



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
19.06.2024 Bulletin 2024/25

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G10K 9/125 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **23215142.3**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G10K 9/125

(22) Date de dépôt: **08.12.2023**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(71) Demandeur: **Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives**
75015 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
• **LIECHTI, Romain**
38054 GRENOBLE CEDEX 09 (FR)
• **CASSET, Fabrice**
38054 GRENOBLE CEDEX 09 (FR)

(30) Priorité: **12.12.2022 FR 2213178**

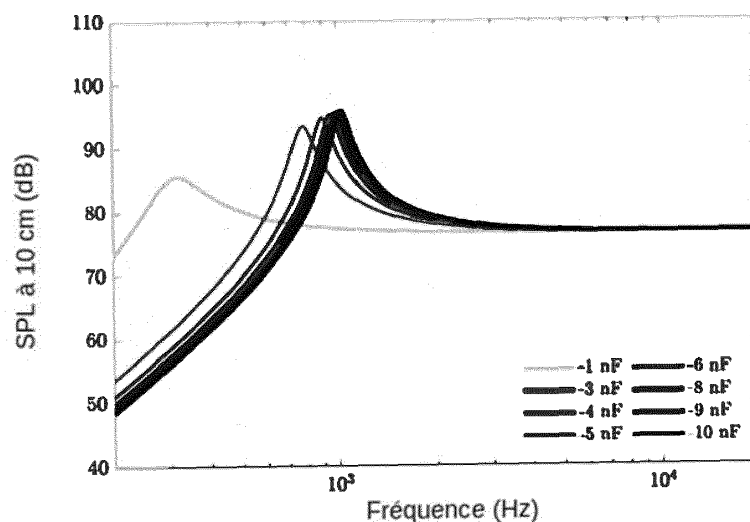
(74) Mandataire: **Cabinet Camus Lebki**
25 rue de Maubeuge
75009 Paris (FR)

(54) **DISPOSITIF ÉLECTROMÉCANIQUE À FRÉQUENCE DE RÉSONANCE VARIABLE ET DISPOSITIF ACOUSTIQUE ASSOCIÉ**

(57) Un aspect de l'invention concerne dispositif électro-mécanique comprenant : au moins une structure mécanique mobile comprenant au moins un élément mécanique mobile ; pour chaque élément mécanique mobile de chaque structure mécanique mobile une première couche piézoélectrique, ladite première couche étant disposée sur une première partie de l'élément mobile de sorte à pouvoir actionner ledit élément mécanique mobile et une deuxième couche piézoélectrique, ladite deuxième

me couche étant disposée sur une deuxième partie de l'élément mobile, distincte de la première partie, de sorte à pouvoir convertir l'énergie mécanique associée au mouvement de l'élément mécanique mobile en énergie électrique, ladite couche formant une capacité ; le dispositif comprenant en outre un circuit électrique connecté à la deuxième couche piézoélectrique en parallèle de la capacité formée par ladite couche et comportant une capacité réglable pouvant prendre une valeur négative.

[Fig. 3]



Description**DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION**

5 **[0001]** Le domaine technique de l'invention est celui des microsystèmes, en particulier des microsystèmes pour des applications acoustiques.

[0002] La présente invention concerne un dispositif électromécanique et, en particulier, un dispositif électromécanique dont la fréquence de résonance peut être modulée. La présente invention concerne également un dispositif acoustique faisant usage d'un dispositif électromécanique selon l'invention.

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

15 **[0003]** Un haut-parleur est utilisé pour transformer un signal électrique en pression acoustique. Depuis de nombreuses années, les haut-parleurs sont miniaturisés pour être intégrés dans les ordinateurs, téléphones portables et écouteurs sans fil. Plus particulièrement, le haut-parleur est un transducteur électro-mécano-acoustique. Dans son principe linéaire, le fonctionnement du haut-parleur passe par l'actionnement d'une membrane, couplée à l'air ambiant. Le signal électrique passe par un premier transducteur électromécanique qui convertit la tension en déplacement. Un transducteur mécano-acoustique, très souvent une membrane, convertit ensuite ce déplacement en pression acoustique.

20 **[0004]** Un bon haut-parleur est un haut-parleur reproduisant toutes les fréquences de la bande audio (20 Hz à 20 kHz) à la même amplitude, avec un taux de distorsion faible. Dans la pratique, la fréquence la plus basse à laquelle un haut-parleur produit efficacement du son est déterminée par la fréquence de résonance du transducteur mécano-acoustique. Dans le contexte de miniaturisation, le système de guidage de la membrane est plus rigide et la masse de la membrane est plus faible, ce qui augmente la fréquence de résonance du système et réduit donc sa bande passante. De plus, pour éviter des interférences destructives entre les ondes acoustiques avant et arrière du haut-parleur, une cavité hermétique est nécessaire. Cette cavité hermétique augmente la raideur apparente du système et donc sa fréquence de résonance, réduisant ainsi sa bande passante.

25 **[0005]** En outre, le niveau de pression rayonnée par un haut-parleur dépend du volume d'air accéléré par le haut-parleur. Ce volume d'air accéléré dépend quant à lui du produit de la surface et du déplacement maximum de la membrane. Dans un contexte de miniaturisation, la surface de la membrane est grandement réduite, et un déplacement important est donc nécessaire pour obtenir un niveau de pression satisfaisant.

30 **[0006]** Pour atteindre de grands déplacements, la transduction électromagnétique reste une solution de choix, et c'est celle-ci qui équipe la grande majorité des haut-parleurs. Bien que ce type de haut-parleurs montre de bonnes performances, leurs dimensions ne permettent pas une intégration dans des systèmes portables. De plus, le recours à un aimant rend la fabrication de ces haut-parleurs incompatible avec les procédés de micro-fabrication.

35 **[0007]** Un autre moyen de transduction montrant des performances notables est la transduction piézoélectrique. Bien que ne conférant pas des déplacements aussi importants que la transduction électromagnétique, la transduction piézoélectrique présente l'avantage d'être compatible avec les procédés de micro-fabrication. Il est par exemple possible d'utiliser l'effet bilame et un actionneur positionné sur une membrane afin d'obtenir des déplacements relativement importants. Cependant, ce n'est pas la seule configuration possible. Par exemple, dans une autre configuration, les actionneurs piézoélectriques sont déportés de la membrane, cette solution permettant de produire un mouvement « pistonique » de celle-ci (voir par exemple le brevet US9980051 B2).

40 **[0008]** Les solutions de l'état de la technique comportent cependant des limitations, notamment en termes de réponse en fréquence. La [Fig. 1] montre la réponse en fréquence d'un haut-parleur MEMS, avec une cavité arrière de 100 mm³ et sans cette cavité arrière. L'augmentation de la fréquence de résonance enlève une grande partie de la pression rayonnée dans les basses fréquences.

45 **[0009]** Il existe donc un besoin d'un dispositif électromécanique dont la fréquence peut être variée, et notamment abaissée, en fonction des besoins. Il existe également un besoin d'un dispositif acoustique équipé d'un tel dispositif électromécanique de sorte à disposer d'un haut-parleur dont la fréquence de résonance peut varier, permettant ainsi de reproduire toutes les fréquences de la bande audio avec sensiblement la même amplitude, avec un taux de distorsion faible, le haut-parleur étant en outre compatible avec les techniques de micro-fabrication.

RESUME DE L'INVENTION

55 **[0010]** L'invention offre une solution aux problèmes évoqués précédemment, en proposant un dispositif électromécanique dont la fréquence peut être variée, et notamment abaissée, en fonction des besoins. L'invention propose également un dispositif acoustique faisant usage d'un tel dispositif électromécanique et dans lequel la fréquence de résonance du ou des haut-parleurs s'adapte à la fréquence ou aux fréquences du signal acoustique émis par ledit ou lesdits haut-parleurs.

[0011] Pour cela, un premier aspect de l'invention concerne un dispositif électromécanique comprenant :

- Au moins une structure mécanique mobile comprenant au moins un élément mécanique mobile ;
- Pour chaque élément mécanique mobile de chaque structure mécanique mobile :
 - une première couche piézoélectrique, ladite première couche étant disposée sur une première partie de l'élément mécanique mobile de sorte à pouvoir actionner ledit élément mécanique mobile ;
 - une deuxième couche piézoélectrique, ladite deuxième couche étant disposée sur une deuxième partie de l'élément mécanique mobile, distincte de la première partie, de sorte à pouvoir convertir l'énergie mécanique associée au mouvement de l'élément mécanique mobile en énergie électrique, ladite deuxième couche formant une capacité ;

[0012] Le dispositif électromécanique selon l'invention est remarquable en ce qu'il comprend un circuit électrique connecté à la deuxième couche piézoélectrique en parallèle de la capacité formée par ladite deuxième couche et comportant une capacité réglable pouvant prendre une valeur négative.

[0013] Grâce à l'invention, il est possible de faire varier la fréquence de résonance du ou des éléments mobiles (et donc de la structure mécanique mobile) en faisant varier la valeur de la capacité réglable.

[0014] Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le dispositif électromécanique selon un premier aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

[0015] Dans un mode de réalisation, la capacité réglable pouvant prendre une valeur négative est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel.

[0016] Dans un mode de réalisation, la capacité réglable pouvant prendre une valeur négative est réalisée par micro-fabrication.

[0017] Dans un mode de réalisation, la structure mécanique mobile est constituée d'un élément mécanique mobile sous la forme d'une membrane en forme de disque, la première couche piézoélectrique et la deuxième couche piézoélectrique étant disposées à la surface de ladite membrane.

[0018] Dans un mode de réalisation, la structure mécanique mobile comprend une surface rigide configurée pour pouvoir effectuer un mouvement de translation perpendiculaire à sa surface, le ou les éléments mécaniques mobiles de la structure mécanique mobile étant configurés pour actionner la surface rigide selon ledit mouvement.

[0019] Dans un mode de réalisation, chaque élément mécanique mobile est réalisé à l'aide d'une poutre encastree au niveau de l'une de ses extrémités et guidée, la première couche piézoélectrique étant disposée sur une première partie d'une surface supérieure de la poutre et la deuxième couche piézoélectrique étant disposée sur une deuxième partie de la surface supérieure de la poutre.

[0020] Dans un mode de réalisation, chaque élément mobile est réalisé à l'aide d'une poutre encastree au niveau de ses deux extrémités.

[0021] Un deuxième aspect de l'invention concerne un dispositif acoustique comprenant :

- un port d'entrée destiné à recevoir un signal électrique audio ;
- un haut-parleur comprenant un dispositif électromécanique selon un premier aspect de l'invention, le haut-parleur étant associé à une fréquence de résonance au repos et comprenant un moyen de mesure configuré pour mesurer le mouvement du haut-parleur ; et
- un moyen de traitement d'un signal numérique configuré pour déterminer la fréquence instantanée du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée.

[0022] En outre, dans le dispositif acoustique selon l'invention, la fréquence de résonance du haut-parleur est ajustable autour de la fréquence au repos dudit haut-parleur et le moyen de traitement du signal numérique est configuré pour envoyer la fréquence instantanée du signal au haut-parleur, ce dernier étant configuré pour ajuster sa fréquence de résonance sur la fréquence instantanée du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée.

[0023] On entend par « signal électrique audio » un signal électrique correspondant à un signal électrique destiné à être converti en signal audio par un ou plusieurs haut-parleurs.

[0024] Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le dispositif acoustique selon un deuxième aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

[0025] Dans un mode de réalisation, le dispositif acoustique comprend un filtre passe-bande configuré pour isoler, dans le signal électrique audio reçu sur le port d'entrée, le signal électrique audio à une fréquence prédéterminée, le signal électrique en sortie du filtre passe bande étant envoyé au haut-parleur, le filtre passe bande étant configuré pour ajuster sa fréquence prédéterminée sur la fréquence instantanée du signal reçu sur le port d'entrée et déterminée par le moyen de traitement d'un signal numérique.

[0026] Un troisième aspect de l'invention concerne un dispositif acoustique comprenant :

- un port d'entrée destiné à recevoir un signal électrique audio ;
- une pluralité de haut-parleurs, chaque haut-parleur de la pluralité de haut-parleurs comprenant un dispositif électromécanique selon un premier aspect de l'invention, chaque haut-parleur étant associé à une fréquence de résonance au repos, différente de la fréquence de résonance au repos des autres haut-parleurs, et comprenant un moyen de mesure configuré pour mesurer le mouvement du haut-parleur considéré ;
- un moyen de traitement d'un signal numérique configuré pour déterminer le contenu fréquentiel du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée ; et
- pour chaque haut-parleur de la pluralité de haut-parleurs, un filtre passe-bande configuré pour isoler, dans le signal électrique audio reçu sur le port d'entrée, le signal électrique audio à une fréquence prédéterminée, le signal électrique en sortie du filtre passe bande étant envoyé au haut-parleur considéré.

[0027] De plus, dans le dispositif selon un troisième aspect de l'invention, la fréquence de résonance de chaque haut-parleur de la pluralité de haut-parleurs est ajustable autour de la fréquence de résonance au repos du haut-parleur considéré dans une gamme de fréquences prédéterminée, et le moyen de traitement d'un signal numérique est configuré pour envoyer, à chaque haut-parleur de la pluralité de haut-parleurs, la fréquence instantanée du signal reçu sur le port d'entrée ayant l'amplitude la plus élevée dans la gamme de fréquence prédéterminée associée au haut-parleur considéré, ce dernier étant configuré pour ajuster sa fréquence de résonance sur cette fréquence instantanée, le filtre passe bande associé au haut-parleur considéré étant configuré pour ajuster sa fréquence prédéterminée sur cette même fréquence instantanée.

[0028] Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le dispositif acoustique selon un troisième aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

[0029] Dans un mode de réalisation, les fréquences de résonance au repos des haut-parleurs de la pluralité de haut-parleurs sont réparties en fonction des harmoniques d'un instrument à corde.

[0030] L'invention et ses différentes applications seront mieux comprises à la lecture de la description qui suit et à l'examen des figures qui l'accompagnent.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0031] Les figures sont présentées à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.

La [Fig. 1] illustre la modification de la pression acoustique associée à la présence d'une cavité.

La [Fig. 2] illustre un schéma équivalent d'un dispositif électromécanique selon l'invention.

La [Fig. 3] illustre l'évolution de la fréquence de résonance en fonction de la valeur de la capacité réglable d'un dispositif électromécanique selon l'invention.

La [Fig. 4] illustre la capacité réglable est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel dans un mode de réalisation d'un dispositif électromécanique selon l'invention.

La [Fig. 5A] et [Fig. 5B] illustrent un mode de réalisation dans lequel la structure mobile est réalisée à l'aide d'une membrane circulaire.

La [Fig. 6] illustre un mode de réalisation dans lequel la structure mécanique comprend une membrane rigide actionnée par des cantilevers.

La [Fig. 7] illustre un mode de réalisation d'un cantilever comprenant, sur sa surface supérieure, une première

couche piézoélectrique et une deuxième couche piézoélectrique.

La [Fig. 8] illustre de manière schématique le principe de fonctionnement d'un dispositif acoustique selon l'invention sans filtre passe-bande.

La [Fig. 9] illustre de manière schématique le principe de fonctionnement d'un dispositif acoustique selon l'invention avec un filtre passe-bande.

La [Fig. 10] illustre de manière schématique le principe de fonctionnement d'un dispositif acoustique selon l'invention avec une pluralité de haut-parleurs.

La [Fig. 11] illustre une répartition possible des fréquences de résonance et des gammes de fréquences associées à une pluralité de haut-parleurs (8 haut-parleurs) d'un dispositif acoustique selon l'invention.

La [Fig. 12] représente l'amplitude du signal en temps/fréquence d'un dispositif acoustique selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE

[0032] Sauf précision contraire, un même élément apparaissant sur des figures différentes présente une référence unique.

Dispositif électromécanique à fréquence de résonance variable

[0033] Un premier aspect de l'invention illustré aux [Fig. 2] à [Fig. 7] concerne un dispositif électromécanique comprenant au moins une structure mécanique mobile SM (ci-après structure mobile), ladite structure mobile SM comportant au moins un élément mécanique mobile EM (ci-après élément mobile) et, pour chacun de ces éléments mobiles EM, une première couche piézoélectrique CP1, ladite première couche CP1 étant disposée sur une première partie de l'élément mobile EM de sorte à pouvoir actionner ledit élément mobile EM, et une deuxième couche piézoélectrique CP2, ladite deuxième couche CP2 étant disposée sur une deuxième partie de l'élément mobile EM, distincte de la première partie, de sorte à pouvoir convertir l'énergie mécanique associée au mouvement de l'élément mobile EM en énergie électrique (ainsi la première couche CP1 et la deuxième couche CP2 sont séparées l'une de l'autre), la deuxième couche CP2 formant une capacité. Le dispositif électromécanique selon l'invention est remarquable en ce qu'il comprend un circuit électrique CEL connecté à la deuxième couche piézoélectrique CP2, ledit circuit électrique comportant une capacité réglable pouvant prendre une valeur négative. Par ailleurs cette capacité réglable est en parallèle avec la capacité formée par la deuxième couche piézoélectrique CP2 de sorte que la capacité équivalente peut prendre une valeur positive ou une valeur négative selon les besoins.

[0034] Afin de comprendre les avantages résultant d'un dispositif électromécanique selon l'invention, il est intéressant de noter qu'une couche piézoélectrique CP1, CP2 agit comme un transducteur. Aussi, les composants électriques connectés sur une telle couche ont une influence sur le comportement mécanique de l'élément mobile EM sur lequel est déposée ladite couche piézoélectrique CP1, CP2.

[0035] Le comportement de l'élément mobile EM peut alors être modélisé par un schéma électrique équivalent tel que celui illustré à la [Fig. 2]. Dans ce schéma, la structure électromécanique selon l'invention est représentée par un circuit électrique équivalent comprenant une résistance série R_g représentant la résistance de sortie de l'amplificateur (en charge d'actionner l'élément mobile EM), un condensateur C_{pa} représentant l'effet capacitif de la première couche piézoélectrique CP1, un transformateur γ_a représentant la transduction électromécanique de la première couche piézoélectrique CP1 (autrement dit, représentant la conversion de l'énergie électrique fournie par l'amplificateur en énergie mécanique de l'élément mobile EM), une résistance R_{ms} représentant les pertes visqueuses dans le domaine mécanique subit par l'élément mobile EM, une inductance M_{ms} représentant la masse mobile de l'élément mobile EM, une capacité C_{ms} représentant la raideur apparente de l'élément mobile EM par rapport au point de fixation ou aux points de fixation dudit élément mobile EM, un transformateur S_d représentant la transduction mécano-acoustique, une impédance Z_{rad} représentant l'impédance de rayonnement de l'élément mobile EM, une capacité C_{ps} représentant l'effet capacitif de la deuxième couche piézoélectrique CP2 et une capacité C_n en parallèle avec la capacité créée par la deuxième couche piézoélectrique CP2 et pouvant prendre des valeurs négatives (cet aspect sera détaillé dans la suite).

[0036] Sachant que la deuxième couche piézoélectrique CP2 a une influence sur le comportement de l'élément mobile EM, connecter cette deuxième couche CP2 à une capacité C_n ayant une valeur négative permet de diminuer la raideur apparente de l'élément mobile EM et donc de modifier sa fréquence de résonance. A partir du schéma équivalent précédent, il est possible d'exprimer la fréquence de résonance de l'élément mobile EM à l'aide de la relation suivante :

[Math. 1]

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms}C_{eq}}}$$

où M_{ms} est la masse équivalente de l'élément mobile EM et C_{eq} est la capacité équivalente du circuit donnée par la relation suivante :

[Math. 2]

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ms}} + \left(\frac{1}{C_{ps} + C_n}\right)\gamma_s^2}$$

[0037] Ainsi, il est possible d'augmenter ou de diminuer la fréquence de résonance de l'élément mobile EM en jouant sur la valeur négative de la capacité C_n comme le montre la [Fig. 3]. Sur cette figure, la réponse fréquentielle de l'élément mobile EM est représentée pour différentes valeurs de $C_{ps} + C_n$ situées entre -1nF et -10nF. De préférence, les valeurs des capacités sont choisies de sorte que la fréquence de résonance puisse être variée dans une plage de +/- 20% autour de la fréquence de résonance au repos (correspondant à la situation dans lequel le circuit CEL en parallèle de la capacité formée par la deuxième couche est ouvert).

[0038] Dans un mode de réalisation illustré à la [Fig. 4], la capacité réglable est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel. L'impédance ainsi obtenue est donnée par la relation suivante :

[Math. 3]

$$C_n = -\frac{R_2}{R_1} C'_n$$

[0039] Où R_1 , R_2 et C'_n prennent des valeurs positives, l'une d'elles au moins pouvant varier. De préférence, la valeur de C'_n peut être variée.

[0040] La structure mobile SM selon l'invention peut adopter différentes configurations en fonction de l'usage envisagé.

[0041] Dans un mode de réalisation illustré à la [Fig. 5A] et la [Fig. 5B], la structure mobile SM est constituée d'un élément mobile EM sous la forme d'une membrane en forme de disque, la première couche piézoélectrique CP1 et la deuxième couche piézoélectrique CP2 étant disposées à la surface de ladite membrane. Dans un mode de réalisation, le diamètre de la membrane en forme de disque est compris entre 1 mm et 25 mm. De préférence, la première couche piézoélectrique CP1 est située dans une partie de la surface de la membrane séparée de la partie de la surface de la membrane où se trouve la deuxième couche piézoélectrique CP2, la séparation entre les deux parties se situant au niveau de l'inflexion de la membrane (dans une coupe selon le diamètre de cette dernière), en général à 2/3 du rayon depuis le centre de la membrane. Dans un mode de réalisation illustré à la [Fig. 5A], la première couche piézoélectrique CP1 forme un disque au centre de la membrane et la deuxième couche piézoélectrique CP2 forme un anneau autour de ce disque. Dans un mode de réalisation alternatif illustré à la [Fig. 5B], la première couche CP1 forme un premier anneau et la deuxième couche CP2 forme un deuxième anneau entourant le premier anneau.

[0042] Dans un mode de réalisation illustré à la [Fig. 6], la structure mobile SM comprend une surface rigide SR configurée pour pouvoir effectuer un mouvement de translation perpendiculaire à sa surface (mouvement représenté par la flèche en pointillés sur la figure), le ou les éléments mobiles EM de la structure SM étant configurés pour actionner la surface rigide SR selon ledit mouvement. Bien entendu, le schéma électrique équivalent et le principe de fonctionnement restent les mêmes que dans le cas introduit précédemment : l'influence de la deuxième couche piézoélectrique CP2 présente sur chaque élément mobile EM permet de modifier la fréquence de résonance de la structure mobile SM

dans son ensemble.

[0043] Dans un mode de réalisation illustré à la [Fig. 7], chaque élément mobile EM est réalisé à l'aide d'une poutre encastrée au niveau de l'une de ses extrémités au niveau d'un cadre CR et guidée (compte tenu de la symétrie de la structure), la première couche piézoélectrique CP1 étant disposée sur une première partie d'une surface supérieure de la poutre et la deuxième couche piézoélectrique CP2 étant disposée sur une deuxième partie de la surface supérieure de la poutre, distincte de la première partie. Dans un mode de réalisation, la frontière entre la première partie et la deuxième partie se situe au niveau d'un point d'inflexion de la poutre (lorsque cette dernière est mise en mouvement). Dans l'exemple de la [Fig. 7], compte tenu de la symétrie de la poutre, cette frontière se situe à mi-longueur de la poutre, c'est à dire à une distance $L/2$ d'une extrémité de la poutre, L étant la longueur de la poutre.

[0044] Dans un mode de réalisation alternatif, chaque élément mobile est réalisé à l'aide d'une poutre encastrée au niveau de ses deux extrémités.

[0045] Un dispositif électromécanique selon l'invention peut avantageusement être utilisé pour réaliser un haut-parleur HP dont la fréquence de résonance est variable, la fréquence de résonance du haut-parleur étant donnée par la fréquence du dispositif électromécanique dudit haut-parleur. De même, il est possible de réaliser une pluralité de haut-parleurs HP, chaque haut-parleur HP étant réalisé avec un dispositif électromécanique selon l'invention et associé à une fréquence de résonance au repos, de préférence différente pour chaque haut-parleur HP. De préférence, chaque haut-parleur HP comprend une structure mobile SM réalisée à l'aide d'une membrane telle que présentée à la [Fig. 5A] ou à la [Fig. 5B]. De préférence, chaque haut-parleur HP comprend un circuit de commande configuré pour déterminer, à partir d'une fréquence de consigne, la valeur de la capacité négative permettant d'obtenir une fréquence de résonance égale à la fréquence de consigne, le circuit de commande étant en outre configuré pour commander le circuit électrique CEL du dispositif électromécanique selon l'invention afin d'obtenir la valeur de la capacité (et donc la fréquence de résonance) souhaitée. De plus, le circuit de commande est configuré pour déterminer le mouvement du haut-parleur à l'aide de la deuxième couche piézoélectrique CP2 et, à partir de ce mouvement, la fréquence de vibration du haut-parleur.

Dispositif acoustique comprenant un dispositif électromécanique à fréquence de résonance variable

[0046] Le dispositif électromécanique selon l'invention peut avantageusement être utilisé dans un dispositif acoustique afin d'obtenir un dispositif acoustique comprenant un haut-parleur dont la fréquence de résonance peut être modulée (c'est à dire un haut-parleur tel que présenté précédemment). Pour cela, un deuxième aspect de l'invention illustré à la [Fig. 8] concerne un dispositif acoustique DA comprenant :

- un port d'entrée IN destiné à recevoir un signal électrique audio ;
- un haut-parleur HP comprenant un dispositif électromécanique selon l'invention, le haut-parleur HP étant associé à une fréquence de résonance au repos et comprenant un moyen de mesure CP2 configuré pour mesurer le mouvement du haut-parleur HP ; et
- un moyen de traitement d'un signal numérique MT configuré pour déterminer la fréquence instantanée du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée IN.

[0047] De plus, dans le dispositif selon un deuxième aspect de l'invention, la fréquence de résonance du haut-parleur HP est ajustable autour de la fréquence au repos dudit haut-parleur HP et le moyen de traitement du signal numérique MT est configuré pour envoyer la fréquence instantanée du signal au haut-parleur HP, ce dernier étant configuré pour, à partir de cette fréquence instantanée, ajuster sa fréquence de résonance.

[0048] Le dispositif acoustique DA selon l'invention peut par exemple être intégré dans un téléphone portable, une tablette ou bien tout autre matériel nécessitant des haut-parleurs de petites tailles et/ou ne nécessitant de reproduire qu'une fréquence unique bien que variable dans le temps (par ex. un buzzer dans un dispositif électronique).

[0049] Dans le dispositif selon un deuxième aspect de l'invention, le haut-parleur étant réalisé à l'aide d'un dispositif électromécanique DE selon un premier aspect de l'invention, il est possible de contrôler la fréquence de ce dernier par l'intermédiaire du circuit électrique CEL du dispositif électromécanique DE et mesurer le mouvement du haut-parleur HP (et éventuellement, à partir de ce mouvement en déduire la fréquence de vibration) et à commander la capacité variable afin d'ajuster la fréquence de résonance du haut-parleur HP.

[0050] Dans un mode de réalisation illustré à la [Fig. 9], le dispositif acoustique DA comprend un filtre passe bande FPB configuré pour isoler, dans le signal électrique audio reçu sur le port d'entrée IN, le signal électrique audio à une fréquence prédéterminée, le signal électrique filtré en sortie du filtre étant envoyé au haut-parleur HP. De plus, la fréquence prédéterminée du filtre passe bande FPB est ajustée en fonction de la fréquence instantanée du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée IN. Ainsi, lorsque le signal en entrée n'est pas monotone, le filtre passe bande FPB permet de filtrer les signaux parasites pour n'envoyer au haut-parleur HP que le signal à la fréquence instantanée

du signal d'entrée, cette dernière étant par ailleurs la fréquence de résonance du haut-parleur HP. Autrement dit, la fréquence prédéfinie du filtre passe-bande FPB et la fréquence de résonance du haut-parleur HP sont asservies sur la fréquence instantanée du signal d'entrée.

[0051] Dans un mode de réalisation, la fréquence instantanée du signal électrique audio d'entrée est déterminée à l'aide d'une transformée de Fourier à court terme (TFCT ou STFT pour Short-Time Fourier Transform en anglais). Bien entendu, il ne s'agit que d'un exemple. D'autres méthodes bien connues de la personne du métier pouvant être utilisées, comme une Transformée de Hilbert ou bien encore une dérivée de la phase en fonction du temps.

[0052] Dans les modes de réalisation précédents, le dispositif acoustique DA n'est configuré que pour émettre une unique fréquence, la fréquence instantanée du signal d'entrée (cette fréquence peut cependant varier dans le temps). Il peut cependant être intéressant de pouvoir émettre dans une pluralité de fréquences, par exemple pour restituer le son émis par un instrument à corde ou pour varier les sonorités d'un buzzer.

[0053] Pour cela, un troisième aspect de l'invention illustré à la [Fig. 10] (pour un exemple dans lequel trois haut-parleurs sont présents - le dispositif peut bien entendu comporter un nombre plus important de haut-parleurs) concerne un dispositif acoustique DA comprenant :

- un port d'entrée IN destiné à recevoir un signal électrique audio ;
- une pluralité de haut-parleurs HP, chaque haut-parleur HP de la pluralité de haut-parleurs HP comprenant un dispositif électromécanique selon l'invention, le haut-parleur HP étant associé à une fréquence de résonance au repos, différente de la fréquence de résonance au repos des autres haut-parleurs HP et comprenant un moyen de mesure CP2 configuré pour mesurer le mouvement du haut-parleur HP considéré ;
- Un moyen de traitement d'un signal numérique MT configuré pour déterminer le contenu fréquentiel du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée IN ; et
- Pour chaque haut-parleur HP de la pluralité de haut-parleurs HP, un filtre passe bande FPB configuré pour isoler, dans le signal électrique audio reçu sur le port d'entrée IN, le signal électrique audio à une fréquence prédéterminée, le signal électrique filtré en sortie du filtre passe bande FPB étant envoyé au haut-parleur HP considéré.

[0054] De plus, le dispositif acoustique DA selon l'invention est remarquable en ce que la fréquence de résonance de chaque haut-parleur HP de la pluralité de haut-parleurs HP est ajustable autour de la fréquence de résonance au repos du haut-parleur HP considéré dans une gamme de fréquences prédéterminée, et en ce que le moyen de traitement du signal numérique MT est configuré pour envoyer, à chaque haut-parleur HP de la pluralité de haut-parleurs HP, la fréquence instantanée du signal reçu sur le port d'entrée IN ayant l'amplitude la plus élevée dans la gamme de fréquence prédéterminée associée au haut-parleur HP considéré, ledit haut-parleur HP étant configuré pour ajuster sa fréquence de résonance sur cette fréquence instantanée. De plus, le filtre passe bande FPB associé au haut-parleur HP considéré est configuré pour ajuster sa fréquence prédéterminée sur cette même fréquence instantanée. Autrement dit, parmi toutes les fréquences présentes dans le signal qui sont dans la bande de fréquence compatible avec le haut-parleur HP considéré, la fréquence associée à la plus grande amplitude de signal est celle sur laquelle se fera l'asservissement de la fréquence de résonance du haut-parleur HP et de la fréquence prédéfinie du filtre passe-bande FPB.

[0055] Comme déjà mentionné, chaque haut-parleur HP de la pluralité de haut-parleurs HP est associé à une fréquence de résonance au repos, différente de la fréquence de résonance au repos des autres haut-parleurs HP. De plus, chaque haut-parleur HP de la pluralité de haut-parleurs HP est ajustable autour de la fréquence de résonance au repos du haut-parleur HP considéré dans une gamme de fréquences prédéterminée (cette gamme de fréquence définissant donc une bande de fréquence). La [Fig. 11] représente la réponse en fréquence de huit haut-parleurs HP, chaque courbe étant associée à un haut-parleur HP, chaque pic correspondant à la fréquence de résonance au repos du haut-parleur, la bande grisée entourant chacun des pics représentant la bande de fréquence du haut-parleur dans laquelle peut être ajustée la fréquence de résonance.

[0056] Dans un mode de réalisation, les fréquences de résonance au repos des haut-parleurs HP de la pluralité de haut-parleurs HP sont réparties en fonction des harmoniques d'un instrument à corde, par exemple une guitare, un piano, etc. Comme illustré à la [Fig. 12] qui représente l'amplitude du signal en temps/fréquence, un tel dispositif DA permet de reproduire (hors attaque) les notes de guitare avec un vibrato.

Revendications

1. Dispositif électro-mécanique comprenant :

- Au moins une structure mécanique mobile comprenant au moins un élément mécanique mobile (EM) ;
- Pour chaque élément mécanique mobile (EM) de chaque structure mécanique mobile (SM) :

o une première couche piézoélectrique (CP1), ladite première couche (CP1) étant disposée sur une première partie de l'élément mobile (EM) de sorte à pouvoir actionner ledit élément mécanique mobile (EM) ;
 o une deuxième couche piézoélectrique (CP2), ladite deuxième couche (CP2) étant disposée sur une deuxième partie de l'élément mobile (EM), distincte de la première partie, de sorte à pouvoir convertir l'énergie mécanique associée au mouvement de l'élément mécanique mobile (EM) en énergie électrique, ladite couche formant une capacité ;

le dispositif étant **caractérisé en ce qu'il** comprend un circuit électrique connecté à la deuxième couche piézoélectrique (CP2) en parallèle de la capacité formée par ladite couche (CP2) et comportant une capacité réglable pouvant prendre une valeur négative.

2. Dispositif selon la revendication précédente dans lequel la capacité réglable pouvant prendre une valeur négative est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel.

3. Dispositif selon la revendication 1 dans lequel la capacité réglable pouvant prendre une valeur négative est réalisée par micro-fabrication.

4. Dispositif selon l'une des trois revendications précédentes dans lequel la structure mécanique mobile (SM) est constitué d'un élément mobile (EM) sous la forme d'une membrane en forme de disque, la première couche piézoélectrique (CP1) et la deuxième couche piézoélectrique (CP2) étant disposées à la surface de ladite membrane.

5. Dispositif selon la revendication précédente dans lequel la première couche piézoélectrique (CP1) forme un premier anneau et la deuxième couche piézoélectrique (CP2) forme un deuxième anneau entourant le premier anneau.

6. Dispositif selon la revendication 1, la revendication 2 ou la revendication 3 dans lequel la structure mécanique mobile (SM) comprend une surface rigide (SR) configurée pour pouvoir effectuer un mouvement de translation perpendiculaire à sa surface, le ou les éléments mécaniques mobiles (EM) de la structure mécanique mobile (SM) étant configurés pour actionner la surface rigide (SR) selon ledit mouvement.

7. Dispositif selon la revendication précédente dans lequel chaque élément mobile (EM) est réalisé à l'aide d'une poutre encastrée au niveau de l'une de ses extrémités et guidée, la première couche piézoélectrique (CP1) étant disposée sur une première partie d'une surface supérieure de la poutre et la deuxième couche piézoélectrique (CP2) étant disposée sur une deuxième partie de la surface supérieure de la poutre, distincte de la première partie.

8. Dispositif selon la revendication 6 dans lequel chaque élément mécanique mobile (EM) est réalisé à l'aide d'une poutre encastrée au niveau de ses deux extrémités.

9. Haut-parleur comprenant au moins un dispositif selon l'une des revendications précédentes.

10. Dispositif acoustique (DA) comprenant :

- Un port d'entrée (IN) destiné à recevoir un signal électrique audio ;
- Un haut-parleur (HP) selon la revendication précédente, ledit haut-parleur étant associé à une fréquence de résonance au repos et comprenant un moyen de mesure (CP2) configuré pour mesurer le mouvement du haut-parleur (HP) ;
- Un moyen de traitement d'un signal numérique (MT) configuré pour déterminer la fréquence instantanée du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée (IN) ;

le dispositif étant **caractérisé en ce que** la fréquence de résonance du haut-parleur (HP) est ajustable autour de la fréquence au repos dudit haut-parleur (HP) et le moyen de traitement du signal numérique (MT) est configuré pour envoyer la fréquence instantanée du signal au haut-parleur (HP), ce dernier étant configuré pour, à partir de cette fréquence instantanée, ajuster sa fréquence de résonance.

11. Dispositif acoustique (DA) selon la revendication précédente comprenant un filtre passe bande (FPB) configuré pour isoler, dans le signal électrique audio reçu sur le port d'entrée (IN), le signal électrique audio à une fréquence

prédéterminée, le signal électrique en sortie du filtre passe bande (FPB) étant envoyé au haut-parleur (HP), le filtre passe bande (FPB) étant configuré pour ajuster sa fréquence prédéterminée sur la fréquence instantanée du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée (IN).

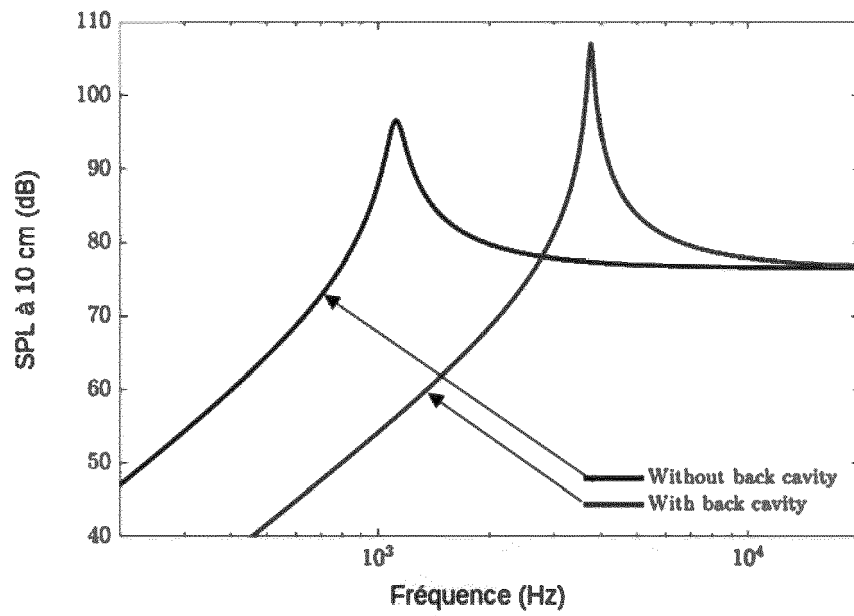
5 12. Dispositif acoustique (DA) comprenant :

- Un port d'entrée (IN) destiné à recevoir un signal électrique audio ;
- Une pluralité de haut-parleurs (HP) selon la revendication 9, chaque haut-parleur (HP) de la pluralité de haut-parleurs (HP) étant associé à une fréquence de résonance au repos, différente de la fréquence de résonance au repos des autres haut-parleurs (HP) et comprenant un moyen de mesure (CP2) configuré pour mesurer le mouvement du haut-parleur (HP) considéré ;
- Un moyen de traitement d'un signal numérique (MT) configuré pour déterminer le contenu fréquentiel du signal électrique audio reçu sur le port d'entrée (IN) ;
- Pour chaque haut-parleur (HP) de la pluralité de haut-parleurs (HP), un filtre passe bande (FPB) configuré pour isoler, dans le signal électrique audio reçu sur le port d'entrée (IN), le signal électrique audio à une fréquence prédéterminée, le signal électrique en sortie du filtre passe bande (FPB) étant envoyé au haut-parleur (HP) considéré ;

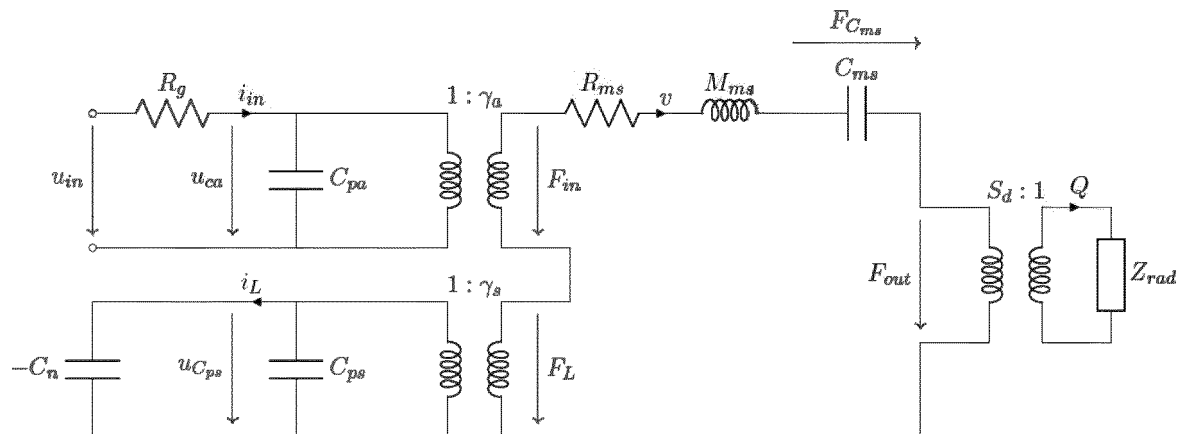
le dispositif (DA) étant **caractérisé en ce que** la fréquence de résonance de chaque haut-parleur (HP) de la pluralité de haut-parleurs (HP) est ajustable autour de la fréquence de résonance au repos du haut-parleur (HP) considéré dans une gamme de fréquences prédéterminée, et le moyen de traitement d'un signal numérique (MT) est configuré pour envoyer, à chaque haut-parleur (HP) de la pluralité de haut-parleurs, la fréquence instantanée du signal reçu sur le port d'entrée (IN) ayant l'amplitude la plus élevée dans la gamme de fréquence prédéterminée associée au haut-parleur (HP) considéré, ledit haut-parleur (HP) étant configuré pour ajuster sa fréquence de résonance sur cette fréquence instantanée, le filtre passe bande (FPB) associé au haut-parleur (HP) considéré étant configuré pour ajuster sa fréquence prédéterminée sur cette même fréquence instantanée.

13. Dispositif (DA) selon la revendication précédente dans lequel les fréquences de résonance au repos des haut-parleurs (HP) de la pluralité de haut-parleurs (HP) sont réparties en fonction des harmoniques d'un instrument à corde.

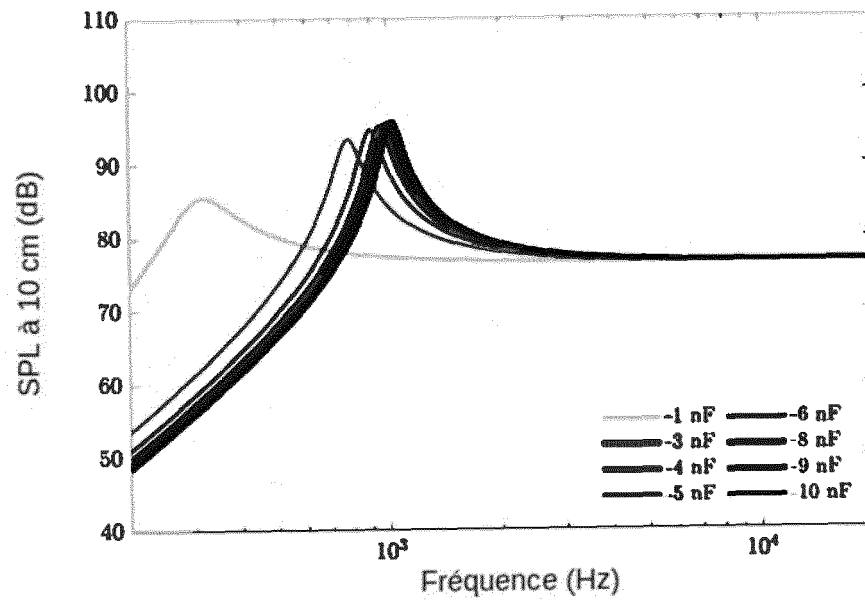
[Fig. 1]



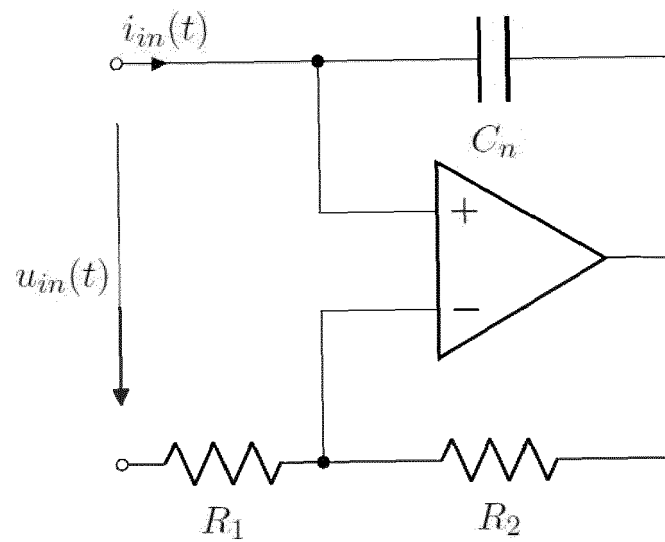
[Fig. 2]



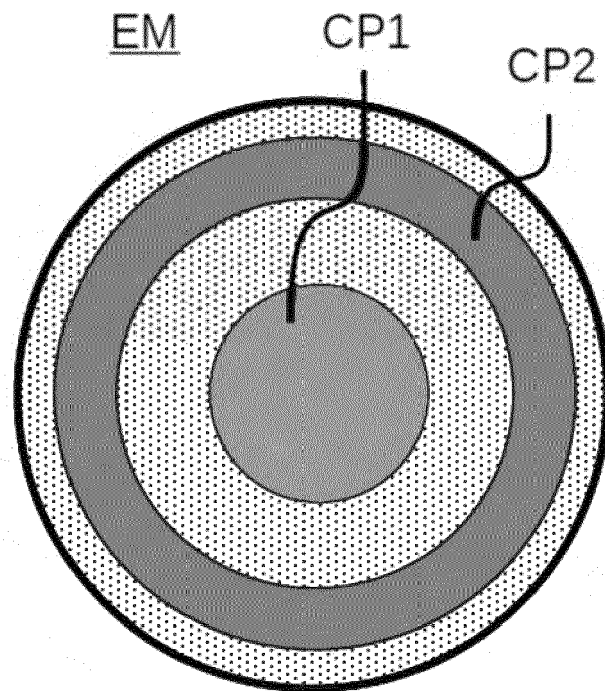
[Fig. 3]



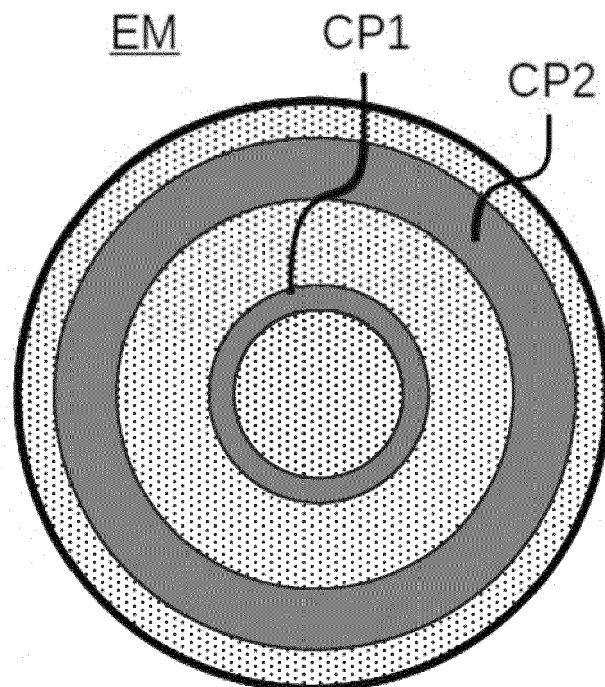
[Fig. 4]



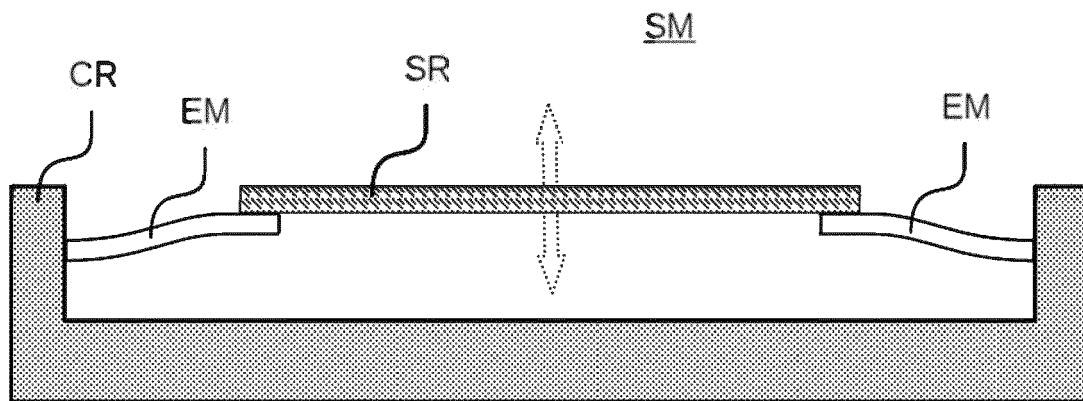
[Fig. 5A]



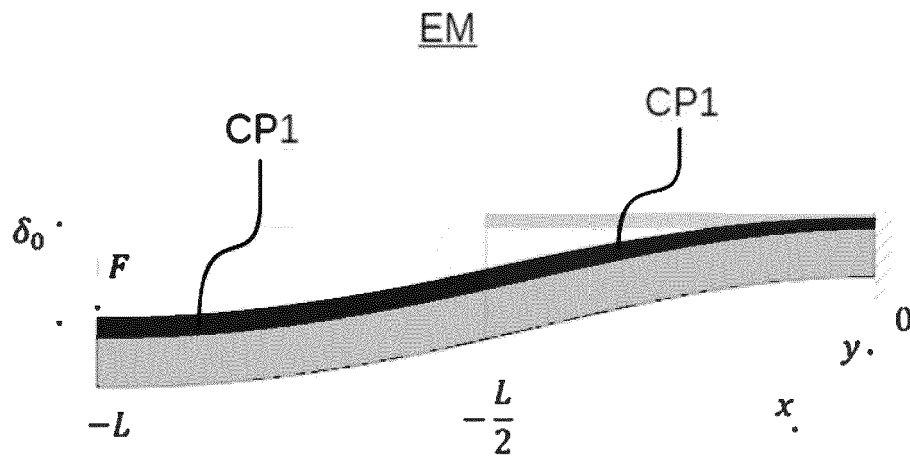
[Fig. 5B]



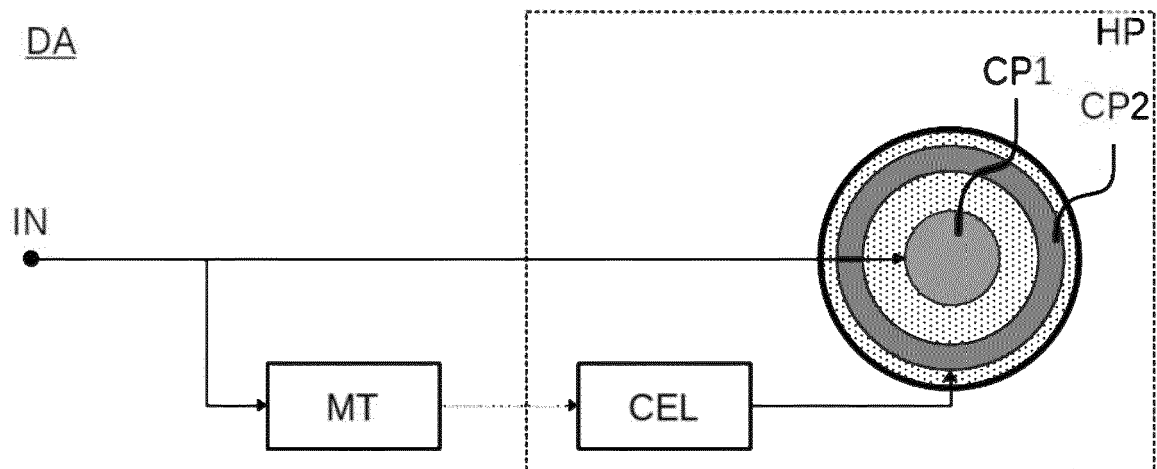
[Fig. 6]



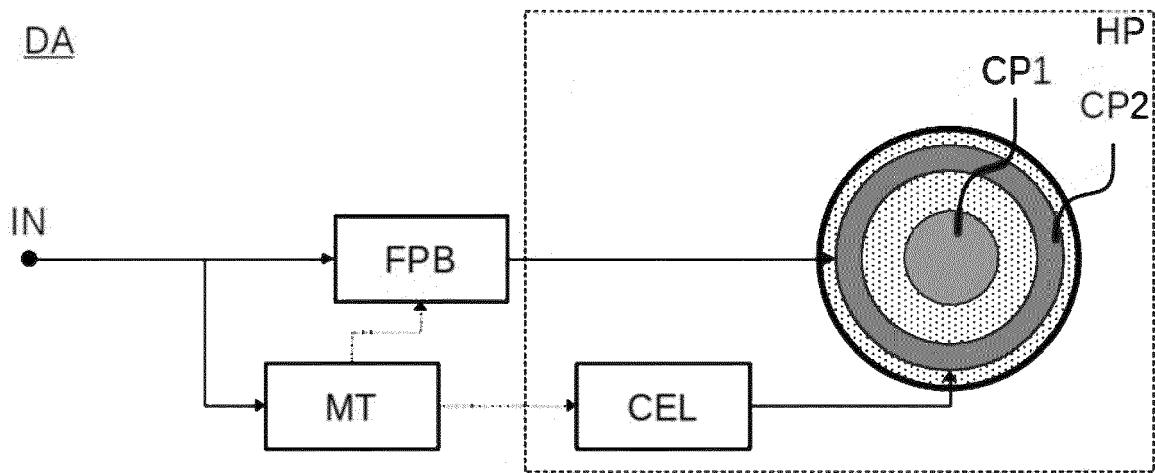
[Fig. 7]



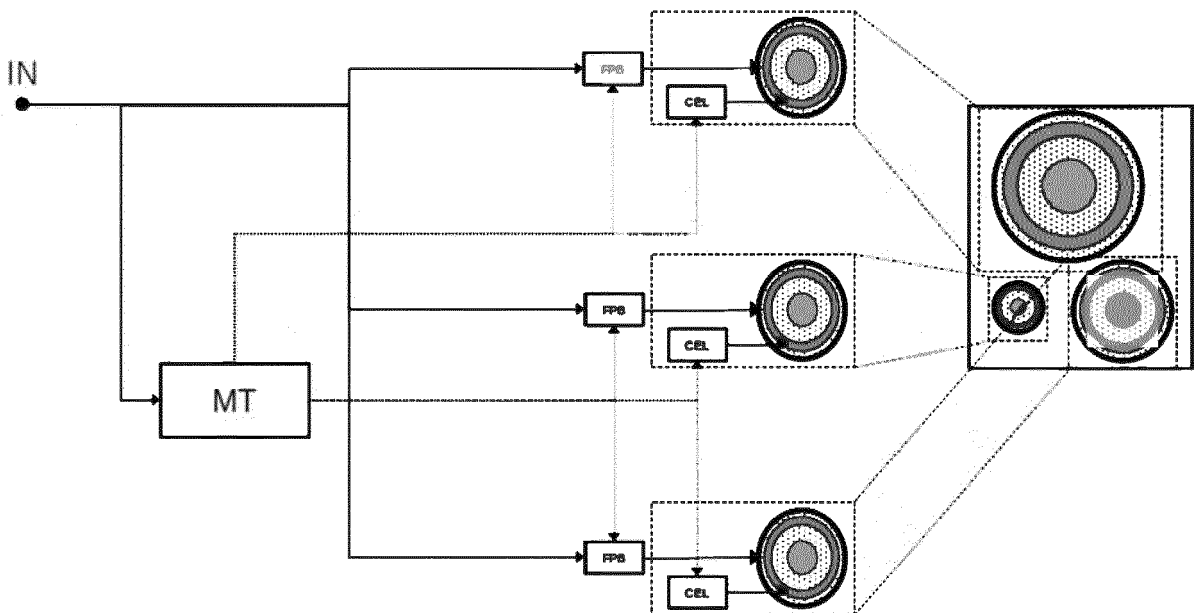
[Fig. 8]



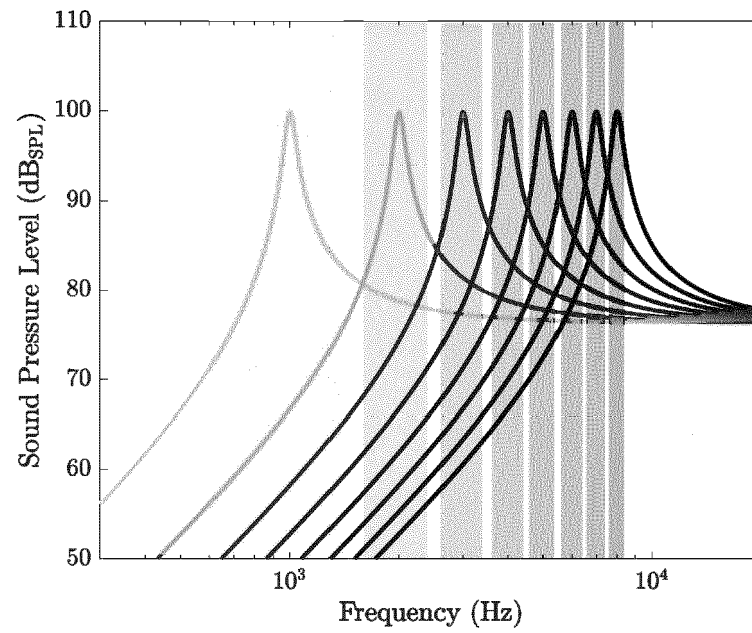
[Fig. 9]



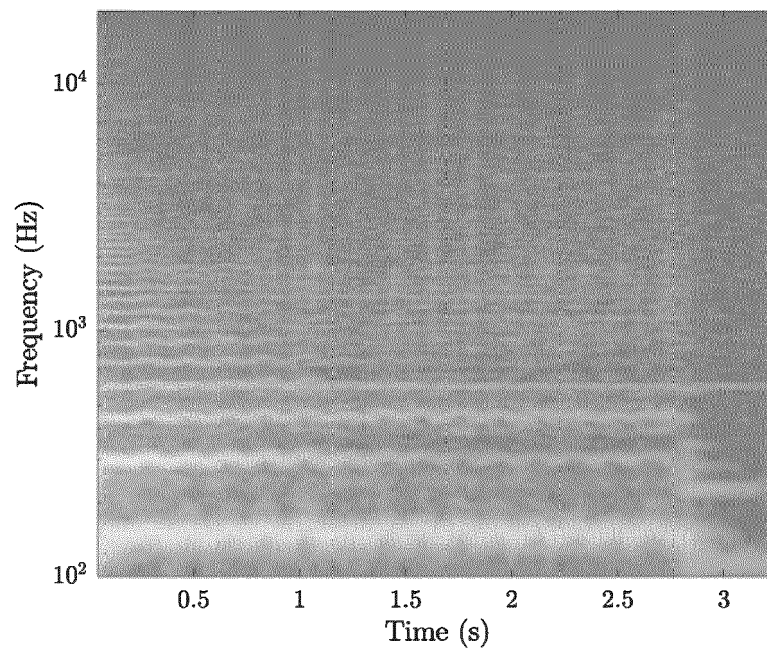
[Fig. 10]



[Fig. 11]



[Fig. 12]





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 21 5142

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

2

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	FR 3 000 354 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 27 juin 2014 (2014-06-27) * page 7, lignes 8-23 * * page 10, lignes 8-12 * * figures 1A, 1B, 1C * -----	1-13	INV. G10K9/125
A	U. A. KORDE ET AL: "The effect of a negative capacitance circuit on the out-of-plane dissipation and stiffness of a piezoelectric membrane", SMART MATERIALS AND STRUCTURES, IOP PUBLISHING LTD., BRISTOL, GB, vol. 17, no. 3, 1 juin 2008 (2008-06-01), page 35017, XP020137041, ISSN: 0964-1726 * Sections: Introduction; Conclusions * -----	1-13	
A	KODAMA ET AL: "A study of sound shielding control of curved piezoelectric sheets connected to negative capacitance circuits", JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION, ELSEVIER, AMSTERDAM , NL, vol. 311, no. 3-5, 31 octobre 2007 (2007-10-31), pages 898-911, XP022453325, ISSN: 0022-460X, DOI: 10.1016/J.JSV.2007.09.035 * abrégé * * Section : 2.1 Electrical circuits * -----	1-13	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) G10K H04R
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 20 mars 2024	Examineur Mirkovic, Olinka
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet 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	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.****EP 23 21 5142**

5 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.

20-03-2024

10	Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
15	FR 3000354 A1	27-06-2014	EP 2747452 A1 FR 3000354 A1 US 2014177881 A1	25-06-2014 27-06-2014 26-06-2014
20	-----			
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0460

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

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 9980051 B2 [0007]