haut-parleurs haute fidélité électrodynamiques classiques fabriqués par la société Davis sous la référence
20 13KLV5A d'un diamètre de 10 cm et d'une puissance nominale de 50W.

Bien entendu, ils peuvent être remplacés par des transducteurs piézoélectriques.

Le corps poreux 12, ou empilement, est de longueur sensiblement égale à celle du tube et est le siège de l'effet thermoacoustique proprement dit.

25 L'empilement 12 est à titre préférentiel constitué d'un monolithe de céramique à canaux de section carrée. C'est un monolithe 12 du type de ceux utilisés pour la fabrication de pots catalytiques de véhicules automobiles et usiné de façon à remplir la totalité du cylindre 15. La longueur d'un canal carré est égale à $2y_0=0,9$ mm et l'épaisseur d'une paroi séparant les deux canaux est de $2e_s=0,1$ mm.

30 Ce type de monolithe 12 est particulièrement avantageux, disposant d'une géométrie régulière, rigide, de faible conductivité thermique. Il est de plus de faible coût.

Ce monolithe 12 a, par exemple et de manière non limitative, les caractéristiques suivantes : masse volumique ρ_s de 1300kgm^{-3} , conductivité thermique $K_s=1\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ et capacité calorifique $C_s=1500\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Le dispositif 10 comporte en outre des échangeurs de chaleur non représentés dans la Fig. 1. Ceux-ci seront préférentiellement placés aux extrémités de du corps poreux 12.

A titre d'exemple, avec une tension d'alimentation du haut-parleur 11a de 5 volts RMS (efficace), une tension d'alimentation du haut-parleur 11b de 10 volts RMS, un écart de température de l'ordre de 15 degrés Kelvin a été obtenu entre les extrémités de l'empilement 12. Ces performances sont identiques à celles obtenues, dans des configurations similaires, avec des systèmes résonant d'encombrement (longueur) trois fois supérieur à celui du dispositif 10 selon l'invention.

La Fig. 2a représente une coupe du second dispositif thermoacoustique dans lequel quatre transducteurs électroacoustiques sont utilisés.

Dans ce type de dispositif thermoacoustique 20 réfrigérateur, un champ de pression noté p_y (non représenté) est généré par les sources 24b et 24d, alors qu'un champ de débit noté U_z (non représenté) est généré par les sources 24a et 24c. En appliquant ceci aux équations fondamentales précédemment rappelées dans le modèle à deux sources, nous obtenons donc :

$$\begin{aligned} p_y &= (\rho_0 c_0^2 / i\omega)(U_{p1} + U_{p2}) / (V_0 + (1 + (\gamma - 1)f_h)V_s) \\ p_z &= (\rho_0 c_0^2 / i\omega)(U_{d1} + U_{d2}) / (V_0 + (1 + (\gamma - 1)f_h)V_s) \\ U_y &= \frac{1}{2}(U_{p1} - U_{p2}) / (1 - (k_0^2 V_0 L_s) / 2S_s(1 - f_v)) \\ U_z &= \frac{1}{2}(U_{d1} - U_{d2}) / (1 - (k_0^2 V_0 L_s) / 2S_s(1 - f_v)) \end{aligned}$$

Où L_s est la longueur de l'arête de la cavité qui est ici cubique.

Les sources de pression étant alimentées en phase ($U_{p1}=U_{p2}=U_p$) et les sources de débit en opposition de phase ($U_{d1}=-U_{d2}=U_d$), les équations se résument à :

$$\begin{aligned} U_y &= 0 \text{ et } p_z = 0 \\ p &= (\rho_0 c_0^2 / i\omega) 2U_p / (V + (1 + (\gamma - 1)f_h)V_s) \end{aligned}$$

$$\text{et par approximation: } p = (\rho_0 c_0^2 / i\omega) 2U_p / (V + V_s)$$

$$U=U_d/(1-(k_0^2VL_s)/2S_s(1-f_v)) \text{ et par approximation:}$$

$$U=U_d$$

5 Ainsi, la pression p et le débit U sont découplés lorsque deux paires de transducteurs sont mis en œuvre : la pression p est proportionnelle à la somme des débits des sources de pression U_{pi} et le débit acoustique est lui proportionnel à la différence des débits U_{di} ; les deux effets sont donc considérés comme indépendants.

Le débit volumique d'un transducteur 24 tel qu'un haut-parleur étant proportionnel à la tension électrique appliquée à ce transducteur 24, la pression
10 acoustique est proportionnelle à la somme des tensions appliquées aux transducteurs 24b et 24d, tandis que la vitesse particulaire est, elle, proportionnelle à la différence des tensions appliquées aux autres transducteurs 24a et 24c.

Ainsi, conformément à l'invention, en utilisant quatre transducteurs 24, en ajustant la phase relative entre les signaux, il est possible de générer un champ de
15 pression acoustique et un champ de vitesse particulaire élevés au niveau de l'empilement 22 ou du dispositif poreux équivalent et de réaliser un dispositif de réfrigération acoustique 20 sans avoir recours à un champ résonant demi ou quart d'onde, la longueur d'onde pouvant être très supérieure aux dimensions du dispositif 20.

20 En terme de performances, la détermination du flux de chaleur thermoacoustique va permettre de déterminer les caractéristiques optimales du dispositif 20 tel que décrit.

Le flux de chaleur thermoacoustique est composé de deux classes de facteurs, la première traduisant le flux de chaleur thermoacoustique à gradient de température
25 nulle et la seconde est un facteur limitant le flux de chaleur thermoacoustique indiquant que le flux de chaleur thermoacoustique cesse quand le gradient de température atteint sa valeur critique.

Dans les systèmes à ondes stationnaires, pression et vitesse acoustiques sont en quadrature de phase, si bien que le flux de chaleur thermoacoustique est stimulé
30 par l'intensité acoustique réactive.

Dans les systèmes à ondes propagatives, pression et vitesse acoustiques sont en phase, si bien que le flux de chaleur thermoacoustique est stimulé par l'intensité acoustique active.

Contrairement aux systèmes à ondes stationnaires ou propagatives dans lesquels la pression et la vitesse acoustiques sont déphasées de manière implicite et non modifiable, l'invention, en dissociant les champs de vitesse et de pression, permet avantageusement de régler librement la phase de ces deux champs.

5 L'expression du flux de chaleur acoustique permet de déterminer la phase optimale théorique à maintenir entre le champ de pression et le champ de vitesse, cette phase est dans notre cas et pour de l'air à pression atmosphérique, de l'ordre de 110 degrés.

Ainsi, cette possibilité de réglage de la phase permet d'augmenter
10 notablement les performances du dispositif 20 par rapport à l'état de la technique.

Le réglage de la phase, grâce à l'invention, est désormais accessible dans les dispositifs thermoacoustiques.

Il est alors possible de réaliser un réglage de la phase par asservissement et cela en fonction de l'état instantané du système.

15 Il est à remarquer qu'avec l'emploi d'un fluide plus adapté que l'air aux applications thermoacoustiques, par exemple un mélange Hélium-Xénon connu pour ses effets de minimisation des frottements visqueux, la phase optimale peut être différente de celle indiquée précédemment. Ce paramètre de phase peut aussi varier en fonction des dispersions entre les transducteurs.

20 Un réfrigérateur thermoacoustique 20 à deux paires de transducteurs 24a et 24c, 24b et 24d, soit à quatre sources 24 met en jeu quatre haut-parleurs 24 placés sur quatre faces 21 d'une cavité parallélépipédique rectangle, faces deux à deux.

Les quatre sources 24a, 24b, 24c et 24d sont alimentées par des tensions électriques dont la fréquence est telle que la longueur d'onde reste grande par rapport
25 aux dimensions du système. Un rapport de l'ordre du dixième entre les dimensions du système et la longueur d'onde permet un bon fonctionnement du dispositif 20.

Une paire de sources en vis-à-vis génère la pression acoustique, tandis que l'autre paire génère le déplacement particulaire.

Les sources 24b et 24d gérant la pression sont alimentées en phase, tandis que
30 les sources 24a et 24c gérant le déplacement sont alimentées en opposition de phase.

La phase relative entre sources de pression (24b, 24d) et sources de déplacement (24a, 24c) peut être fixée lors de la fabrication du dispositif 20 ou réglable manuellement ou encore modifiable en temps réel par asservissement, comme cela sera décrit ultérieurement en référence à la Fig. 3.

L'empilement 22 est préférentiellement composé de plaques parallèles 22a à 22i et présente des ouvertures sur quatre côtés.

Le dispositif 20 se compose par exemple d'une cavité de forme cubique d'arête de 3 cm environ. Cette cavité est délimitée par les côtés 21a, 21b, 21c et 21d.
5 Les parois 21 sont réalisées avec un matériau à la fois isolant thermique et électrique. A titre d'exemple, il peut être réalisé en thermoplastique polyether-cétone connu sous l'acronyme PEEK.

Sur quatre de ses faces 21, sont placées les sources 24 maintenues au dispositif à l'aide de bagues de serrage non représentées. Les sources ont par
10 exemple une fréquence de résonance de l'ordre de 1500Hz, fréquence optimisant les performances de l'empilement 22. Les sources 24 sont par exemple des transducteurs piezoélectriques de référence FT-50T-1.9A fabriqués par la société Bimorph KEPO.

Il est à remarquer que l'utilisation de haut-parleurs autres que piezoélectriques peut aussi être envisagée.

15 Préférentiellement, la face supérieure 21b du dispositif est amovible afin de pouvoir placer l'empilement, voire de permettre l'accès à celui-ci.

Selon un mode particulier, au moins un microphone (non représenté) est encastré dans la face supérieure du dispositif de manière à ce que sa membrane soit affleurante à la paroi interne de la cavité. Ce microphone est particulièrement
20 intéressant pour mesurer la pression à des points prédéterminés de la cavité et permettre un asservissement de celle-ci.

Des échangeurs thermiques 23a et 23b sont placés respectivement en contact avec les parois 21c et 21a. Comme l'empilement occupe la quasi-totalité du volume, il est donc possible d'envisager de placer ces échangeurs thermiques contre les parois
25 tout en gardant un rendement optimal.

Bien sûr, en alternative, les échangeurs thermiques 23a et 23b peuvent être intégrés à l'empilement 22.

Selon un mode particulier, au moins un moyen de mesure de température non représenté est inclus dans l'empilement. Ce moyen de mesure de température, ici un
30 thermocouple, est particulièrement intéressant pour mesurer la température à des points prédéterminés de l'empilement 22 et permettre un asservissement de celle-ci.

Un dispositif de l'invention a été réalisé. Ses dimensions sont de l'ordre de 3*3*3 cm. Dans celui-ci, l'empilement occupe la quasi-totalité du volume interne du prototype.

La **Fig. 2b** représente l'empilement 22. Dans le mode préféré, il est sous la forme d'un cube d'arête correspondant au volume interne du dispositif 20.

Il est constitué par exemple d'un ensemble de feuilles en PVC d'une épaisseur inférieure à 100µm et espacées de 200µm les unes des autres.

5 L'espacement est obtenu à l'aide de plots placés aux quatre coins des feuilles.

Selon une variante particulièrement intéressante, l'empilement est réalisé en utilisant les technologies MEMS (Micro Electro Mechanical System). Ces technologies permettent d'obtenir des empilements ayant des épaisseurs, des espacements bien inférieurs à ceux précédemment cités (de l'ordre d'une dizaine de
10 micro mètres). Les technologies MEMS permettent aussi la réalisation d'empilements ayant des géométries adaptées aux besoins de la thermoacoustique.

Il est aussi à remarquer que l'épaisseur, l'espacement, la géométrie sont déterminés en fonction de la fréquence du signal acoustique, de la composition du matériau ainsi que du fluide utilisé.

15 La **Fig. 3** représente le schéma bloc d'un système de commande du second dispositif thermoacoustique.

Le dispositif 20 de la Fig. 2 comporte un capteur de pression noté 34, et deux capteurs de température 35a et 35b placés ici à proximité des échangeurs thermiques 23 représentés en Fig. 2.

20 Un nombre plus important de capteurs 34 et 35 peut être utilisé afin de permettre une commande plus précise du dispositif thermoacoustique 20.

Les capteurs 34 et 35 sont reliés par exemple à un processeur 36.

Le système comporte une source de tension 31 qui fournit un signal électrique sinusoïdal. Cette source de tension est une source de tension à fréquence variable qui
25 peut par exemple être commandée par le processeur 36.

Ce signal sinusoïdal est amplifié par des amplificateurs 33a, 33b, 33c et 33d. Ces amplificateurs 33 sont par exemple des amplificateurs à gain programmable. Le gain de chacun des amplificateurs 33a, 33b, 33c et 33d peut être modifié afin de pouvoir corriger les dispersions existant au niveau des composants utilisés.

30 Ce même signal sinusoïdal est aussi déphasé par des circuits déphaseurs 32a et 32b. Le circuit déphaseur 32a déphase le signal sinusoïdal de 180 degrés. Ce déphasage peut être modifiable afin de pouvoir corriger les dispersions existant au niveau des composants utilisés. Ce déphasage permet d'optimiser, de contrôler la vitesse particulière dans la cavité.

Le circuit déphaseur 32b déphase le signal sinusoïdal de 110 degrés par exemple. Ce déphasage peut être modifiable afin de pouvoir corriger les dispersions existant au niveau des composants utilisés ou plus particulièrement en fonction de la nature du fluide contenu dans la cavité. Ce déphasage permet d'optimiser la phase
5 entre le champ de pression et le champ de vitesse.

Un troisième circuit déphaseur 32c déphase le signal de sortie du déphaseur 32b. Ce déphasage peut être modifiable afin de pouvoir corriger les dispersions existant au niveau des composants 33b, 33d, 24b et 24d utilisés.

Le processeur 36 commande, à partir des informations fournies par les
10 moyens de mesure 34 et 35, les moyens d'adaptation que sont les amplificateurs 33 et déphaseurs 32.

Ainsi, le processeur 36 ajuste, en temps réel, soit à partir de tables de correspondance stockées dans sa mémoire interne, soit par des incréments de commandes des amplificateurs 33 et des déphaseurs 32, les signaux électriques
15 délivrés aux transducteurs 24a, 24b, 24c et 24d de manière à avoir des champs accordés de façon optimale.

Les transducteurs 24a, 24b, 24c et 24d sont des transducteurs piézoélectriques, mais il est possible d'utiliser des haut-parleurs électrodynamiques, des transducteurs électromagnétiques, électrostatiques, à électret, optoacoustiques,
20 thermoacoustiques ou à plasma.

Bien entendu, une réalisation d'un tel système de commande peut être réalisé entièrement avec des circuits analogiques.

La **Fig. 4** représente le schéma bloc d'un système de commande du dispositif thermoacoustique 10 tel que décrit en Fig. 1.

25 Le dispositif 10 de la Fig. 1 comporte un capteur de pression noté 34, et deux capteurs de température 35a et 35b placés ici à proximité des échangeurs thermiques non représentés ici.

Un nombre plus important de capteurs 34, 35 peut être utilisé afin de permettre une commande plus précise du dispositif thermoacoustique.

30 Les capteurs 34 et 35 sont reliés par exemple à un processeur 36.

Le système comporte une source de tension 31 qui fournit un signal électrique sinusoïdal. Cette source de tension est une source de tension à fréquence ajustable qui peut par exemple être commandée par le processeur 36.

Ce signal sinusoïdal est amplifié par des amplificateurs 33a et 33c. Ces amplificateurs 33 sont par exemple des amplificateurs à gain programmable. Le gain de chacun de ces amplificateurs 33a, 33c peut être modifié afin de pouvoir corriger les dispersions existant au niveau des composants utilisés.

5 Ce même signal sinusoïdal est aussi déphasé par un circuit déphaseur 32a.

Le circuit déphaseur 32a déphase le signal sinusoïdal de 180 degrés. Ce déphasage peut être modifié afin de pouvoir corriger les dispersions existant au niveau des composants utilisés. Ce déphasage permet d'optimiser, de contrôler la vitesse particulière dans la cavité.

10 Le processeur 36 commande, à partir des informations fournies par les moyens de mesure 34 et 35, les moyens d'adaptation que sont les amplificateurs 33 et déphaseurs 32.

Ainsi, le processeur ajuste, en temps réel, soit à partir de tables de correspondance stockées dans sa mémoire interne, soit par des incréments de commandes des amplificateurs 33 et des déphaseurs 32, les signaux électriques
15 délivrés aux transducteurs 11a et 11b de manière à avoir des champs accordés de façon optimale.

Ainsi, conformément à l'invention, en jouant sur les amplitudes des signaux appliqués aux deux transducteurs 11a et 11b, en ajustant la phase relative entre ces
20 deux signaux, il est possible de générer un champ de pression acoustique et un champ de vitesse particulière élevés et à relation de phase relative adaptée au niveau de l'empilement ou du dispositif poreux équivalent.

L'emploi de deux amplificateurs 33a et 33c permet de gérer la pression acoustique, le déplacement particulière et leurs phases respectives.

25 Pour cela, les transducteurs 11a et 11b sont alimentées en opposition de phase grâce au déphaseur 32a, ce qui confère un mouvement d'ensemble à la colonne de fluide contenue dans la cavité.

Un des transducteurs 11, par exemple le transducteur 11a, est alimenté par une tension d'amplitude supérieure à celle du transducteur 11b, impliquant ainsi un
30 déplacement plus important de sa membrane et engendrant ainsi un effet de compression. L'amplitude supérieure est obtenue en augmentant le gain de l'amplificateur 33a par rapport à celui de l'amplificateur 33c.

Les transducteurs 11a et 11b sont par exemple des transducteurs piézoélectriques, mais il est possible d'utiliser des haut-parleurs électrodynamiques,

des transducteurs électromagnétiques, électrostatiques, à électret, optoacoustiques, thermoacoustiques ou à plasma.

Bien entendu, une réalisation d' un tel système de commande peut être réalisé entièrement avec des circuits analogiques.

5 Il est à remarquer que l'invention est aussi applicable pour des dispositifs thermoacoustiques permettant de convertir l'énergie thermique en énergie acoustique.

10 Il est à remarquer aussi que l'invention est aussi applicable dans un système comprenant un premier dispositif convertissant l'énergie thermique en énergie acoustique et un second dispositif de réfrigération tel que décrit dans la présente demande et distant du premier dispositif . A titre d'exemple, le premier dispositif peut être placé dans ou à proximité du pot d'échappement d'un véhicule motorisé, le second dispositif est quant à lui placé dans la boîte à gants dudit véhicule motorisé.

15 Bien entendu, la présente invention n'est nullement limitée aux modes de réalisation décrits ici, mais englobe, bien au contraire, toute variante à la portée de l'homme du métier.

REVENDICATIONS

1) Dispositif thermoacoustique comprenant une cavité contenant entre autre un fluide, au moins une paire de transducteurs générant un champ de pression acoustique dans le fluide et un champ de vitesse particulaire du fluide, les transducteurs d'une paire étant placés en vis-à-vis sur des côtés de la cavité et
5 alimentés par des signaux électriques, caractérisé en ce que le dispositif comporte en outre des moyens d'adaptation des signaux électriques pour contrôler les champs de pression et de vitesse particulaire indépendamment dans ladite cavité.

2) Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que la cavité contient
10 en outre un corps poreux.

3) Dispositif selon la revendication 2, caractérisé en ce que les moyens d'adaptation sont composés de moyens de déphasage d'un signal électrique alimentant un transducteur par rapport à un autre signal électrique alimentant l'autre
15 transducteur de la même paire.

4) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les moyens d'adaptation des signaux électriques comportent en outre des moyens d'ajustement d'au moins une des amplitudes d'un des signaux électriques.
20

5) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les moyens d'adaptation des signaux électriques comportent en outre des moyens d'ajustement des fréquences des signaux électriques.

25 6) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la cavité est un cylindre et le dispositif comporte une paire de transducteurs placés aux extrémités dudit cylindre.

7) Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que le cylindre est de
30 dimensions inférieures au quart de la longueur d'onde de la fréquence de fonctionnement.

8) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le corps poreux est conformé pour occuper la quasi totalité du cylindre.

9) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en
5 ce que le corps poreux est un monolithe de céramique à canaux

10) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que les fréquences des signaux électriques sont ajustées en fonction du corps poreux.

10

11) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que le dispositif comporte en outre au moins un échangeur de chaleur.

12) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en
15 ce que le dispositif comporte deux paires de transducteurs.

13) Dispositif selon la revendication 12, caractérisé en ce que les moyens d'adaptation comportent en outre des moyens de déphasage des signaux électriques alimentant les transducteurs d'une paire par rapport à au moins un des signaux
20 électriques alimentant l'autre paire de transducteurs.

14) Dispositif selon la revendication 13, caractérisé en ce que les moyens de déphasage des signaux électriques alimentant les transducteurs déphasent les signaux électriques pour obtenir une phase prédéterminée entre le champ de pression et le
25 champ de vitesse dans la cavité.

15) Dispositif selon la revendication 12, caractérisé en ce que la cavité est une cavité parallélépipédique, les transducteurs de chaque paire étant placés sur des faces opposées de la cavité parallélépipédique.

30

16) Dispositif selon la revendication 15, caractérisé en ce que la cavité est de dimensions inférieures au quart de la longueur d'onde de fonctionnement.

17) Dispositif selon la revendication 12, caractérisé en ce que le corps poreux est conformé pour occuper la quasi totalité de la cavité.

18) Dispositif selon la revendication 12 caractérisé en ce que le corps poreux
5 est constitué d'un empilement de feuilles parallèles d'une épaisseur prédéterminée et espacées les unes des autres d'un espacement prédéterminé.

19) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 18, caractérisé en ce que les transducteurs sont des haut-parleurs électrodynamiques.

10

20) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 18, caractérisé en ce que les transducteurs sont des transducteurs piézoélectriques.

21) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 18, caractérisé
15 en ce que les transducteurs sont du groupes des transducteurs électromagnétiques, électrostatiques, à électret, optoacoustiques, thermoacoustiques ou à plasma.

22) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 21, caractérisé en ce que le dispositif comporte en outre des moyens de mesure du champ de
20 pression dans la cavité et en ce qu'il comporte en outre des moyens de génération de commandes des moyens d'adaptation, lesdites commandes étant générées à partir des informations fournies par les moyens de mesure du champ de pression.

23) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, caractérisé
25 en ce que le dispositif comporte en outre des moyens de mesure du champ de vitesse particulière du fluide dans la cavité et en ce qu'il comporte en outre des moyens de génération de commandes des moyens d'adaptation, lesdites commandes étant générées à partir des informations fournies par les moyens de mesure du champ de vitesse particulière.

30

24) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 22, caractérisé en ce que le dispositif comporte en outre des moyens de mesure du champ thermique du fluide dans la cavité et en ce qu'il comporte en outre des moyens de génération de

commandes des moyens d'adaptation, lesdites commandes étant générées à partir des informations fournies par les moyens de mesure du champ thermique.

- 5 25) Dispositif selon l'une quelconque des revendications 22 à 24, caractérisé en ce que les commandes sont générées à partir des informations fournies par les moyens de mesure du champ de pression, du champ de vitesse particulaire et du champs de température.

1/4

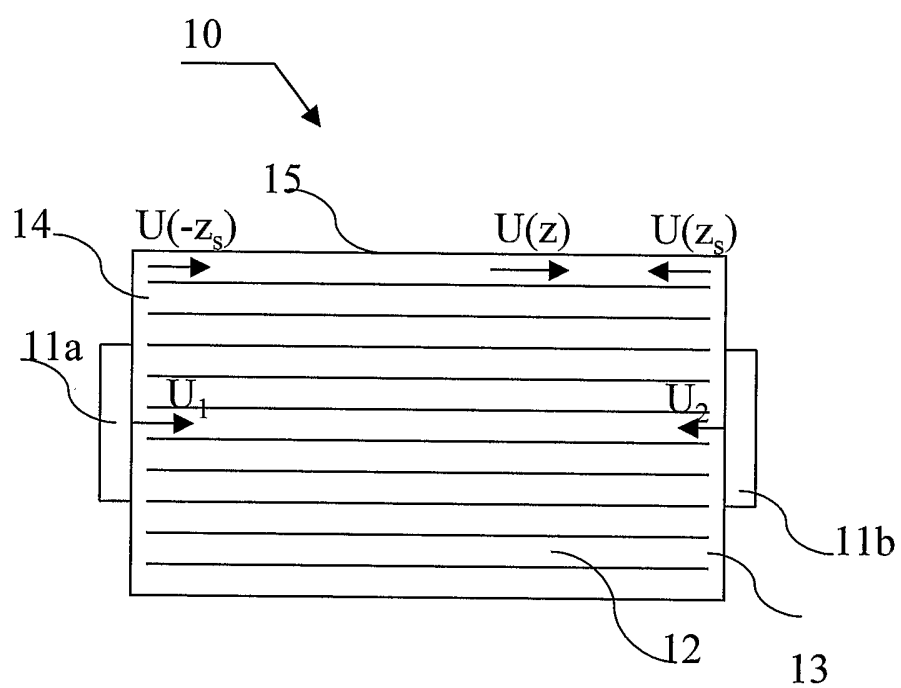
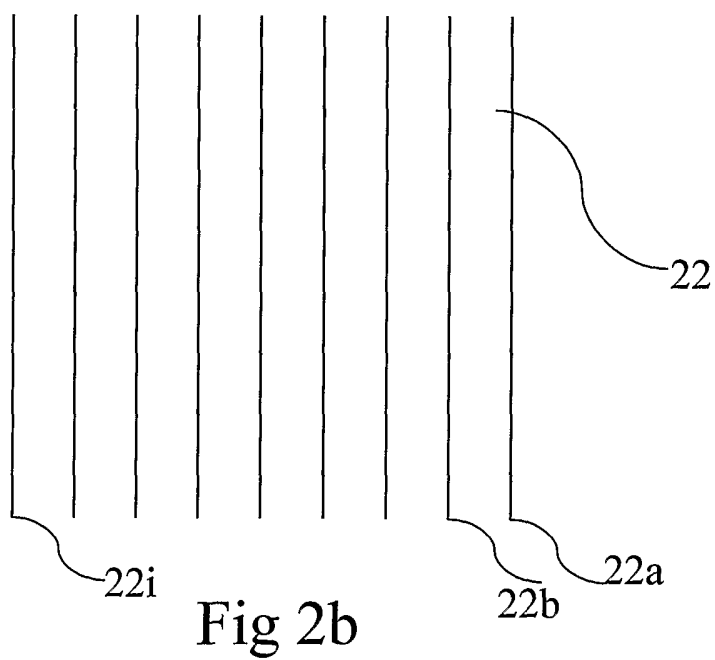
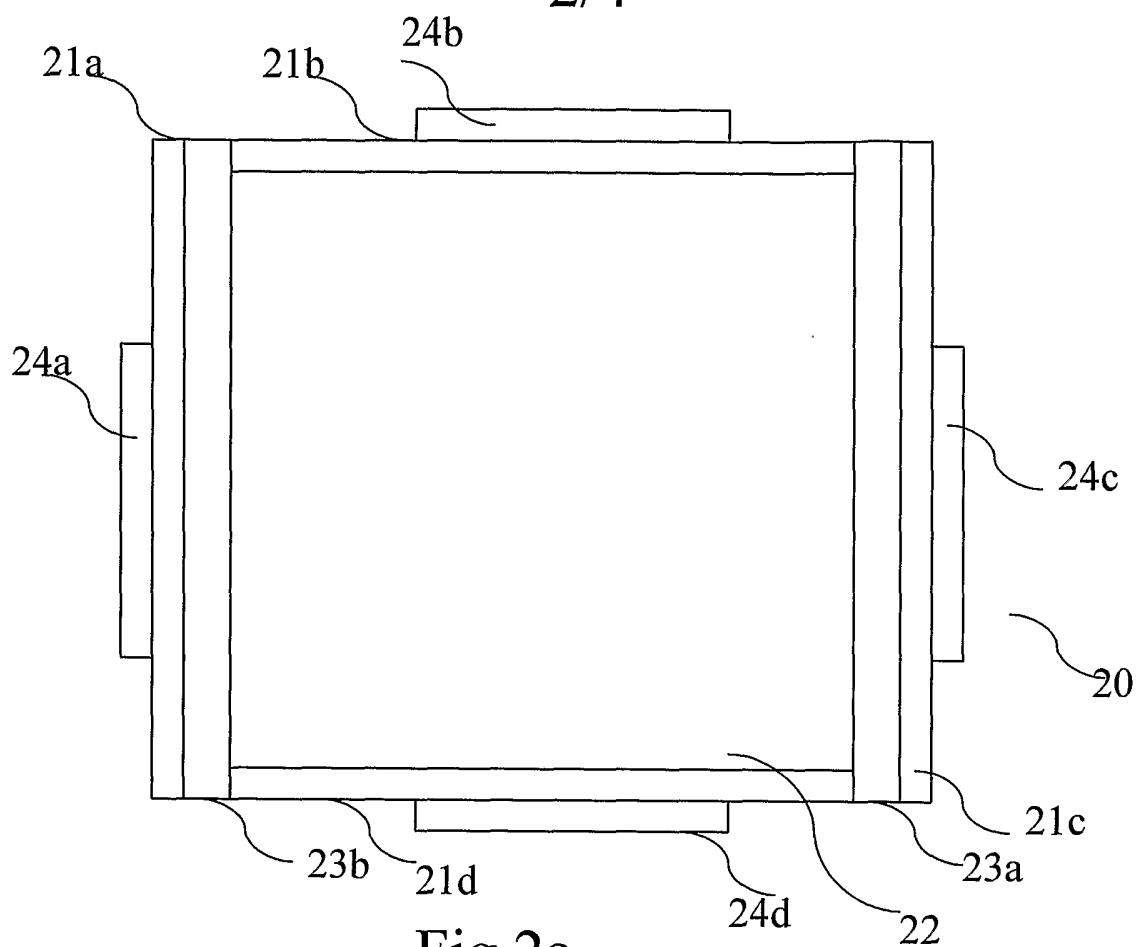


Fig 1

2/4



3/4

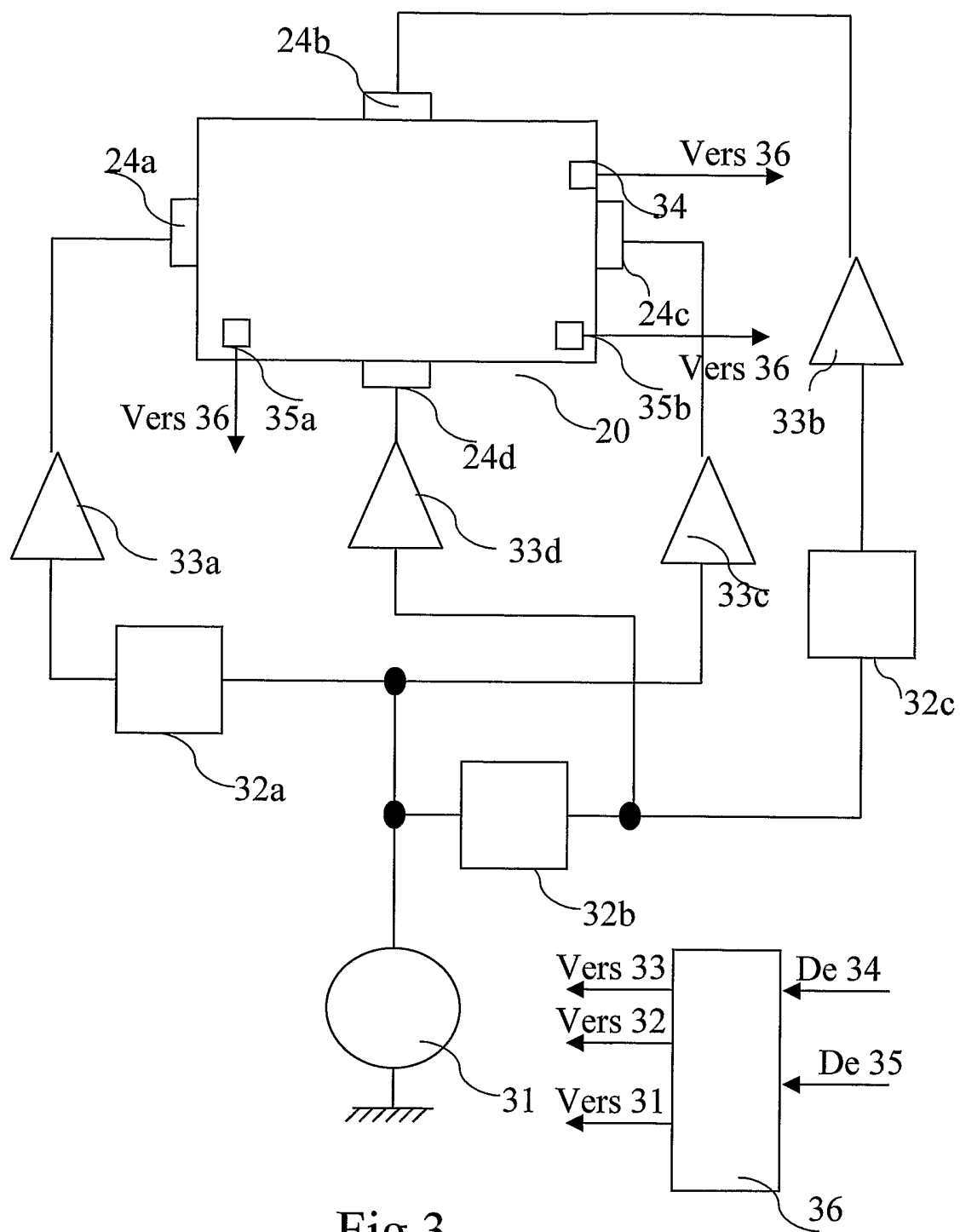


Fig 3

4/4

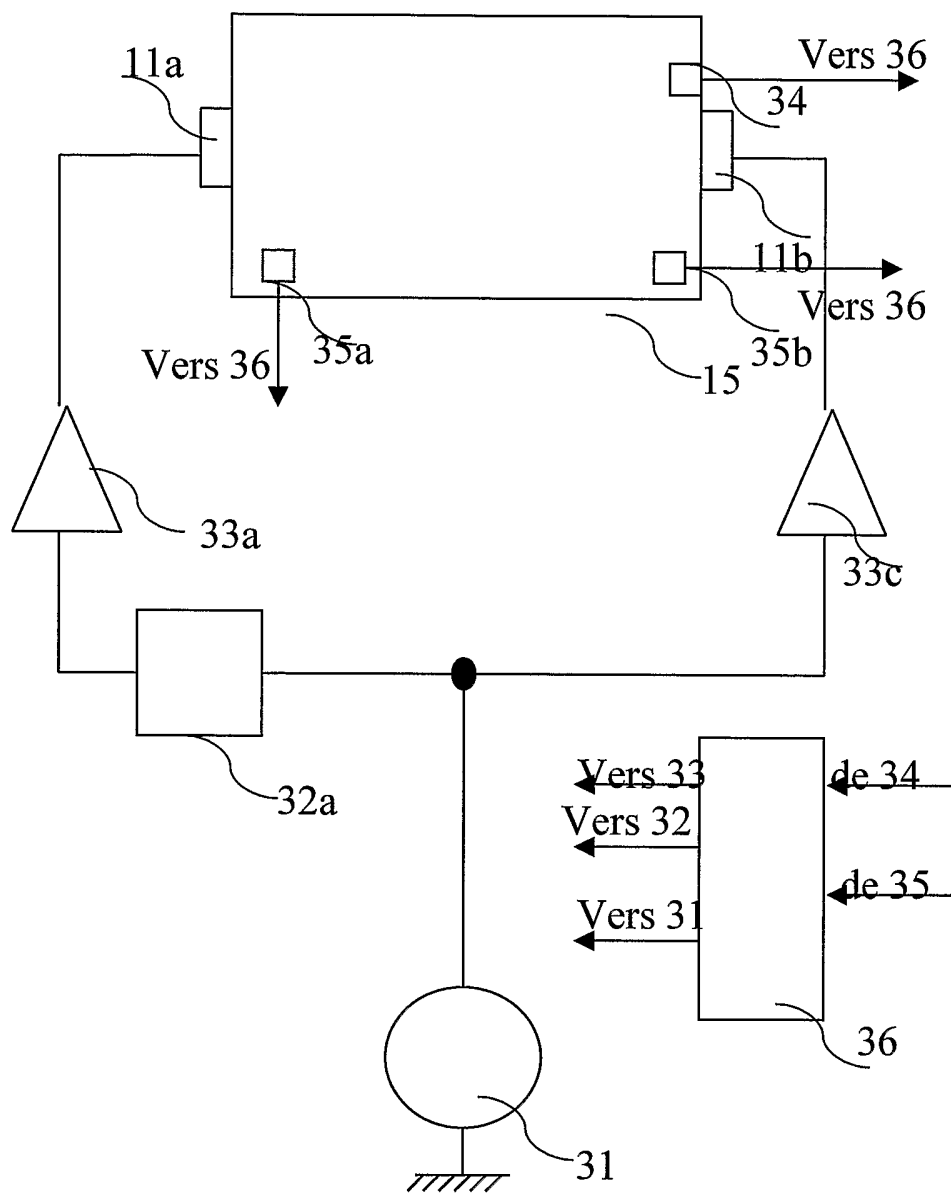


Fig 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/005483

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 F25B9/14

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 F25B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	YAOYU LI ET AL: "Dual-driver standing wave tube: acoustic impedance matching with robust repetitive control" PROCEEDINGS OF THE 2002 AMERICAN CONTROL CONFERENCE. ACC. ANCHORAGE, AL, MAY 8 - 10, 2002, AMERICAN CONTROL CONFERENCE, NEW YORK, NY : IEEE, US, vol. VOL. 1 OF 6, 8 May 2002 (2002-05-08), pages 3771-3776, XP010596964 ISBN: 0-7803-7298-0	1-7, 11, 19, 23
Y	the whole document	8-10, 20, 21
A		12, 22, 24, 25
	----- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 October 2004

Date of mailing of the international search report

29/10/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

De Graaf, J.D.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/005483

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	DE 39 13 050 A (BRITISH AEROSPACE) 2 November 1989 (1989-11-02) abstract column 2, line 2 - line 60 -----	8-10
Y	B. LIHOREAU, P. LOTTON, M. BRUNEAU, S.DURAND, V. GUSEV: "Réfrigérateur thermoacoustique de dimensions réduites: modèle et expérimentation" ACTES DU 6E CONGRÈS FRANCIS D'ACOUSTIQUE, 8 April 2002 (2002-04-08), pages 539-542, XP0008027295 abstract -----	20
Y	US 2002/166325 A1 (COREY JOHN A) 14 November 2002 (2002-11-14) cited in the application paragraph '0050! -----	21
A	US 6 461 144 B1 (PASCHEREIT CHRISTIAN OLIVER ET AL) 8 October 2002 (2002-10-08) abstract -----	12
A	WAKELAND R S ET AL: "THERMOACOUSTICS WITH IDEALIZED HEAT EXCHANGERS AND NO STACK" JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 111, no. 6, June 2002 (2002-06), pages 2654-2664, XP001188216 ISSN: 0001-4966 cited in the application -----	
A	LI Y ET AL: "ADAPTIVE TUNING OF AN ELECTRODYNAMICALLY DRIVEN THERMOACOUSTIC COOLER" JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 111, no. 3, March 2002 (2002-03), pages 1251-1258, XP001188122 ISSN: 0001-4966 -----	
A	WO 03/004946 A (UNIV UTAH RES FOUND) 16 January 2003 (2003-01-16) -----	
A	GB 2 307 979 A (BRITISH AEROSPACE) 11 June 1997 (1997-06-11) -----	
	----- -/--	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/005483

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WETZEL M ET AL: "Design optimization of thermoacoustic refrigerators" INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION, OXFORD, GB, vol. 20, no. 1, 1997, pages 3-21, XP004287152 ISSN: 0140-7007 -----	
A	TIJANI M E H ET AL: "Design of thermoacoustic refrigerators" CRYOGENICS, IPC SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS LTD. GUILDFORD, GB, vol. 42, no. 1, January 2002 (2002-01), pages 49-57, XP004341901 ISSN: 0011-2275 -----	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/005483

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 3913050	A	02-11-1989	DE 3913050 A1	02-11-1989
			FR 2630531 A1	27-10-1989
			GB 2218790 A ,B	22-11-1989
			JP 2044158 A	14-02-1990
US 2002166325	A1	14-11-2002	WO 02086445 A2	31-10-2002
US 6461144	B1	08-10-2002	DE 19928226 A1	01-02-2001
			DE 50003241 D1	18-09-2003
			EP 1050713 A1	08-11-2000
WO 03004946	A	16-01-2003	US 6574968 B1	10-06-2003
			GB 2393238 A	24-03-2004
			WO 03004946 A1	16-01-2003
			US 2004000150 A1	01-01-2004
GB 2307979	A	11-06-1997	FR 2747766 A1	24-10-1997

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No
PCT/EP2004/005483

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 F25B9/14

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
CIB 7 F25B

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	YAOYU LI ET AL: "Dual-driver standing wave tube: acoustic impedance matching with robust repetitive control" PROCEEDINGS OF THE 2002 AMERICAN CONTROL CONFERENCE. ACC. ANCHORAGE, AL, MAY 8 - 10, 2002, AMERICAN CONTROL CONFERENCE, NEW YORK, NY : IEEE, US, vol. VOL. 1 OF 6, 8 mai 2002 (2002-05-08), pages 3771-3776, XP010596964 ISBN: 0-7803-7298-0	1-7, 11, 19, 23
Y	le document en entier	8-10, 20, 21
A		12, 22, 24, 25

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

- "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- "&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

18 octobre 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

29/10/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

De Graaf, J.D.

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	DE 39 13 050 A (BRITISH AEROSPACE) 2 novembre 1989 (1989-11-02) abrégé colonne 2, ligne 2 - ligne 60 -----	8-10
Y	B. LIHOREAU, P. LOTTON, M. BRUNEAU, S.DURAND, V. GUSEV: "Réfrigérateur thermoacoustique de dimensions réduites: modèle et expérimentation" ACTES DU 6E CONGRÈS FRANCIA D'ACOUSTIQUE, 8 avril 2002 (2002-04-08), pages 539-542, XP0008027295 abrégé -----	20
Y	US 2002/166325 A1 (COREY JOHN A) 14 novembre 2002 (2002-11-14) cité dans la demande alinéa '0050! -----	21
A	US 6 461 144 B1 (PASCHEREIT CHRISTIAN OLIVER ET AL) 8 octobre 2002 (2002-10-08) abrégé -----	12
A	WAKELAND R S ET AL: "THERMOACOUSTICS WITH IDEALIZED HEAT EXCHANGERS AND NO STACK" JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 111, no. 6, juin 2002 (2002-06), pages 2654-2664, XP001188216 ISSN: 0001-4966 cité dans la demande -----	
A	LI Y ET AL: "ADAPTIVE TUNING OF AN ELECTRODYNAMICALLY DRIVEN THERMOACOUSTIC COOLER" JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 111, no. 3, mars 2002 (2002-03), pages 1251-1258, XP001188122 ISSN: 0001-4966 -----	
A	WO 03/004946 A (UNIV UTAH RES FOUND) 16 janvier 2003 (2003-01-16) -----	
A	GB 2 307 979 A (BRITISH AEROSPACE) 11 juin 1997 (1997-06-11) -----	
	-/--	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No
PCT/EP2004/005483

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WETZEL M ET AL: "Design optimization of thermoacoustic refrigerators" INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION, OXFORD, GB, vol. 20, no. 1, 1997, pages 3-21, XP004287152 ISSN: 0140-7007 -----	
A	TIJANI M E H ET AL: "Design of thermoacoustic refrigerators" CRYOGENICS, IPC SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS LTD. GUILDFORD, GB, vol. 42, no. 1, janvier 2002 (2002-01), pages 49-57, XP004341901 ISSN: 0011-2275 -----	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No
PCT/EP2004/005483

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
DE 3913050 A	02-11-1989	DE 3913050 A1 FR 2630531 A1 GB 2218790 A ,B JP 2044158 A	02-11-1989 27-10-1989 22-11-1989 14-02-1990
US 2002166325 A1	14-11-2002	WO 02086445 A2	31-10-2002
US 6461144 B1	08-10-2002	DE 19928226 A1 DE 50003241 D1 EP 1050713 A1	01-02-2001 18-09-2003 08-11-2000
WO 03004946 A	16-01-2003	US 6574968 B1 GB 2393238 A WO 03004946 A1 US 2004000150 A1	10-06-2003 24-03-2004 16-01-2003 01-01-2004
GB 2307979 A	11-06-1997	FR 2747766 A1	24-10-1997