

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



WIPO | PCT



(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/044604 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G01V 1/18 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2014/052414

(22) Date de dépôt international :
25 septembre 2014 (25.09.2014)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1359336 27 septembre 2013 (27.09.2013) FR

(71) Déposant : CENTRE NATIONAL DE LA RE-
CHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3 Rue Michel
Ange, F-75794 Paris Cedex 16 (FR).

(72) Inventeurs : DELEGLISE, Guillaume; Le Mollard, F-
74540 Gruffy (FR). ALLIBE, Julie; Bandrelle, F-74230
Le Bouchet-mont-charvin (FR). BALIK, Gael; 7 Avenue
de Vert-Bois, F-74960 Cran-gevrier (FR). BAUD, Jean-
Philippe; 37 B Jean Baud, F-74940 Annecy-le-vieux (FR).

(74) Mandataire : CABINET BEAUMONT; 1 Rue Champol-
lion, 38000 Grenoble (FR).

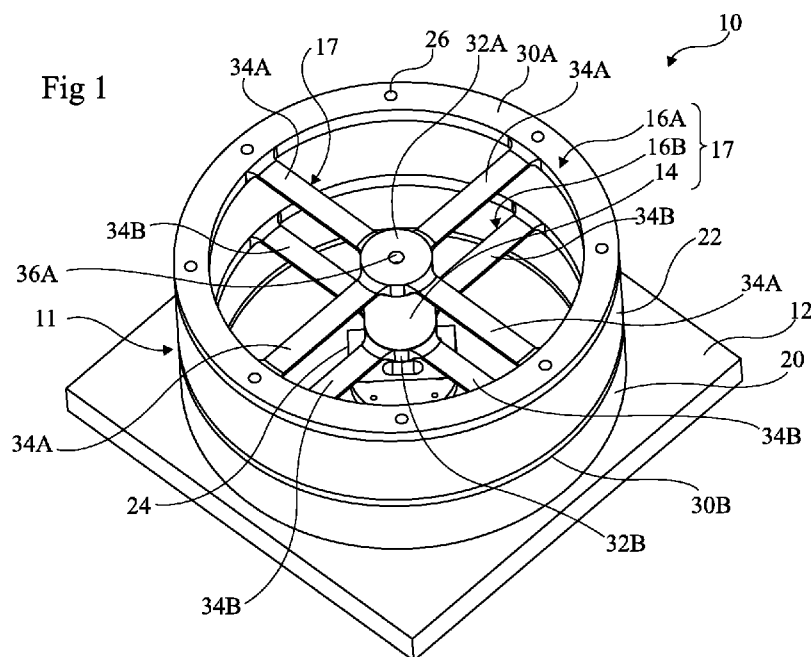
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,
TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,
LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : SEISMOMETER

(54) Titre : CAPTEUR SISMIQUE



(57) Abstract : The invention relates to a seismometer (10) for seismic waves of frequencies of between 0.05 Hz and 500 Hz, comprising a mass (14), at least one element (16A, 16B) for the suspension of the mass, connected to a sensor body (11), and a device for measuring the movement of the mass in relation to the sensor body, the assembly formed by the mass and the suspension element having a resonance frequency of between 5 Hz and 300 Hz.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2015/044604 A1



SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :
— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

L'invention concerne un capteur sismique (10) pour ondes sismiques de fréquences comprises entre 0, 05 Hz et 500 Hz comprenant une masse (14), au moins un élément de suspension (16A, 16B) de la masse relié à un corps de capteur (11) et un dispositif de mesure du déplacement de la masse par rapport au corps de capteur, l'ensemble formé par la masse et l'élément de suspension ayant une fréquence de résonance comprise entre 5 Hz et 300 Hz.

CAPTEUR SISMIQUE

La présente demande de brevet revendique la priorité de la demande de brevet français FR13/59336 qui sera considérée comme faisant partie intégrante de la présente description.

Domaine

La présente demande concerne un capteur sismique, en particulier un capteur adapté à la mesure des mouvements sismiques de faibles amplitudes et adapté au contrôle vibratoire d'une structure mécanique.

Exposé de l'art antérieur

Un exemple d'utilisation des capteurs sismiques concerne la stabilisation dynamique d'une structure mécanique. A titre d'exemple, dans les accélérateurs de particules, des faisceaux de particules, notamment d'électrons ou de positrons, sont accélérés et focalisés par plusieurs centaines de modules. Les accélérateurs de particules en cours de réalisation pourront comprendre plusieurs centaines de modules d'accélération et de focalisation de faisceaux. Ces projets de futurs accélérateurs de particules visent des dimensions de faisceaux nanométriques ce qui implique que chaque module soit positionné et stabilisé avec une précision de l'ordre de quelques dixièmes de nanomètre pour assurer le bon positionnement des faisceaux. Dans ce but, la position de chaque module est contrôlée par un ou plusieurs actionneurs pour

compenser toutes perturbations, notamment les mouvements sismiques qui sont mesurés par des capteurs sismiques.

Certains types de capteur sismique comprennent une masse, appelée masse sismique, qui peut être associée à une suspension jouant le rôle d'un ressort. Le capteur sismique peut correspondre à un accéléromètre mesurant généralement l'accélération de la masse sismique ou à un velocimètre mesurant sa vitesse.

Pour le contrôle vibratoire d'accélérateurs de particules, le capteur sismique doit détecter à la fois les mouvements sismiques naturels, que l'on observe généralement sur le spectre fréquentiel en dessous de quelques hertz et les mouvements sismiques culturels, produits par l'homme, observé sur le spectre à partir de quelques hertz. Le capteur sismique doit donc pouvoir détecter des mouvements ou ondes sismiques sur une plage de fréquences relativement large, par exemple allant de 0,01 Hz à 500 Hz, et ce pour de faibles amplitudes.

Les capteurs sismiques de type velocimètre sont plutôt adaptés à la mesure basse fréquence. A titre d'exemple, les produits commercialisés par la société Guralp Systems sous les appellations CMG-6T et CMG-3ESP sont adaptés respectivement à la mesure de fréquences variant de 0,033 à 100 Hz et de 0,0083 à 50 Hz. Les capteurs sismiques de type accéléromètre actuellement disponibles ont une plage de fonctionnement dont la borne haute peut dépasser 500 Hz mais dont la borne basse est généralement supérieure à quelques hertz pour des amplitudes de mouvement sismique en conditions calmes, c'est-à-dire pour des amplitudes de déplacement inférieures à la limite de saturation du capteur sismique. Un inconvénient est alors que, pour mesurer un mouvement sismique sur la plage de fréquence comprise entre 0,01 Hz et 500 Hz, il est nécessaire d'utiliser à la fois un capteur sismique de type accéléromètre et un capteur sismique de type velocimètre. Dans le cas de la stabilisation dynamique d'un accélérateur de particules, l'utilisation de plusieurs centaines de capteurs

sismiques peut être nécessaire, ce qui conduit à des coûts et à des encombrements importants.

Résumé

Un objet d'un mode de réalisation vise à proposer un capteur sismique qui pallie tout ou partie des inconvénients des capteurs sismiques usuels.

Selon un autre objet d'un mode de réalisation, le capteur sismique a une plage de fonctionnement à cheval sur la plage de fonctionnement d'un capteur de type vélocimètre usuel et d'un capteur sismique de type accéléromètre usuel.

Selon un autre objet d'un mode de réalisation, le capteur sismique a une plage de fonctionnement dont la borne haute est supérieure à la borne haute d'un capteur sismique de type vélocimètre actuel.

Selon un autre objet d'un mode de réalisation, le capteur sismique a une plage de fonctionnement dont la borne basse est inférieure à la borne basse d'un capteur sismique de type accéléromètre actuel.

Selon un autre objet d'un mode de réalisation, la structure du capteur sismique et sa modélisation sont simples.

Selon un autre objet d'un mode de réalisation, le capteur sismique peut facilement être utilisé dans un système de stabilisation dynamique d'une structure.

Selon un autre objet d'un mode de réalisation, l'encombrement du capteur sismique est réduit.

Ainsi, un mode de réalisation prévoit un capteur sismique pour ondes sismiques de fréquences comprises entre 0,05 Hz et 500 Hz comprenant une masse, au moins un élément de suspension de la masse relié à un corps de capteur et un dispositif de mesure du déplacement de la masse par rapport au corps de capteur, l'ensemble formé par la masse et l'élément de suspension ayant une fréquence de résonance comprise entre 5 Hz et 300 Hz.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de mesure fournit au moins un premier signal, le capteur sismique comprenant, en outre, un module de traitement adapté à fournir un

deuxième signal égal au premier signal corrigé à partir de l'inverse de la fonction de transfert du capteur sismique.

Selon un mode de réalisation, l'élément de suspension comprend un anneau extérieur, une portion centrale reliée à la masse et au moins deux bras reliant l'anneau extérieur à la portion centrale.

Selon un mode de réalisation, chaque bras est sensiblement rectiligne.

Selon un mode de réalisation, le capteur comprend un réseau de bras interconnectés reliant l'anneau extérieur à la portion centrale.

Selon un mode de réalisation, chaque bras s'étend selon une spirale.

Selon un mode de réalisation, le capteur comprend deux éléments de suspension, la masse étant maintenue entre les deux éléments de suspension.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de mesure comprend un capteur sans contact du déplacement de la masse par rapport au corps de capteur.

Selon un mode de réalisation, le capteur sans contact est un capteur de déplacement capacitif, optique, magnétique ou inductif.

Selon un mode de réalisation, l'élément de suspension est en un matériau choisi parmi le groupe comprenant l'acier, l'aluminium et un matériau composite.

Selon un mode de réalisation, l'élément de suspension correspond à un circuit imprimé.

Selon un mode de réalisation, le capteur sans contact est un capteur de déplacement capacitif et l'élément de suspension comprend une piste conductrice se prolongeant par un plot conducteur formant une électrode du capteur de déplacement capacitif.

Selon un mode de réalisation, le capteur sismique comprend, en outre, une masse supplémentaire et au moins un élément de suspension supplémentaire de la masse supplémentaire

relié au support et un dispositif de mesure supplémentaire du déplacement de la masse supplémentaire par rapport au support, l'ensemble formé par la masse supplémentaire et l'élément de suspension supplémentaire ayant une fréquence de résonance comprise entre 5 Hz et 300 Hz.

Selon un mode de réalisation, la masse est traversée par une ouverture et la masse supplémentaire est au moins en partie logée dans l'ouverture et distante de la masse.

Selon un mode de réalisation, la plage de fréquences de fonctionnement du capteur sismique est de 0,01 Hz à 500 Hz et l'ensemble masse-ressort a une fréquence de résonance comprise entre 1 Hz et 300 Hz.

Selon un mode de réalisation, l'élément de suspension délimite avec le corps de capteur une enceinte étanche comprenant un gaz à une pression supérieure strictement à la pression atmosphérique.

Un mode de réalisation prévoit également un système de stabilisation dynamique d'une structure, comprenant au moins :

un capteur sismique tel que défini précédemment, adapté à fournir un signal représentatif des mouvements du sol et/ou de la structure ;

un module de traitement adapté à fournir un signal de commande ; et

un actionneur relié à la structure, recevant le signal de commande et adapté à déplacer la structure pour compenser les mouvements du sol.

Brève description des dessins

Ces caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres, seront exposés en détails dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

la figure 1 est une vue en perspective d'un mode de réalisation d'un capteur sismique ;

la figure 2 est une vue en perspective écorchée du capteur sismique de la figure 1 ;

la figure 3 est une vue en perspective du dispositif de mesure de distance relative du capteur sismique de la figure 1 et de son dispositif de maintien réglable ;

la figure 4 représente une courbe d'évolution de l'amplitude de la fonction de transfert en accélération du capteur sismique de la figure 1 ;

la figure 5A à 5D représentent des courbes d'évolution de la densité spectrale de puissance du déplacement relatif mesuré par le capteur sismique pour différentes fréquences de résonance du capteur sismique ;

la figure 6 représente, sous la forme d'un schéma-bloc, un autre mode de réalisation d'un capteur sismique contenant par exemple le capteur sismique de la figure 1 ;

la figure 7 représente une courbe d'évolution d'une fonction de compensation mise en oeuvre par le capteur sismique de la figure 6 ;

les figures 8A, 8B, 8C représentent des courbes d'évolution de la densité spectrale de puissance du mouvement sismique mesuré par un capteur sismique selon le mode de réalisation représenté en figure 6 avec et sans correction, et par un capteur connu de type vélocimètre (CMG-6T) pour comparaison et mesuré pour un couple de paramètres (fréquence de résonance, amortissement) du capteur sismique ;

la figure 9 est une figure analogue à la figure 8C pour un autre couple de paramètres (fréquence de résonance, amortissement) du capteur sismique ;

la figure 10 représente des courbes d'évolution de la densité spectrale de puissance du déplacement relatif mesuré par un capteur sismique selon le mode de réalisation représenté en figure 6 sans correction et la densité spectrale de puissance de l'électronique de lecture du dispositif de détection de distance relative mesurée à vide ;

la figure 11 représente des courbes d'évolution de la densité spectrale de puissance du déplacement relatif mesuré par un capteur sismique connu de type vélocimètre et la densité

spectrale de puissance de bruit de ce capteur sismique mesuré selon la méthode de différence corrigée ;

la figure 12 représente, sous la forme d'un schéma-bloc, un mode de réalisation d'un système de stabilisation dynamique d'une structure mécanique contenant par exemple le capteur sismique de la figure 1 ;

les figures 13 et 14 représentent d'autres modes de réalisation d'un élément de suspension d'un capteur sismique ;

la figure 15 représente un autre mode de réalisation du dispositif de mesure de distance relative d'un capteur sismique et de son dispositif de maintien réglable ;

la figure 16 est une vue en perspective d'un autre mode de réalisation d'un capteur sismique ;

la figure 17 est une vue en perspective d'un autre mode de réalisation de l'ensemble masses-ressorts d'un capteur sismique ;

la figure 18 est une coupe de l'ensemble masses-ressorts de la figure 17 ;

la figure 19 est une vue de dessous, partielle et schématique, d'un autre mode de réalisation d'un élément de suspension avec détection de distance relative intégrée ; et

les figures 20 et 21 sont des vues en perspective avec coupe d'autres modes de réalisation d'un capteur sismique.

Description détaillée

Par souci de clarté, de mêmes éléments ont été désignés par de mêmes références aux différentes figures et, de plus, les diverses figures ne sont pas tracées à l'échelle. En outre, seuls les éléments utiles à la compréhension des modes de réalisation décrits ont été représentés et sont détaillés. En particulier, le fonctionnement du système de détection de distance relative d'un capteur sismique est bien connu de l'homme du métier et n'est pas décrit en détail. Dans la suite de la description, sauf indication contraire, les termes "sensiblement", "environ" et "de l'ordre de" signifient "à 10 % près".

Les figures 1 et 2 représentent un mode de réalisation d'un capteur sismique 10 selon l'invention.

Le capteur sismique 10 comprend un corps 11 de capteur comportant au moins un fond 12 et des entretoises annulaires 20 et 22. Le fond 12 correspond, par exemple, à une plaque. Les éléments du capteur 10 sont fixes les uns par rapport aux autres. Le corps 11 du capteur peut être disposé sur le sol dont les mouvements sont à mesurer et suivre les mouvements du sol. Dans la suite de la description, lorsqu'il est fait mention des mouvements du fond 12 du capteur, il est sous-entendu que l'ensemble du corps 11 suit les mêmes mouvements.

Le capteur sismique 10 comprend une masse 14 qui peut correspondre à un élément cylindrique à base circulaire d'axe Δ . Dans la suite de la description, on considère que l'axe Δ est vertical, Toutefois, il est clair que l'axe Δ pourrait être différent de la direction verticale selon le type de mouvements sismiques à mesurer. En outre, les adjectifs "inférieur" et "supérieur" sont définis par rapport au centre de la masse 14.

La masse 14 est maintenue par un élément de suspension supérieur 16A et un élément de suspension inférieur 16B.

La masse 14 est située entre les deux éléments de suspension 16A, 16B. Les éléments de suspension 16A, 16B jouent le rôle d'un ressort et sont adaptés à se déformer en présence d'ondes sismiques. Les éléments 14, 16A et 16B forment l'ensemble masse-ressort 17 du capteur sismique 10.

Le bord extérieur de l'élément de suspension inférieur 16B repose sur l'entretoise annulaire 20 qui elle-même est posée sur le fond 12 du capteur. Le bord extérieur de l'élément de suspension supérieur 16A repose sur l'entretoise annulaire 22 qui elle-même repose sur le bord extérieur de l'élément de suspension inférieur 16B.

Un dispositif de mesure 27 de la distance relative entre le corps 11 du capteur et l'ensemble masse-ressort 17 est disposé entre le fond 12 du capteur et l'ensemble masse-ressort 17, sensiblement à l'aplomb de la masse 14. Le dispositif de mesure

27 comprend un capteur de distance relative 24 et un dispositif de maintien à position réglable 25 du capteur de distance relative 24.

Les entretoises 20, 22 et les éléments de suspension 16A, 16B peuvent être fixés au fond 12 par des moyens de fixation, non représentés, par exemple par vissage. A titre d'exemple, des ouvertures 26 traversant les éléments de suspension 16A, 16B, les entretoises 20, 22 et le fond 12 et permettant le passage de moyens de fixation, par exemple de tiges filetées sont représentées sur les figures 1 et 2.

Les éléments de suspension 16A, 16B peuvent avoir une forme identique. Dans la suite de la description, des parties similaires ou identiques des éléments de suspension 16A, 16B sont désignées par la même référence suivie de la lettre "A" pour une partie appartenant à l'élément de suspension 16A et la lettre "B" pour une partie appartenant à l'élément de suspension 16B.

Chaque élément de suspension 16A, 16B comprend un anneau extérieur 30A, 30B, une portion centrale 32A, 32B et des bras de suspension 34A, 34B reliant la portion centrale 32A, 32B à l'anneau extérieur 30A, 30B. Les éléments de suspension 16A, 16B peuvent correspondre chacun à une pièce monolithique. A titre de variante, chaque élément de suspension 16A, 16B peut comprendre plusieurs pièces assemblées les unes aux autres. En particulier, la portion centrale 32A, 32B peut correspondre à une pièce distincte fixée aux bras 34A, 34B.

Chaque anneau extérieur 30A, 30B peut être de forme circulaire. L'anneau extérieur 30B de l'élément de suspension inférieur 16B repose sur l'entretoise 20 et l'anneau extérieur 30A de l'élément de suspension supérieur 16A repose sur l'entretoise 22.

Dans le présent mode de réalisation, chaque bras 34A, 34B s'étend sensiblement radialement par rapport à l'axe Δ . A titre d'exemple, chaque bras 34 est à section rectangulaire. Le capteur 10 peut comprendre de deux à dix bras 34A, 34B, par exemple quatre bras.

Chaque portion centrale 32A, 32B peut correspondre à une portion cylindrique à base circulaire, éventuellement traversée par une ouverture cylindrique 36A, 36B. La masse 14 peut comprendre à sa base une portion filetée 38 qui pénètre dans l'ouverture taraudée 36B de la portion centrale 32B de l'élément de suspension inférieur 16B et qui assure la fixation de la masse 14 à l'élément de suspension inférieur 16B. La masse 14 peut comprendre un trou borgne 43 à son sommet. Une vis, non représentée, peut être disposée dans le trou borgne 43 et dans l'ouverture cylindrique 36A de la portion centrale 32A de l'élément de suspension supérieur 16A pour assurer le maintien en position de la masse 14 par rapport à l'élément de suspension supérieur 16A.

Le capteur de déplacement relatif 24 est adapté à fournir un signal électrique représentatif du déplacement relatif de la masse 14 par rapport au fond 12 du capteur. A titre d'exemple, il s'agit d'un capteur de déplacement sans contact, notamment un capteur de déplacement capacitif, magnétique, optique ou inductif. A titre d'exemple, dans le mode de réalisation représenté aux figures 1 et 2, on a représenté un capteur de déplacement capacitif 24.

La figure 3 représente une vue en perspective d'un mode de réalisation du dispositif de mesure de distance relative 27 du capteur sismique 10 représenté aux figures 1 et 2, comprenant le capteur de distance relative 24 et son dispositif de maintien à position réglable 25.

Le capteur de distance relative 24 comprend deux électrodes 40, 42. L'électrode 40 est fixée à la portion centrale 32B de l'élément de suspension inférieur 16B, non représentée en figure 3. Le dispositif de maintien à position réglable 25 comprend un support 44 qui est maintenu sur une base 46 par l'intermédiaire de moyens de guidage et d'ajustement 48 de la position du support 44 par rapport à base 46. L'électrode 42 est fixée au support 44. Le support 44 peut être traversé par une ouverture 45 pour en diminuer la masse. La base 46 peut être fixée

au fond 12. Les moyens d'ajustement 48 peuvent comprendre des goupilles rectifiées, une vis et des rondelles Belleville. La base 46, les moyens d'ajustement 48, le support 44 et l'électrode inférieure 42 sont disposés dans l'ouverture délimitée par l'entretoise inférieure 20 de façon que l'électrode 42 soit située à l'aplomb de l'électrode 40. La position verticale du support 44 par rapport à la base 46 est modifiée par les moyens d'ajustement 48 pour ajuster l'écart entre les électrodes 40, 42 et se positionner dans la zone de fonctionnement du capteur capacitif 24.

Le capteur de distance relative 24 comprend, en outre, un module de conditionnement du signal 54 auquel les électrodes 40, 42 sont reliées par des fils 50, 52. Le module de conditionnement du signal 54 est adapté à fournir un signal électrique v , par exemple un courant ou une tension, représentatif de l'écart entre les deux électrodes 40, 42. Le module 54 peut correspondre à un circuit électronique dédié et intégré au capteur.

A titre d'exemple, le capteur capacitif 24 peut correspondre au capteur capacitif commercialisé par la société Physik Instrumente (PI) sous l'appellation D-015 pour les éléments 40, 42, 50 et 52 et E-509 pour le module 54.

Le fonctionnement du mode de réalisation du capteur sismique 10 est le suivant. En présence de mouvements sismiques, le fond 12 suit les mouvements du sol et la masse 14 tend à se déplacer par rapport au fond 12 en raison de la déformation des éléments de suspension 16A, 16B. Ce déplacement relatif est mesuré par le capteur de déplacement sans contact 24.

En première approximation, le capteur sismique 10 est modélisable par un oscillateur mécanique de type masse-ressort.

Dans un repère fixe, le capteur sismique 10 mesure le déplacement relatif $\Delta z = x - y$ avec x le déplacement de la masse 14 par rapport à un repère fixe et y le déplacement du sol par rapport à ce même repère fixe. L'ensemble masse-ressort 17 est caractérisé par sa fonction de transfert H liant le déplacement

relatif Δz au mouvement du sol y . Le comportement du capteur sismique 10 correspond, en première approximation, à celui d'un accéléromètre de type masse-ressort. La fonction de transfert H est alors donnée par la relation (1) suivante, dans le domaine de Laplace :

$$H(s) = \frac{x}{y} = \frac{\frac{2\xi}{\omega_c} s + 1}{\frac{1}{\omega_c^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_c} s + 1} \quad (1)$$

où ω_0 est la pulsation propre du capteur sismique 10 et ξ est le terme d'amortissement du capteur sismique 10. La pulsation propre ω_0 et le terme d'amortissement ξ sont donnés par les relations (2) suivantes :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{h}{2k} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

où m est la somme de la masse 14 et de la partie cylindrique centrale 32A et 32B des éléments de suspension 16A et 16B, k est la constante de raideur équivalente des éléments de suspension 16A, 16B et h est le coefficient de frottement équivalent des éléments de suspension 16A, 16B.

Si on considère que la fonction de transfert du capteur de déplacement capacitif 24 est une constante C sur la plage fréquentielle de fonctionnement du capteur sismique, alors la fonction de transfert P du capteur sismique 10 entre le signal électrique $v=C.\Delta z$ fourni par le capteur capacitif 24 et le déplacement du sol y est donnée par la relation (3) suivante, dans le domaine de Laplace :

$$P(s) = \frac{v}{y} = C(H - 1) \quad (3)$$

Lorsque le signal électrique v est une tension, la constante C est exprimée en V/m.

La fonction de transfert A du capteur sismique 10 entre le signal électrique v fourni par le capteur de déplacement capacitif 24 et l'accélération $\ddot{y}$ du sol est donnée par la relation (4) suivante, dans le domaine de Laplace :

$$A(s) = \frac{v}{\ddot{y}} = \frac{C(H - 1)}{s^2} \quad (4)$$

La figure 4 représente un exemple de courbe d'évolution C_1 de l'amplitude de la fonction de transfert A en fonction de la fréquence.

La courbe C_1 comprend successivement une première portion P_1 sensiblement constante sur une première plage de fréquences ΔF_1 , une portion P_2 en forme de pic autour de la fréquence de résonance f_0 du capteur sismique 10 sur une deuxième plage de fréquences ΔF_2 et une portion décroissante P_3 sur une troisième plage de fréquences ΔF_3 .

La fréquence de résonance f_0 et par conséquent les plages de fréquence ΔF_1 , ΔF_2 et ΔF_3 peuvent être ajustées en modifiant la masse m , la constante de raideur k et le terme d'amortissement ξ du capteur sismique 10. Ces paramètres peuvent être modifiés indépendamment les uns des autres. En particulier, la constante de raideur k et le coefficient de frottement h peuvent être ajustés en modifiant les dimensions des éléments de suspension 16A, 16B et/ou le matériau constituant les éléments de suspension 16A, 16B.

De façon usuelle, la plage de fonctionnement d'un capteur sismique de type accéléromètre dont le fonctionnement suit un modèle masse-ressort correspond à la plage de fréquences ΔF_1 pour laquelle la fonction de transfert A est sensiblement constante. En effet, dans ce cas, le signal v fourni par le capteur sismique est proportionnel à l'accélération du sol $\ddot{y}$ tel que $v = (mC/k) \cdot \ddot{y}$ sur toute la plage de fonctionnement ΔF_1 . De ce fait, de façon usuelle pour les accéléromètres, la fréquence de résonance f_0 est choisie pour être supérieure à la borne supérieure de la plage de fonctionnement souhaitée du capteur sismique. La borne inférieure de la plage de fonctionnement dépend plutôt du bruit des composants électroniques et du niveau du signal à mesurer. Généralement, on considère cette limite basse comme étant la fréquence pour laquelle le rapport signal sur bruit du capteur sismique est inférieur à l'unité.

En particulier, pour une application concernant la stabilisation dynamique d'une structure, le niveau d'accélération dérivé du déplacement sismique à mesurer diminue avec la fréquence. A basse fréquence, la limite est donc liée au fait que l'amplitude du signal à mesurer est inférieure au niveau de bruit du capteur sismique. Ainsi, pour les capteurs sismiques usuels de type accéléromètre, la borne basse de la plage de fonctionnement est généralement supérieure à quelques hertz pour la mesure de l'accélération du sol en condition normale.

Les inventeurs ont mis en évidence qu'en utilisant le capteur sismique, dont le fonctionnement suit un modèle masse-ressort, sur une plage de fréquence contenant la résonance du capteur sismique 10, c'est à dire allant de ΔF_1 à ΔF_3 , on bénéficie alors d'une amplification du signal mesuré induite par la résonance. Ceci permet donc d'améliorer le rapport signal sur bruit autour de la résonance. Dans le cas de l'application citée précédemment, avec une fréquence de résonance du capteur sismique 10 à basse fréquence, on abaisse la limite basse fréquence de la plage de fonctionnement. Les matériaux utilisés pour réaliser la masse 14 et les éléments de suspension 16A, 16B, et les dimensions de ces pièces sont déterminés pour obtenir la fréquence de résonance f_0 et le terme d'amortissement ξ recherchés (cf relations (2)).

Selon un mode de réalisation, la masse 14 est en acier, en plomb ou en aluminium. De préférence, la masse 14 est en acier.

Selon un mode de réalisation, la masse 14 est supérieure ou égale à 50 grammes. Ceci permet de repousser des modes de résonance parasites en dehors de la plage de fréquences de fonctionnement du capteur sismique 10.

Selon un mode de réalisation, les éléments de suspension 16A, 16B sont en aluminium, en acier ou en matériau composite. A titre d'exemple, le matériau composite comprend des fibres de verre et de la résine époxy ou des fibres de carbone et de la résine époxy.

Selon un mode de réalisation, les entretoises 20, 22, la plaque 12, le support 44 et la base 46 sont en aluminium ou en acier, de préférence en aluminium.

Lorsque la masse 14 est en acier et lorsque les éléments de suspension 16A, 16B sont en aluminium, les dimensions totales du capteur sismique 10 peuvent être les suivantes :

diamètre extérieur des éléments de suspension 16A, 16B : entre 40 mm et 400 mm ;

diamètre intérieur des éléments de suspension 16A, 16B : entre 8 mm et 80 mm ;

l'épaisseur de chaque bras 34A, 34B : entre 0,1 mm et 10 mm ; et

longueur de chaque bras 34A, 34B mesurée radialement par rapport à l'axe Δ : entre 16 mm et 180 mm.

Sauf indication contraire, pour réaliser les courbes décrites par la suite, un capteur sismique 10 a été utilisé pour lequel la masse 14 était en acier et les éléments de suspension 16A, 16B, les entretoises 20, 22, et la plaque 12 étaient en aluminium et pour lequel les dimensions étaient les suivantes :

diamètre extérieur des éléments de suspension 16A, 16B : 250 mm ; et

épaisseur de chaque bras 34A, 34B : 2 mm.

Les figures 5A à 5D représentent les courbes d'évolution C_2 , C_3 et C_4 de la densité spectrale de puissance PSD, exprimée en $(m/s^2)/\sqrt{Hz}$, de l'accélération du sol en fonction de la fréquence pour trois capteurs sismiques 10 ayant des fréquences de résonance respectivement de 14 Hz, de 72 Hz et de 144 Hz et pour un terme d'amortissement de sensiblement 0,02. Les fréquences de résonance f_0 de 14 Hz, de 72 Hz et de 144 Hz ont été respectivement obtenues avec une masse 14 de 936 g et des éléments de suspension tels que représentés sur la figure 13 décrite par la suite, une masse 14 de 936 g et des éléments de suspension tels que représentés en figure 1 et une masse 14 de 236 g et des éléments de suspension tels que représentés en figure 1.

Les figures 5A à 5D représentent, en outre, une courbe d'évolution C_5 de la densité spectrale du bruit de l'électronique (conditionneur de signaux) du capteur de déplacement capacitif 24. La courbe C_5 est une mesure de la sortie du module de conditionnement de signal 54 non connecté aux électrodes 40 et 42.

Lorsque l'amplitude du signal de déplacement du sol mesuré est trop faible, les courbes de densité spectrale de puissance du signal mesuré C_2 , C_3 et C_4 rejoignent la courbe de densité spectrale de bruit. C'est ce qui fixe les limites de la plage de fonctionnement du capteur. Le fait de diminuer la fréquence de résonance f_0 du capteur sismique permet d'améliorer le rapport signal sur bruit aux basses fréquences. Toutefois, ceci entraîne une dégradation du rapport signal à bruit aux hautes fréquences. La fréquence de résonance f_0 et le terme d'amortissement ξ sont choisis pour optimiser la plage de fréquences de fonctionnement du capteur selon les besoins de l'application.

Selon un mode de réalisation, pour détecter des mouvements sismiques dans une plage de 0,05 Hz à 500 Hz, la fréquence de résonance du capteur sismique 10 est comprise entre 5 Hz et 300 Hz.

Selon un mode de réalisation, pour détecter des mouvements sismiques dans une plage de 0,01 Hz à 500 Hz, la fréquence de résonance du capteur sismique 10 est comprise entre 1 Hz et 300 Hz.

Selon un mode de réalisation, pour détecter des mouvements sismiques dans une plage de 0,05 Hz à 500 Hz, le terme d'amortisseur ξ du capteur sismique 10 est compris entre 0,001 et 0,5.

Selon un mode de réalisation, pour détecter des mouvements sismiques dans une plage de 0,01 Hz à 500 Hz, le terme d'amortisseur ξ du capteur sismique 10 est compris entre 0,001 et 0,5.

La sensibilité d'un capteur est égale au rapport du signal de sortie du capteur en fonction de la variation du signal d'entrée. Selon un mode de réalisation, la sensibilité du capteur sismique 10 n'est pas constante sur la plage de fréquences de fonctionnement du capteur sismique. Ceci permet d'augmenter le rapport signal à bruit en exploitant l'amplification mécanique de l'ensemble masse-ressort, en particulier pour les fréquences inférieures et proches de la résonance de l'ensemble masse-ressort.

Selon un mode de réalisation, la sensibilité est amplifiée d'un facteur supérieur à 1 (et au maximum égal à $1/2\xi$ pour les fréquences supérieures à :

$$2\pi f_0 \sqrt{\frac{1}{2(1 - 2\xi^2)}}$$

Selon un mode de réalisation, la masse 14 n'est reliée au corps 11 du capteur sismique 10 que par les éléments de suspension 16A, 16B. Le capteur sismique 10 ne comprend pas de boucle de rétroaction comportant un système actif de modification du déplacement de la masse 14. Sur une partie de la plage de fonctionnement du capteur sismique 10, le signal v fourni par le capteur sismique 10 n'est pas proportionnel à l'accélération du sol $\ddot{y}$ avec un rapport de proportionnalité constant. Il est alors prévu de corriger le signal v en prenant en compte la fonction de transfert A du capteur sismique 10.

La figure 6 représente sous la forme d'un schéma-bloc un autre mode de réalisation d'un capteur sismique 60. Le capteur sismique 60 comprend le capteur sismique 10 (Sensor), selon le mode de réalisation décrit précédemment ou selon les modes de réalisation décrits par la suite, qui est adapté à détecter les mouvements du sol 61 (Ground Motion) et qui fournit le signal électrique v à un convertisseur analogique-numérique 62 (ADC). Le convertisseur convertit le signal analogique v en un signal numérique v_{NUM} à un module de traitement 64 (Processor). Le module de traitement 64 fournit un signal numérique corrigé v_{CNUM} à un

convertisseur numérique-analogique 66 (DAC). Le convertisseur 66 fournit un signal analogique corrigé v_C . Le signal analogique corrigé v_C correspond sensiblement au signal analogique v_C qui a été corrigé pour tenir compte de la fonction de transfert A du capteur sismique 10. Le convertisseur 66 peut ne pas être présent. Dans ce cas, le capteur sismique 60 fournit directement le signal numérique v_{NUM} .

Le module de traitement 64 peut correspondre à un circuit électronique dédié. A titre de variante, le module de traitement 64 correspond à un processeur, par exemple un ordinateur, qui exécute les instructions d'un programme d'ordinateur.

La figure 7 représente une courbe d'évolution C_6 de l'amplitude de la fonction de correction F utilisée par le module de traitement 64 dans le cas où la fréquence de résonance f_0 du capteur sismique est de 84 Hz et le terme d'amortissement ξ est de 0,015.

Selon un mode de réalisation, la fonction de correction F correspond à l'inverse de la fonction de transfert P ou A , selon que l'on souhaite une mesure en déplacement ou en accélération en sortie du capteur 60. Un avantage est que les fonctions de transfert P ou A sont faciles à inverser. Ceci peut ne pas être le cas avec les fonctions de transfert des capteurs sismiques actuellement disponibles dans le commerce.

Le module de traitement 64 détermine le produit, dans le domaine fréquentiel, entre le signal v_{NUM} et la fonction de correction F .

Les figures 8A, 8B et 8C représentent des courbes d'évolution C_7 , C_8 et C_9 de la densité spectrale de puissance, exprimée en m^2/Hz , respectivement du déplacement relatif z mesuré par le capteur sismique 10, c'est-à-dire en l'absence de correction, du déplacement du sol y mesuré par le capteur sismique 60, c'est-à-dire avec correction, et du déplacement du sol y mesuré par un capteur sismique de comparaison. Le capteur sismique de comparaison correspond au capteur sismique de type velocimètre

commercialisé par la société Güralp Systems sous l'appellation CMG-6T et a une plage de mesure fiable (pour ces niveaux de mouvement) de 1 Hz à 100 Hz. Pour les comparaisons à plus haute fréquence, un capteur sismique de type accéléromètre commercialisé par la société Wilcoxon sous l'appellation 731A a été utilisé, dont la plage de mesure fiable (pour ces niveaux de mouvement) est de 10 Hz à 300 Hz et dont la mesure n'est pas représentée dans les figures. Le capteur sismique 10 utilisé pour obtenir les courbes C₇ et C₈ avait une fréquence de résonance de 84Hz et un terme d'amortissement ξ de 0,015. La correction réalisée par le module de traitement 64 mettait en oeuvre la fonction de correction F représentée en figure 7.

La résonance à 84 Hz apparaît sur la courbe C₇ en l'absence de correction. Sur la courbe C₈, pour laquelle une correction a été réalisée, l'effet de la résonance a été supprimé. En outre, la courbe C₈ suit la courbe C₉ sur une plus grande plage de fréquences que la courbe C₇, sensiblement de 7 Hz à 210 Hz.

La figure 9 représente des courbes d'évolution C₁₀, C₁₁ et C₁₂ obtenues dans des conditions identiques aux courbes respectivement C₇, C₈ et C₉ à la différence que la fréquence de résonance du capteur sismique était de 73 Hz et que le terme d'amortissement ξ était de 0,035. Le décalage de la fréquence de résonance vers les basses fréquences ainsi que l'augmentation du terme d'amortissement ξ a permis d'améliorer la plage de fonctionnement du capteur sismique 60 aux basses fréquences puisque l'adéquation entre la courbe C₁₁, qui correspond au déplacement corrigé mesuré par le capteur sismique 60, et la courbe C₁₂, qui correspond au déplacement mesuré par le capteur sismique CMG-6T s'étend jusqu'à la fréquence 2 Hz.

La figure 10 représente une courbe d'évolution C₁₃ de la densité spectrale de puissance, exprimée en m²/Hz, du déplacement relatif z mesuré par le capteur sismique 10, c'est-à-dire en l'absence de correction, et une courbe d'évolution C₁₄ de la densité spectrale du bruit de l'électronique du capteur de déplacement capacitif 24. La courbe C₁₃ a été obtenue avec une

fréquence de résonance de 74 Hz et un terme d'amortissement ξ de 0,015. La plage de fonctionnement du capteur sismique 10 qui correspond sensiblement à la plage de fréquences pour laquelle la courbe C_{13} est au-dessus de la courbe C_{14} , s'étend sensiblement de 2 Hz à 250 Hz.

La figure 11 représente une courbe d'évolution C_{15} de la densité spectrale de puissance, exprimée en m^2/Hz , du déplacement du sol y mesuré par le capteur sismique CMG-6T et une courbe d'évolution C_{16} de la densité spectrale du bruit du capteur sismique CMG-6T. La plage de fonctionnement du capteur sismique CMG-6T qui correspond sensiblement à la plage de fréquences pour laquelle la courbe C_{15} est au-dessus de la courbe C_{16} , s'étend sensiblement de 1 Hz à 100 Hz.

Les courbes C_{13} , C_{14} , C_{15} et C_{16} des figures 10 et 11 ont été mesurées pour des mouvements sismiques sensiblement de même amplitude.

La borne haute de la plage de fonctionnement du mode de réalisation du capteur sismique 10 est supérieure à la borne haute de la plage de fonctionnement du capteur CMG-6T de type vélocimètre de plus de 100 Hz.

La figure 12 représente, sous la forme d'un schéma-bloc, un mode de réalisation d'un système 70 de stabilisation dynamique d'une structure 72 par rapport aux mouvements sismiques du sol 74.

Le système comprend le capteur sismique 10 (Sensor), selon le mode de réalisation décrit précédemment ou selon les modes de réalisation décrits par la suite, qui mesure les mouvements sismiques du sol 74 (Ground) et fournit le signal électrique v à un convertisseur analogique numérique 76 (ADC). Le convertisseur 76 convertit le signal analogique v en un signal numérique v_{NUM} qui est fourni à un module de correction 78 (Correction Unit). Le module de correction 78 fournit un signal numérique de commande C_{NUM} à un convertisseur numérique-analogique 80 (DAC). Le convertisseur 80 fournit un signal analogique de commande C à un actionneur 82 (Vibrator) relié à la structure 72

à stabiliser. L'actionneur déplace la structure 72 pour compenser les mouvements du sol en temps réel. Le module de correction 78 peut correspondre à un circuit électronique dédié. A titre de variante, le module de correction 78 correspond à un processeur, par exemple un ordinateur, qui exécute les instructions d'un programme d'ordinateur. Le module de correction 78 réalise la compensation du signal fourni par le capteur sismique 10 comme cela a été décrit précédemment en relation avec la figure 6. Il détermine, en outre, à partir du signal corrigé la consigne C à appliquer pour compenser le déplacement mesuré.

A titre de variante, le capteur sismique 10 peut être remplacé par le capteur sismique 60. Dans ce cas, le signal fourni au module de correction 78 est déjà corrigé pour compenser la résonance du capteur sismique 10. A titre de variante, le capteur sismique peut mesurer les mouvements de la structure 72 au lieu des mouvements du sol 74.

La figure 13 représente un autre mode de réalisation d'une suspension 90 qui peut notamment être utilisée à la place des éléments de suspensions 16A et/ou 16B. L'élément de suspension comprend un anneau extérieur 92, une portion centrale 94 et des bras 96 reliant l'anneau extérieur 92 à la portion centrale 94. Chaque bras 96 suit une spirale depuis la portion centrale 94 jusqu'à l'anneau extérieur 92. L'élément de suspension 90 peut être une pièce monolithique, d'épaisseur constante, obtenue par exemple, par découpe d'une plaque. L'anneau extérieur 92 peut être de forme circulaire. L'élément de suspension 90 peut comprendre de deux à dix bras 96, par exemple quatre bras. Des ouvertures 98 peuvent être prévues dans l'anneau extérieur 92 pour permettre le passage de moyens de fixation, par exemple des vis ou tiges filetées, de l'élément de suspension 90 aux autres pièces du capteur sismique. La portion centrale 94 peut être traversée par une ouverture 99.

La figure 14 représente un autre mode de réalisation d'une suspension 100 qui peut notamment être utilisé à la place des éléments de suspensions 16A et/ou 16B. L'élément de suspension

100 comprend un anneau extérieur 102, une portion centrale 104 et un réseau de bras 106 interconnectés reliant l'anneau extérieur 102 à la portion centrale 104. L'élément de suspension 100 peut être une pièce monolithique, d'épaisseur constante, obtenue par exemple, par découpe d'une plaque. L'anneau extérieur 102 peut être de forme circulaire. Le réseau de bras 106 peut présenter plusieurs plans de symétrie. Certains bras 106 peuvent avoir une forme rectiligne tandis que d'autres peuvent être courbes.

La figure 15 représente un autre mode de réalisation d'un dispositif 110 de mesure du déplacement relatif entre la masse 14 et le corps 11 du capteur sismique qui peut être utilisé à la place du dispositif 27. Ce dispositif 110 comprend tous les éléments du dispositif de mesure de la distance relative 27 et comprend, en outre, deux paires d'électrodes 112, 114 et 116, 118 supplémentaires. Chaque paire d'électrodes supplémentaires comprend une électrode 114, 118 fixée au support 44 et une électrode 112, 116 destinée à être fixée à l'élément de suspension inférieur 16A, non représentés en figure 15. A titre d'exemple, chaque paire d'électrodes est disposée au sommet d'un triangle équilatéral. Toutes les électrodes peuvent être reliées au module de polarisation et de traitement 54. Le module 54 est adapté à déterminer l'écart entre les électrodes de chaque paire d'électrode. Trois écarts sont ainsi déterminés. Le module 54 peut déterminer, à partir des valeurs des trois écarts, l'inclinaison de la masse 14 par rapport au fond 12 du capteur. Ceci permet de déterminer les composantes du vecteur accélération de la masse sismique 14 le long de l'axe Δ et perpendiculairement à l'axe Δ .

La figure 16 représente un mode de réalisation d'un capteur sismique 120 qui a la même structure que le capteur sismique 10 de la figure 1 à la différence que les éléments de suspension 16A et 16B sont remplacés par des éléments de suspension 122A, 122B qui correspondent chacun au mode de réalisation de l'élément de suspension 90 représenté en figure 13, que le dispositif de mesure du déplacement relatif 27 est remplacé par le dispositif de mesure du déplacement relatif 110

représenté en figure 15 et que la masse 14 est fixée aux extrémités à des pièces de liaison 124, 126, la pièce de liaison 126 étant fixée à l'élément de suspension supérieur 122A et la pièce de liaison 124 étant fixée à l'élément de suspension inférieur 122B. A titre d'exemple, chaque pièce de liaison 124, 126 peut comprendre deux parties fixées l'une à l'autre en prenant en sandwich l'élément de suspension associé.

Les figures 17 et 18 sont des vues partielles, respectivement en perspective et en coupe, d'un autre mode de réalisation d'un ensemble masses-ressorts 130 de capteur sismique. L'ensemble masse-ressort 130 comprend deux systèmes masse-ressort 132, 134 en partie imbriqués l'un dans l'autre.

Le système masse-ressort 132 comprend une masse sismique 136 cylindrique à base circulaire d'axe Δ' traversée par une ouverture cylindrique 138 d'axe Δ' . Le plan de coupe de la figure 18 contient l'axe Δ' . Le système masse-ressort 134 comprend une masse sismique 140 cylindrique à base circulaire d'axe Δ' logée dans l'ouverture 138. Les extrémités 142, 144 de la masse 140 se projettent hors de l'ouverture 138 au-dessus de la masse sismique 136 et au-dessous de la masse sismique 136. Un interstice 146 est présent entre la masse 140 et la masse sismique 136 de sorte que la masse sismique 140 n'est pas en contact avec la masse sismique 136.

La masse sismique 136 est maintenue par un élément de suspension supérieur 148A et un élément de suspension inférieur 148B. La masse sismique 136 est située entre les deux éléments de suspension 148A, 148B. Les éléments de suspension 148A, 148B correspondent, par exemple, à l'élément de suspension 90 représenté en figure 13. Les éléments de suspension 148A, 148B comprennent chacun une ouverture 150A, 150B pour permettre le passage de la masse 140.

La masse sismique 140 est maintenue à l'extrémité 142 par un élément de suspension supérieur 152A et à l'extrémité 144 par un élément de suspension inférieur 152B. Les éléments de suspension 152A, 152B correspondent, par exemple, à l'élément de

liaison 90 représenté en figure 13. Les éléments de suspension 148A et 148B sont situés entre les éléments de suspension 152A et 152B.

Chaque système masse-ressort 132, 134 est associé à un dispositif de mesure de distance relative, non représenté, par exemple un capteur de déplacement sans contact capacitif. Le capteur de déplacement sans contact du système masse-ressort 132 est adapté à fournir un signal électrique v_1 , par exemple un courant ou une tension, représentatif du déplacement relatif de la masse sismique 136 par rapport au sol. Le capteur de déplacement sans contact du système masse-ressort 134 est adapté à fournir un signal électrique v_2 , par exemple un courant ou une tension, représentatif du déplacement relatif de la masse sismique 140 par rapport au sol.

Dans le mode de réalisation représenté en figure 18, les éléments de suspension 148A, 148B, 152A et 152B sont identiques. Toutefois, les éléments de suspension 148A, 148B, 152A et 152B pourraient être différents.

Les systèmes masse-ressort 132, 134 ont des caractéristiques différentes, par exemple des fréquences de résonance différentes et/ou des termes d'amortissement différents. Ceci peut être obtenu en utilisant des masses sismiques 136, 140 différentes et/ou des éléments de suspension 148A, 148B, 152A, 152B différents.

Si on appelle H_1 la fonction de transfert du système masse-ressort 132 et H_2 la fonction de transfert du système masse-ressort 134 définie de façon analogue à la fonction de transfert H et dans le cas où les capteurs de déplacement sans contact des systèmes masse-ressort 132, 134 sont des capteurs de déplacement capacitifs identiques de fonction de transfert C constante, alors la fonction de transfert P' entre la somme des signaux électriques v_1+v_2 et le mouvement du sol y est donnée par la relation (5) suivante, dans le domaine de Laplace :

$$P'(s) = \frac{v_1 + v_2}{y} = C(H_1 + H_2 - 2) \quad (5)$$

La fonction de transfert A' entre la somme des signaux électriques v_1+v_2 et l'accélération $\ddot{y}$ du sol est donnée par la relation (6) suivante, dans le domaine de Laplace :

$$A'(s) = \frac{v}{\ddot{y}} = \frac{C(H_1 + H_2 - 2)}{s^2} \quad (6)$$

On bénéficie ainsi des résonances de chaque système masse-ressort 132, 134.

La figure 19 est une vue de dessous partielle et schématique d'un mode de réalisation de l'élément de suspension 160. L'élément de suspension 160 correspond à un circuit imprimé. Une piste conductrice 162 s'étend sur une face de l'élément de suspension 160 et se prolonge par un plot conducteur 164. La piste conductrice 162 et le plot conducteur 164 sont, par exemple, en cuivre. La piste conductrice 162 peut être reliée, à son extrémité opposée au plot 164, au module de polarisation et de traitement 54. Le plot conducteur 162 correspond à une électrode du capteur de déplacement capacitif. L'autre électrode du capteur de déplacement capacitif peut également correspondre à une piste conductrice d'un circuit imprimé.

La figure 20 représente un autre mode de réalisation d'un capteur sismique 170 plus compact. Les éléments communs aux modes de réalisation des capteurs sismiques 10 et 120 décrits précédemment respectivement en relation avec les figures 2 et 16 sont désignés par les mêmes références. Les éléments de suspension 122A, 122B sont fixés par collage au centre à la masse sismique 14. Dans ce mode de réalisation, le capteur de déplacement capacitif 24 est situé au-dessus du système masse-ressort 17. L'électrode basse 42 est fixée par collage à l'élément de suspension 122A et l'électrode haute 40 est fixée par collage à un élément de suspension de réglage 173. Le réglage de la position verticale du capteur de distance relative 24 est effectué par appui sur un élément d'appui 177 collé à l'élément de suspension 173.

Le capteur sismique 170 comprend un corps cylindrique 174 comprenant un fond 175, une portion latérale cylindrique 176 et un capot 178. La portion latérale 176 comprend un épaulement 180 sur lequel repose le bord extérieur de l'élément de suspension 122B. Une entretoise 182 repose sur le bord extérieur de l'élément de suspension 122A. Le bord extérieur de l'élément de suspension 173 repose sur l'entretoise 182. Le capot 178 est maintenu en appui contre l'élément de suspension 173 par le serrage des vis, seules les ouvertures 179 pour le passage des vis étant représentées en figure 20.

Les éléments de suspension 122A, 122B peuvent être d'un autre type que ceux représentés en figure 13. Dans le mode de réalisation représenté en figure 20, les éléments de suspension 122A, 122B, et 173 sont identiques. Toutefois, les éléments de suspension 122A, 122B, et 173 peuvent être différents.

Selon un mode de réalisation les électrodes 40 et 42 sont orientées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre.

La figure 21 représente un autre mode de réalisation d'un capteur sismique 190 qui a la même structure que le capteur sismique 10 représenté en figure 1 à la différence que les éléments de suspension 16A et 16B sont remplacés par des éléments de suspension 192A, 192B comprenant chacun une membrane 194A, 194B non ajourée. Dans le présent mode de réalisation, chaque portion centrale 32A, 32B correspond à une pièce distincte fixée à la membrane 194A, 194B correspondante. Selon un mode de réalisation, l'épaisseur de la membrane 194A, 194B est comprise entre 0,05 mm et 5 mm.

L'entretoise annulaire 20, le fond 12 et l'élément de suspension inférieur 192B délimitent une cavité 196 étanche. Pour améliorer l'étanchéité de la cavité 196, un joint d'étanchéité 198 annulaire peut être prévu entre l'élément de suspension inférieur 192B et l'entretoise annulaire 20 et un joint d'étanchéité 200 annulaire peut être prévu entre l'entretoise annulaire 20 et le fond 12. Deux ouvertures 202 traversent l'entretoise annulaire 20. Le corps 11 comprend un manchon 204,

fixé au fond 12, et entourant les entretoises 20, 22. Le manchon 204 comprend une ouverture traversante 206 qui expose les ouvertures 202. Des raccords 208 peuvent être fixés aux ouvertures 202 pour relier le capteur à un dispositif de fourniture de gaz.

Les ouvertures 202 permettent de modifier la pression dans la cavité 196 par apport ou retrait de gaz. A titre de variante, une seule ouverture 202 peut être présente. Selon un mode de réalisation, la cavité 196 est remplie d'air. Selon un autre mode de réalisation, la cavité 196 est remplie d'un gaz ou d'un mélange de gaz, notamment d'au moins un gaz neutre. Le dispositif de mesure 27 n'est pas représenté en figure 21. Il peut être situé au-dessus de la portion centrale 32A. A titre de variante, le dispositif de mesure 27 peut, au moins en partie, être disposé dans la cavité 196.

En fonctionnement, les ouvertures 202 sont fermées de façon étanche et une surpression est maintenue dans la cavité 196. La surpression est déterminée de façon à compenser l'action de la masse 14 sur l'élément de suspension inférieur 192B en l'absence d'ondes sismiques. De préférence, la surpression est déterminée de façon que, en l'absence d'ondes sismiques, la membrane 194B est sensiblement horizontale. La différence entre la pression dans la cavité 196 et la pression atmosphérique est de préférence inférieure à 1 bar (10^5 Pa).

Le principe de fonctionnement du capteur sismique 190 est le même que celui du capteur sismique 10 décrit précédemment. Toutefois, la fonction de transfert H de l'ensemble masse-ressort liant le déplacement relatif Δz au mouvement du sol y peut être différente de la relation (1) indiquée précédemment.

Le capteur sismique 190 permet, de façon avantageuse, de diminuer encore davantage la fréquence de résonance minimale et de diminuer la borne minimale de la plage de fonctionnement du capteur sismique.

En effet, la mise en surpression de la cavité 196 permet l'utilisation de membranes 194A, 194B ayant une raideur inférieure à celle des éléments de suspension 16A, 16B, 90, 100, 122A, 122B

décrits dans les modes de réalisation précédents. Toutefois, la cavité 196 en surpression contribue à la raideur totale du capteur sismique 190. Toutefois, les inventeurs ont mis en évidence que la contribution de la cavité 196 à la raideur totale de la cavité 196 peut être minimisée en augmentant le volume de la cavité 196. De préférence, le volume de la cavité 196 est supérieur à 200 cm³.

Des modes de réalisation particuliers ont été décrits. Diverses variantes et modifications apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, même si dans les modes de réalisation décrits précédemment la masse sismique a une forme cylindrique à base circulaire, la forme de la masse sismique peut être différente. A titre d'exemple, la masse sismique peut avoir une forme sphérique ou tronconique. Divers modes de réalisation avec diverses variantes ont été décrits ci-dessus. On notera que l'homme de l'art pourra combiner divers éléments de ces divers modes de réalisation et variantes sans faire preuve d'activité inventive.

REVENDICATIONS

1. Capteur sismique (10 ; 60 ; 120 ; 170) pour ondes sismiques, ayant une plage de fréquences de fonctionnement de 0,05 Hz à 500 Hz et comprenant un corps de capteur (11 ; 174) supportant un ensemble masse-ressort (17) contenant une masse (14 ; 136, 140) et au moins un élément de suspension (16A, 16B ; 122A, 122B ; 148A, 148B, 152A, 152B) de la masse relié à un corps de capteur (11 ; 174) et un dispositif de mesure (27 ; 110) sans contact du déplacement de la masse par rapport au corps de capteur, l'ensemble masse-ressort ayant une fréquence de résonance comprise entre 5 Hz et 300 Hz et un terme d'amortissement compris entre 0,001 et 0,5.

2. Capteur sismique selon la revendication 1, dans lequel la sensibilité du capteur sismique n'est pas constante dans la plage de fréquences de fonctionnement.

3. Capteur sismique selon la revendication 1 ou 2, ne comprenant pas de système actif de modification du déplacement de la masse (14 ; 136, 140).

4. Capteur sismique selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel le dispositif de mesure (27 ; 110) fournit au moins un premier signal, le capteur sismique comprenant, en outre, un module de traitement (62, 64, 66) adapté à fournir un deuxième signal (v_C) égal au premier signal corrigé à partir de l'inverse de la fonction de transfert du capteur sismique.

5. Capteur sismique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'élément de suspension (16A, 16B ; 122A, 122B ; 148A, 148B, 152A, 152B) comprend un anneau extérieur (30A, 30B ; 92 ; 102), une portion centrale (32A, 32B ; 94 ; 104) reliée à la masse (14 ; 136, 140) et au moins deux bras (34A, 34B ; 96 ; 106) reliant l'anneau extérieur à la portion centrale.

6. Capteur sismique selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, comprenant deux éléments de suspension (16A,

16B ; 122A, 122B ; 148A, 148B ; 152A, 152B), la masse (14 ; 136, 140) étant maintenue entre les deux éléments de suspension.

7. Capteur sismique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le dispositif de mesure (27 ; 110) comprend un capteur sans contact (24) du déplacement de la masse (14 ; 136, 140) par rapport au corps de capteur (11 ; 174) qui est un capteur de déplacement capacitif, optique, magnétique ou inductif.

8. Capteur sismique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel l'élément de suspension (16A, 16B ; 122A, 122B ; 148A, 148B, 152A, 152B) est en un matériau choisi parmi le groupe comprenant l'acier, l'aluminium et un matériau composite.

9. Capteur sismique selon la revendication 8, dans lequel l'élément de suspension (16A, 16B ; 122A, 122B ; 148A, 148B, 152A, 152B) correspond à un circuit imprimé.

10. Capteur sismique selon les revendications 7 et 9, dans lequel le capteur sans contact est un capteur de déplacement capacitif et dans lequel l'élément de suspension (16A, 16B ; 122A, 122B ; 148A, 148B, 152A, 152B) comprend une piste conductrice (162) se prolongeant par un plot conducteur (164) formant une électrode du capteur de déplacement capacitif.

11. Capteur sismique selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, comprenant, en outre, une masse supplémentaire (140) et au moins un élément de suspension supplémentaire (152A, 152B) de la masse supplémentaire relié au support (12) et un dispositif de mesure supplémentaire du déplacement de la masse supplémentaire par rapport au support, l'ensemble formé par la masse supplémentaire et l'élément de suspension supplémentaire ayant une fréquence de résonance comprise entre 5 Hz et 300 Hz.

12. Capteur sismique selon la revendication 11, dans lequel la masse (136) est traversée par une ouverture (138) et dans lequel la masse supplémentaire (140) est au moins en partie logée dans l'ouverture et distante de la masse.

13. Capteur sismique selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel la plage de fréquences de fonctionnement du capteur sismique est de 0,01 Hz à 500 Hz et dans lequel l'ensemble masse-ressort (17) a une fréquence de résonance comprise entre 1 Hz et 300 Hz.

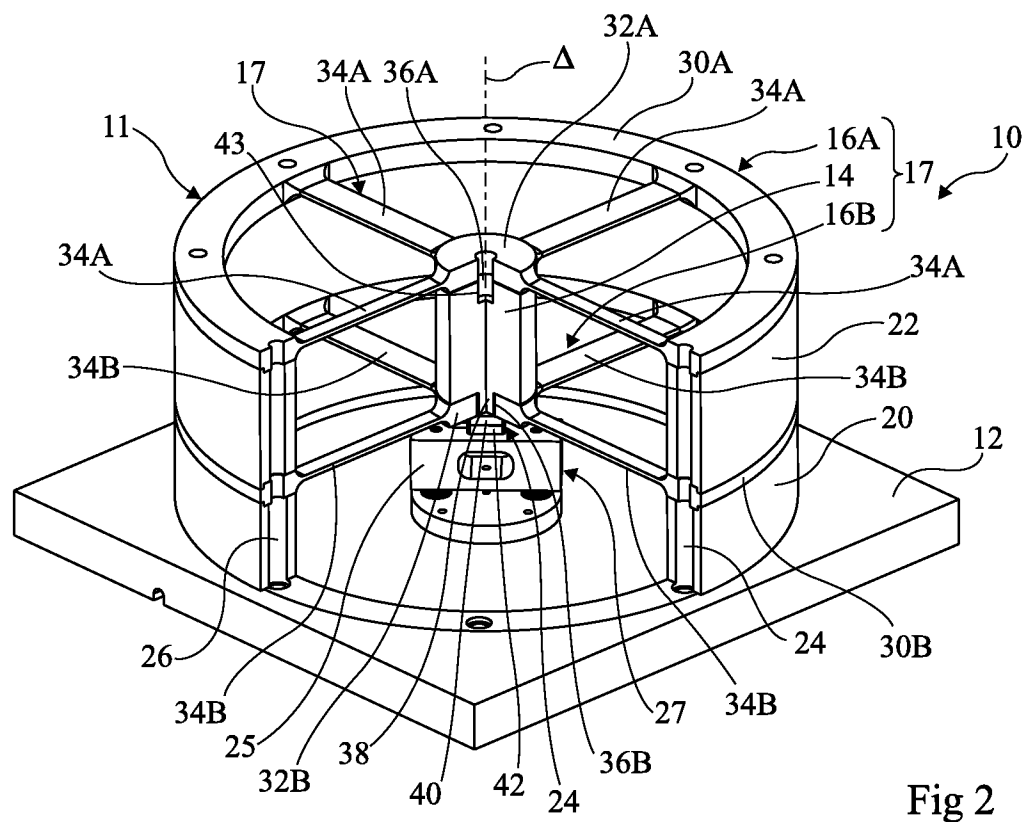
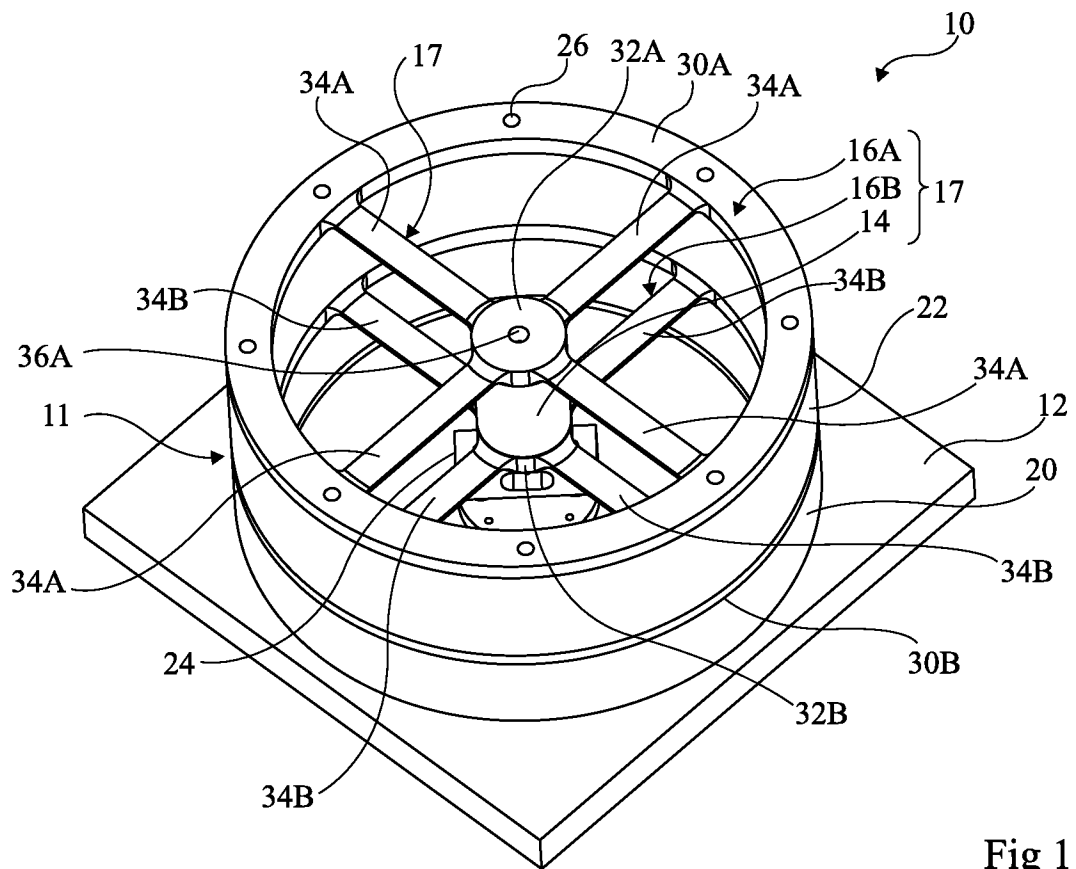
14. Capteur sismique selon la revendication 13, dans lequel l'élément de suspension (194B) délimite avec le corps de capteur (11) une cavité (196) étanche comprenant un gaz ou un mélange de gaz, notamment de l'air, à une pression supérieure strictement à la pression atmosphérique.

15. Système (70) de stabilisation dynamique d'une structure (72), comprenant au moins :

un capteur sismique (10 ; 60 ; 120 ; 170) selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, adapté à fournir un signal (v , v_C) représentatif des mouvements du sol (74) et/ou de la structure ;

un module de traitement (76, 78, 80) adapté à fournir un signal de commande (C) ; et

un actionneur (82) relié à la structure, recevant le signal de commande et adapté à déplacer la structure pour compenser les mouvements du sol.



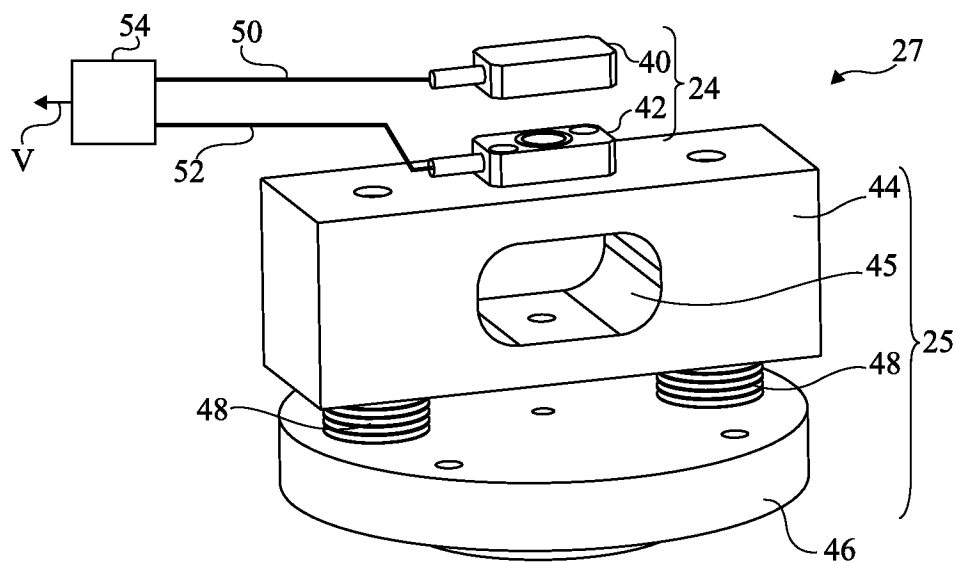


Fig 3

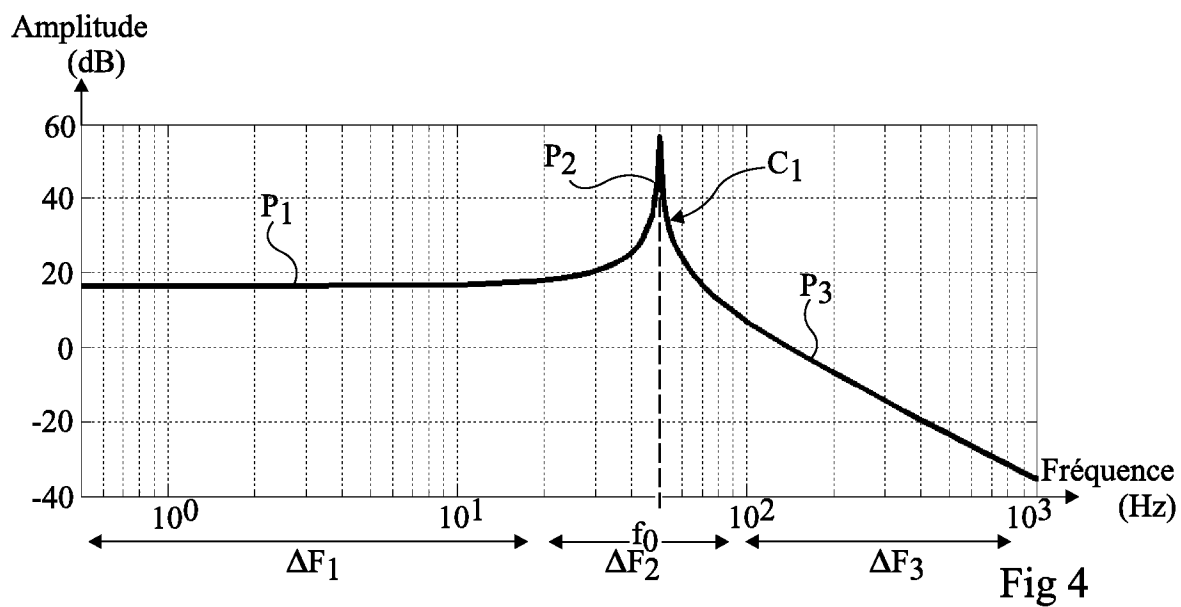
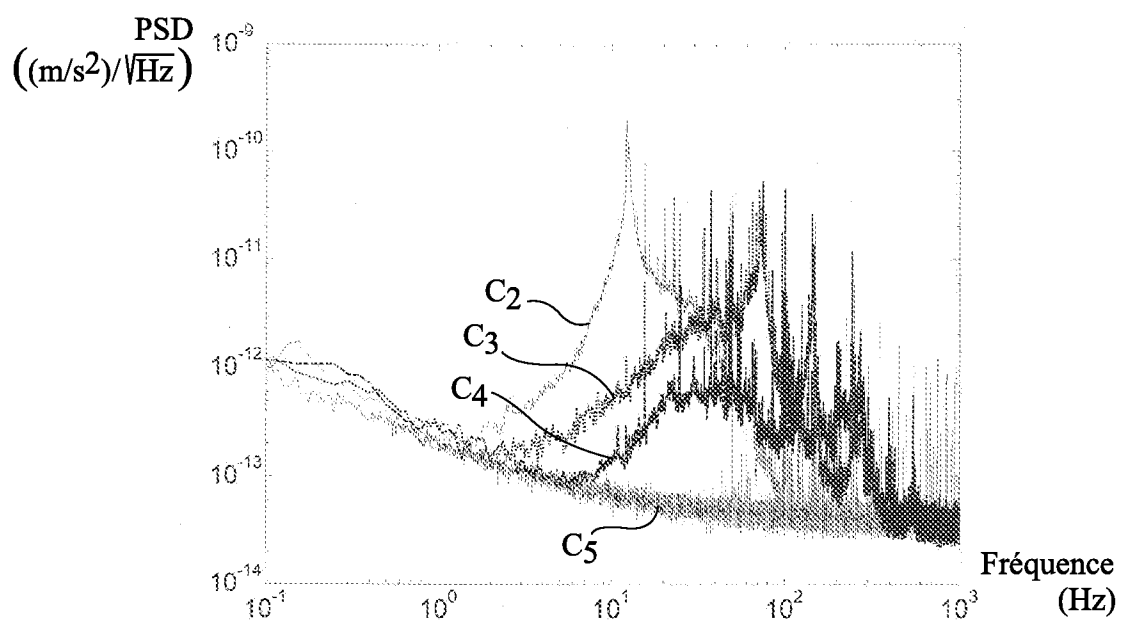


Fig 4



Fréquence (Hz)

Fig 5A

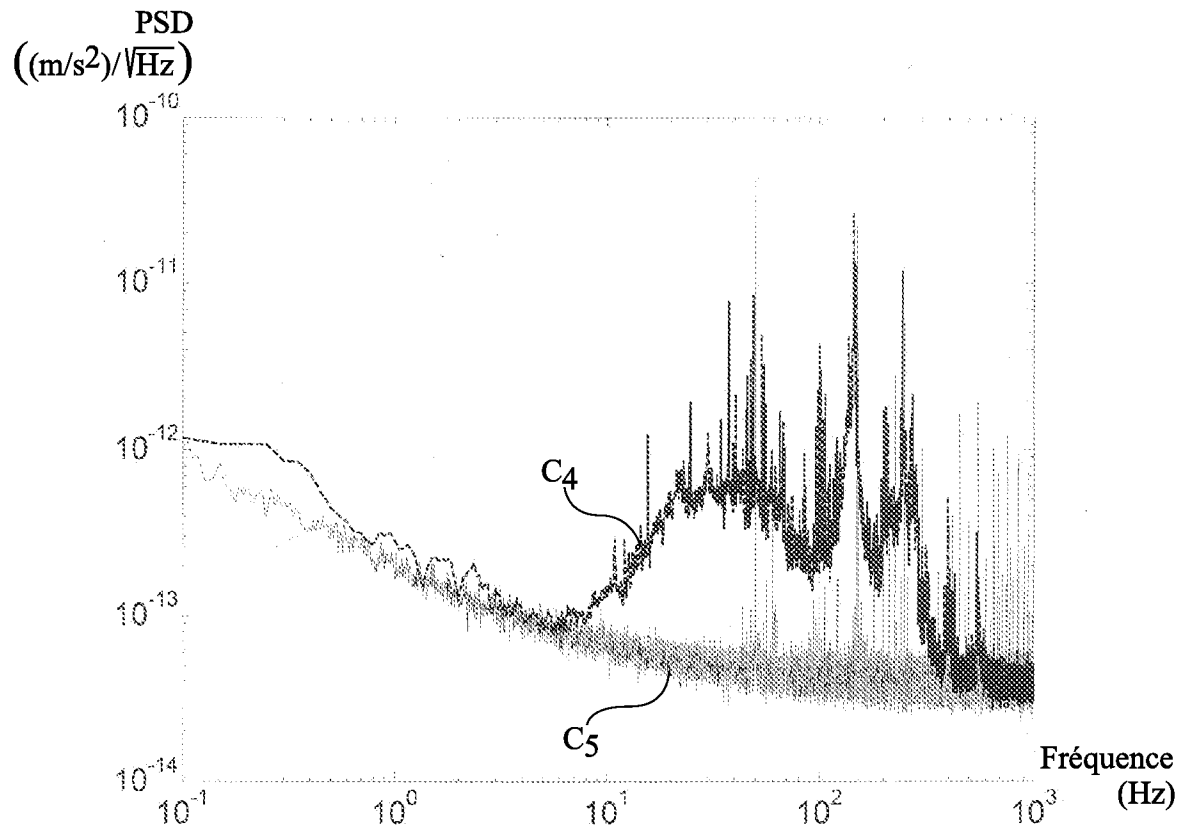


Fig 5B

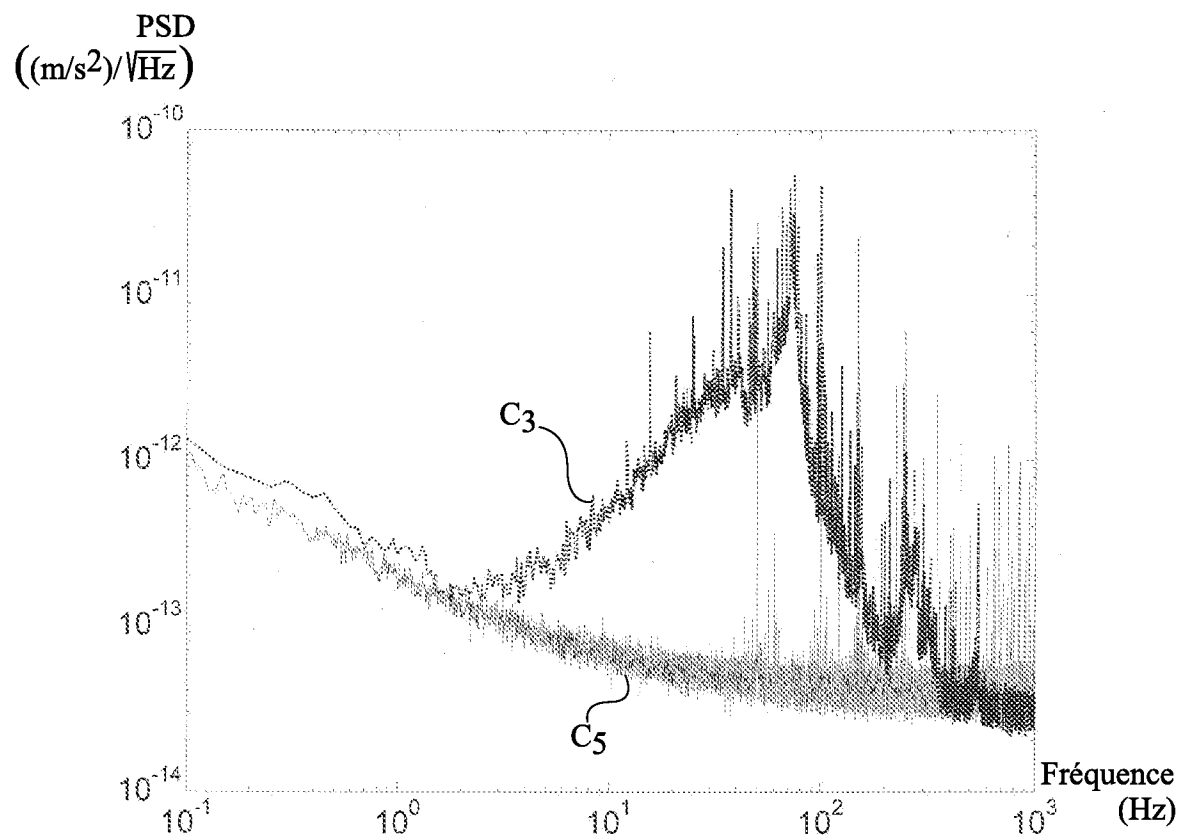


Fig 5C

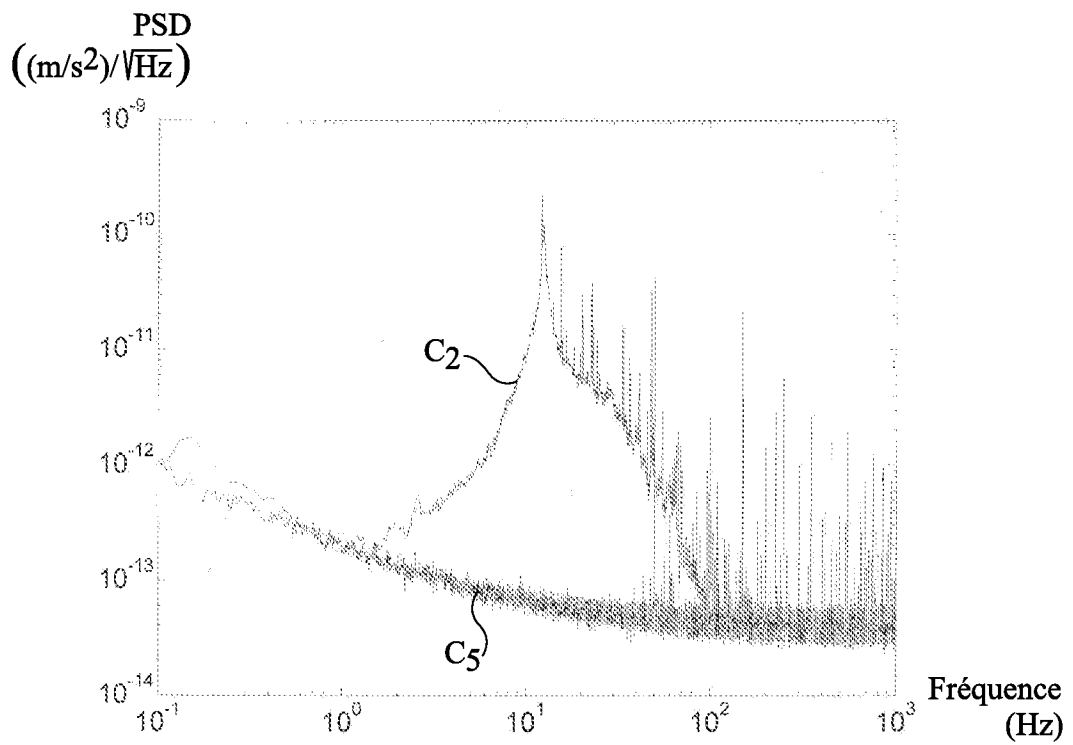


Fig 5D

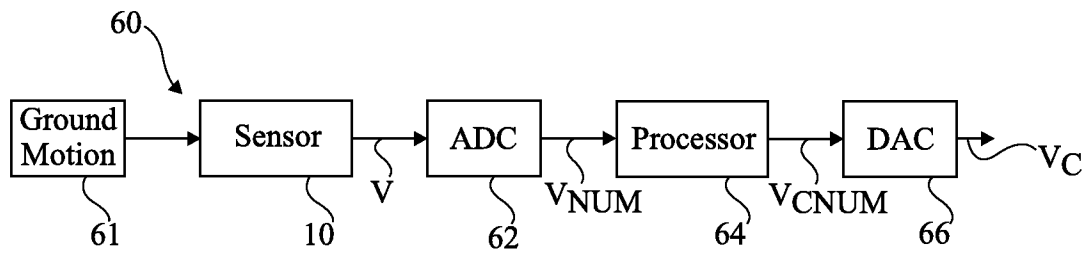


Fig 6

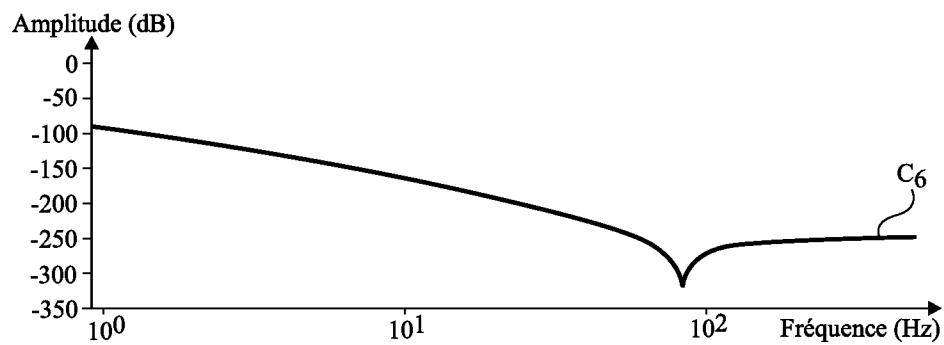


Fig 7

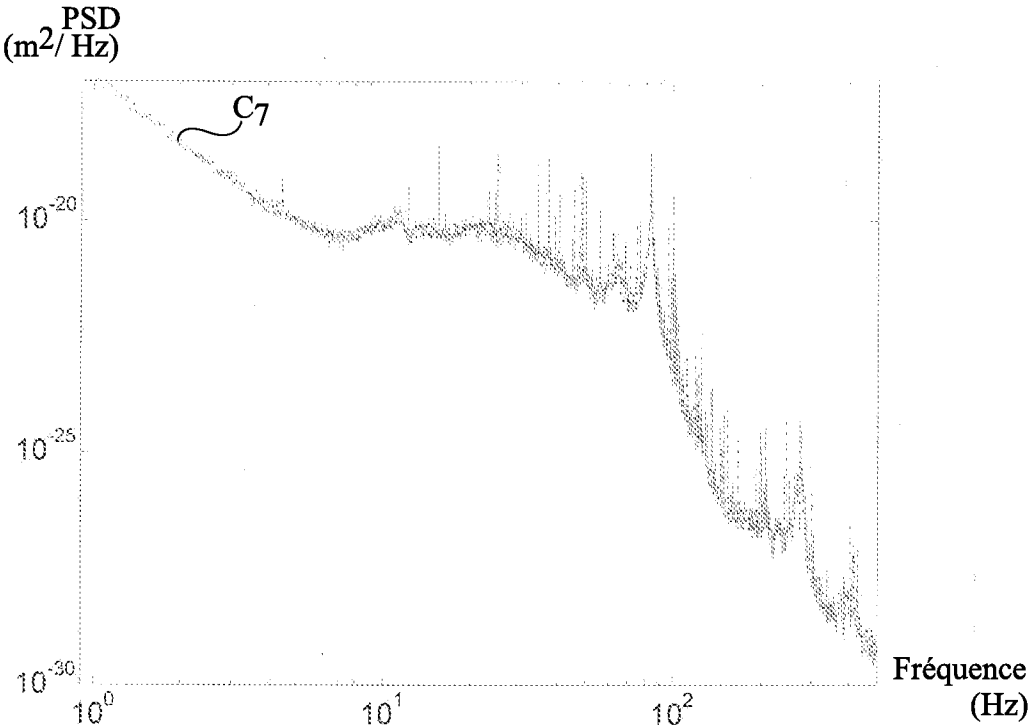


Fig 8A

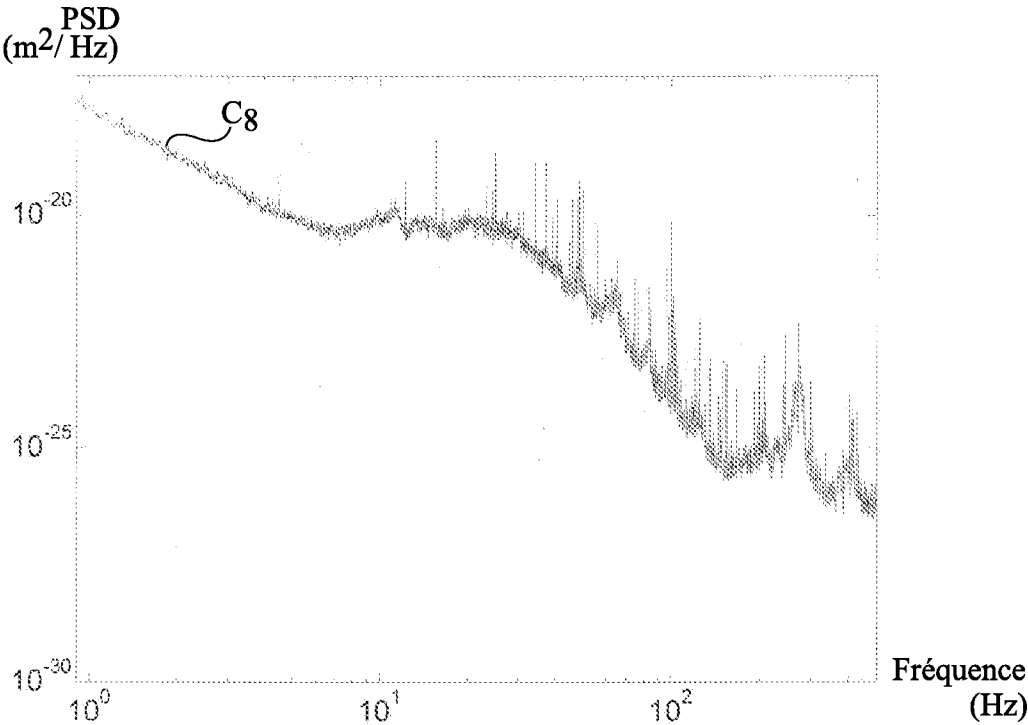


Fig 8B

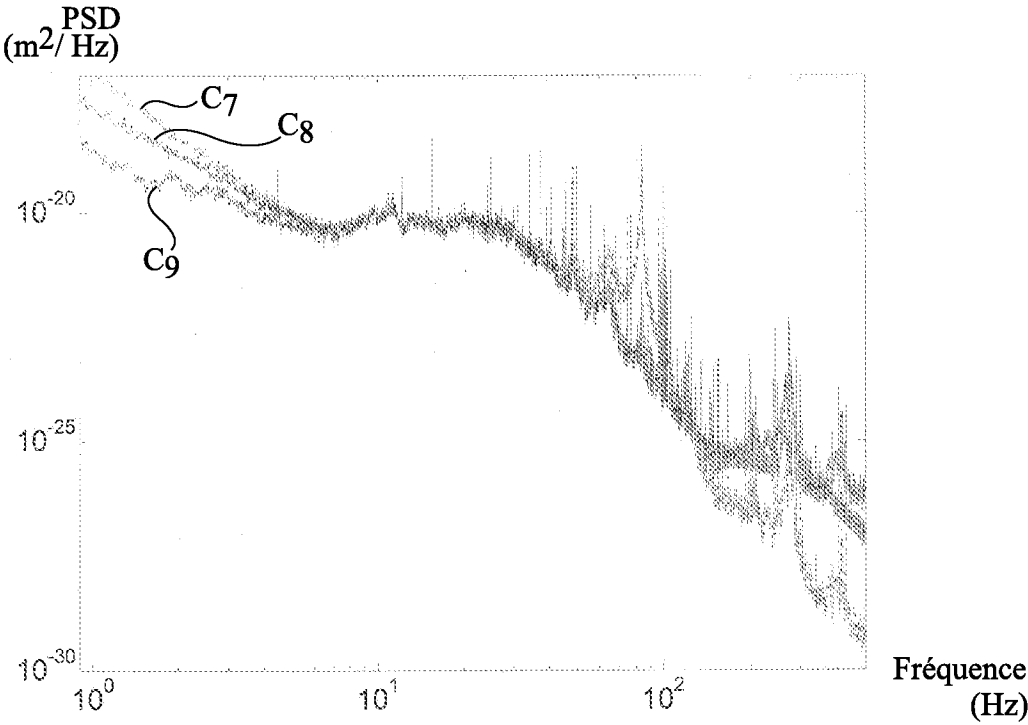


Fig 8C

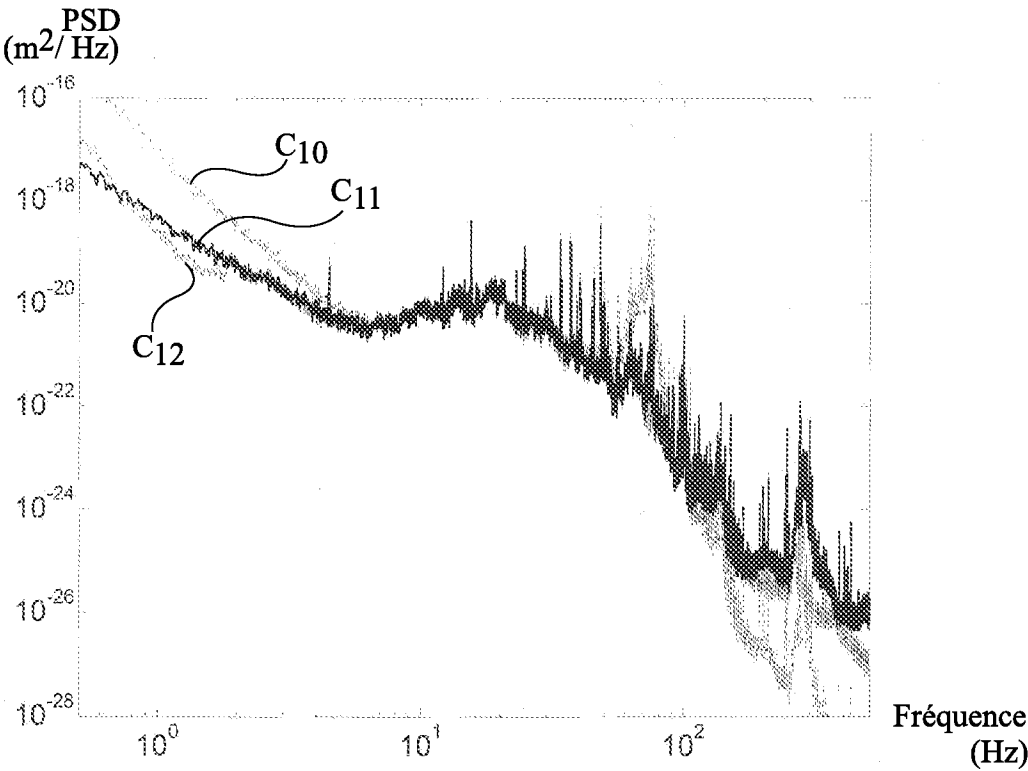


Fig 9

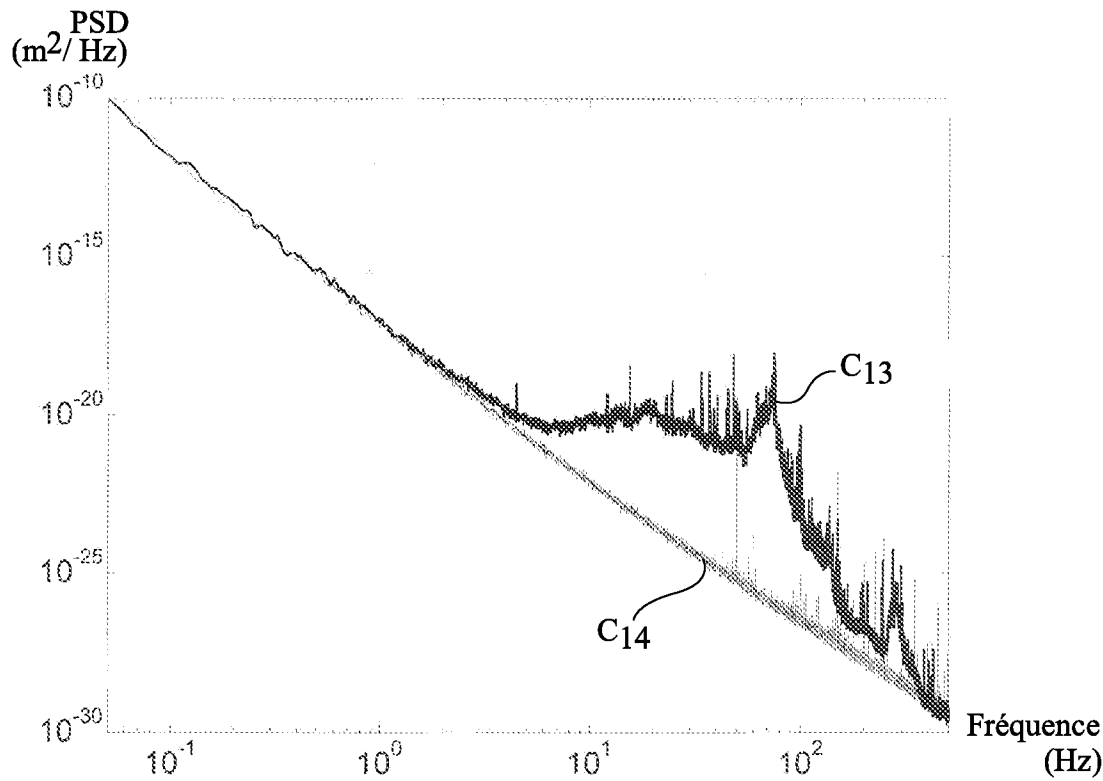


Fig 10

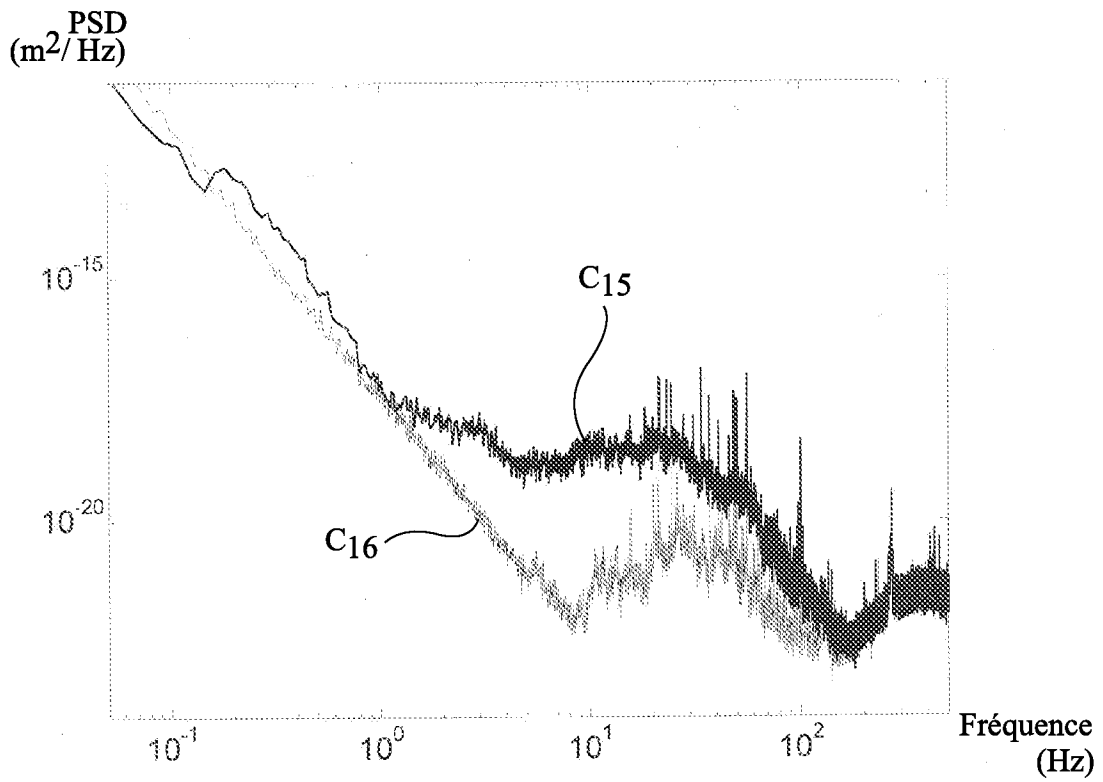
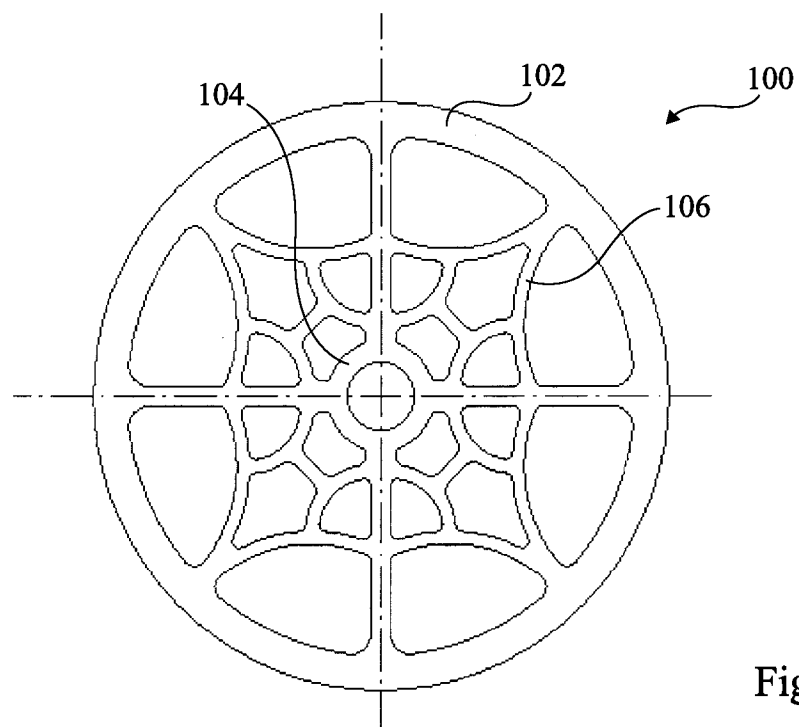
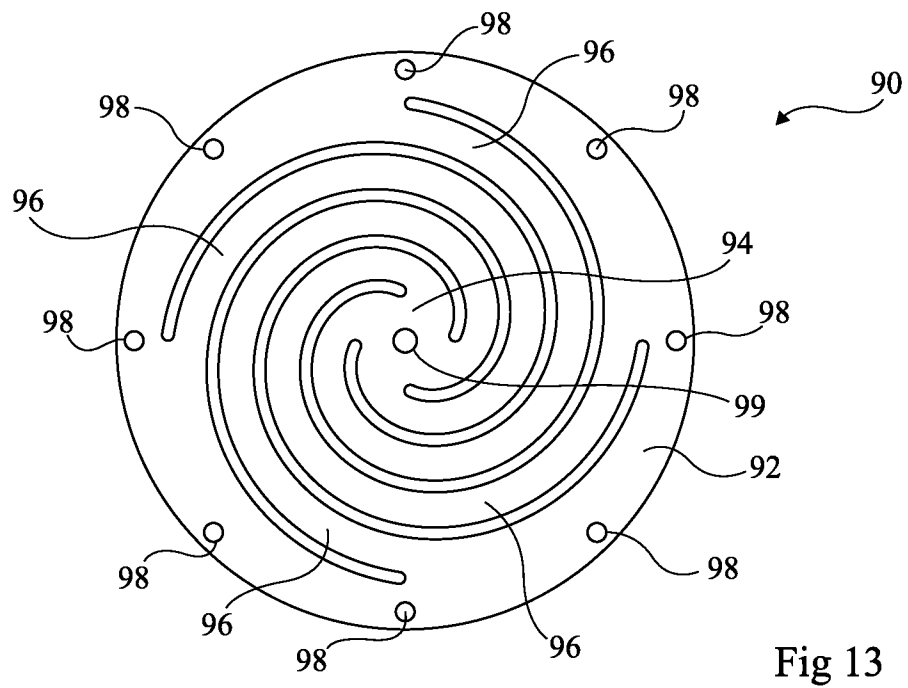
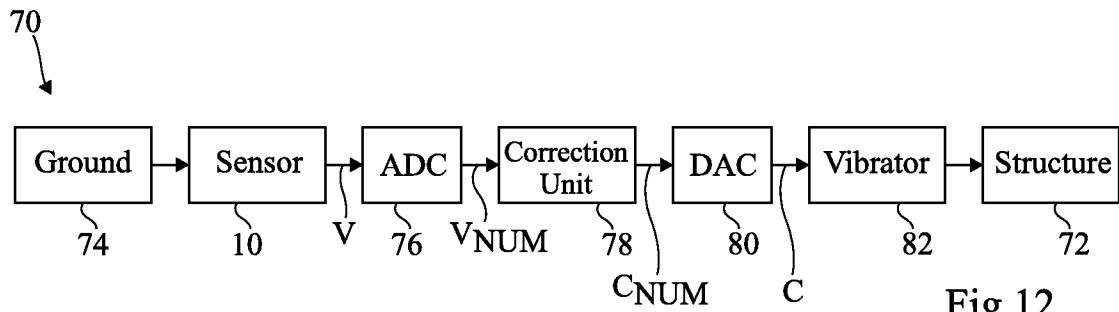


Fig 11



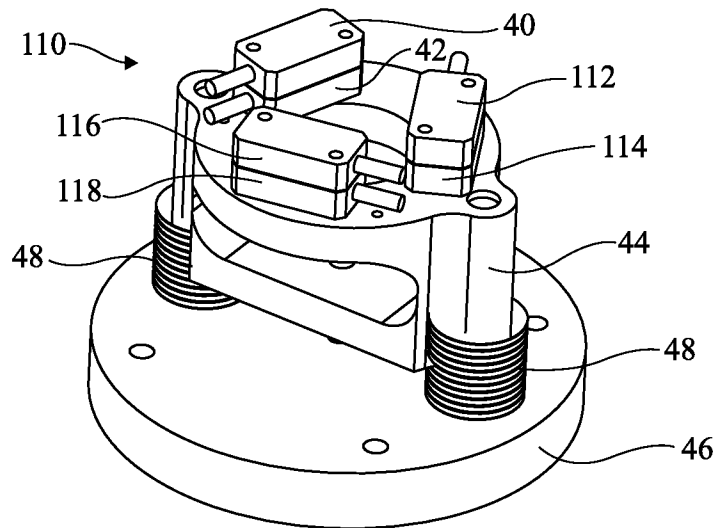


Fig 15

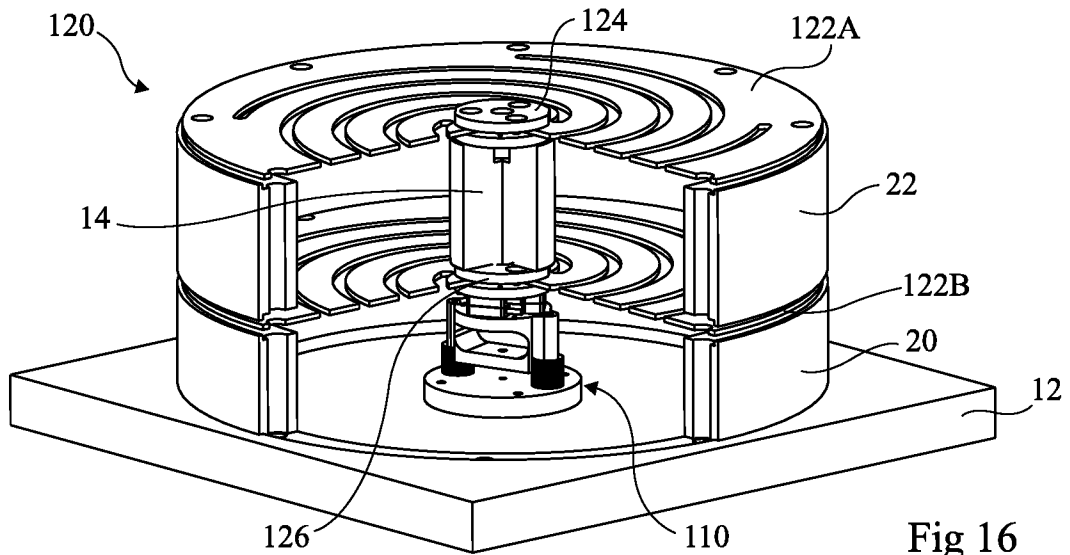


Fig 16

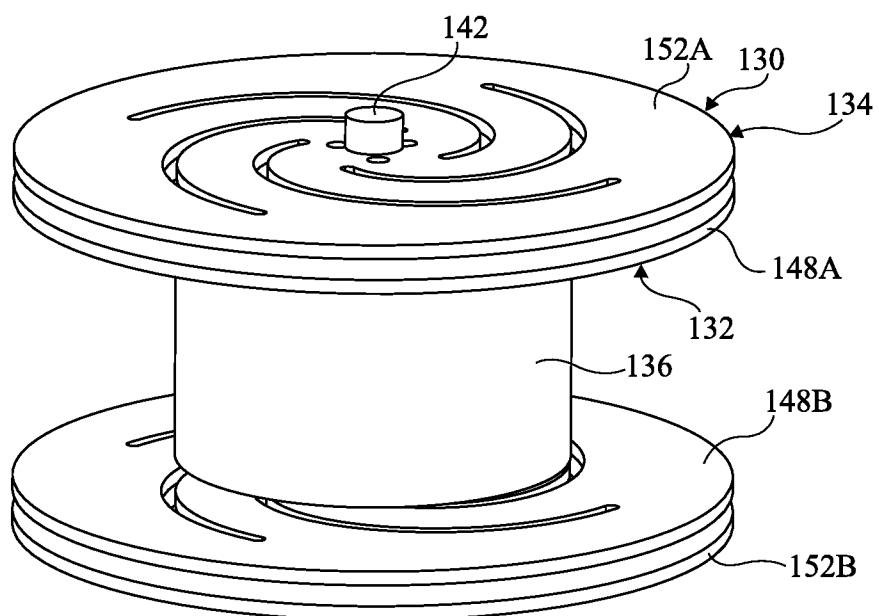


Fig 17

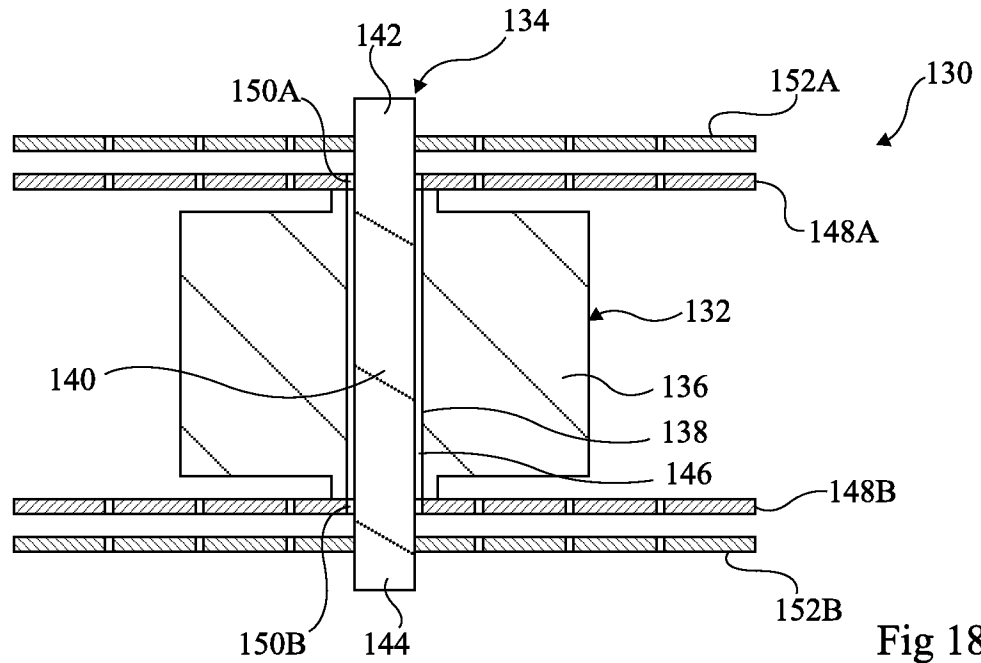


Fig 18

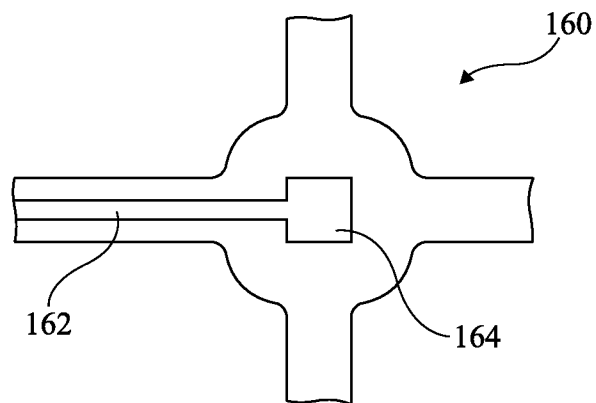


Fig 19

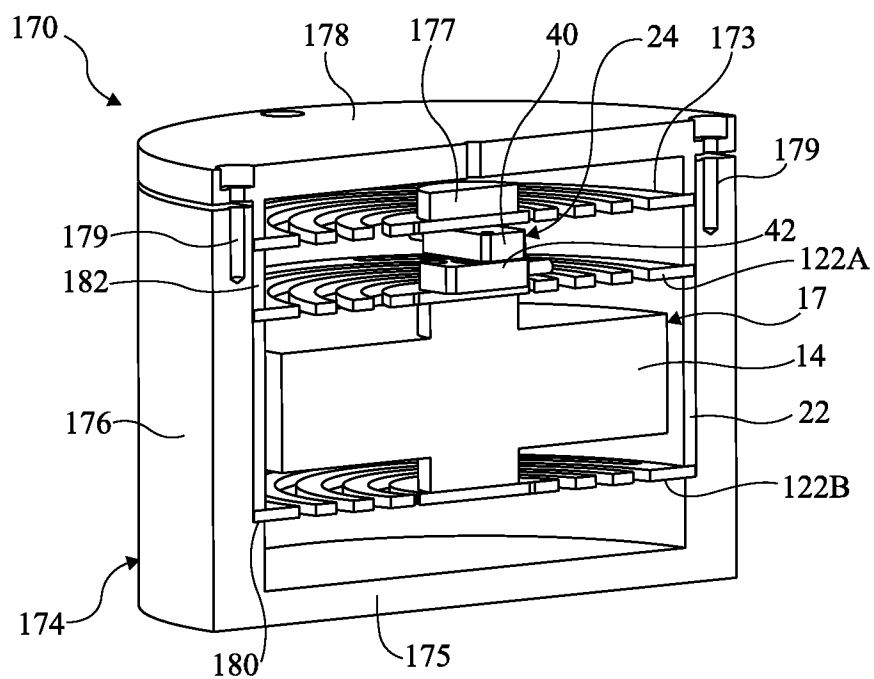


Fig 20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2014/052414

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G01V1/18
ADD.

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)

G01V G01P G01C F16F

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 practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2005/097959 A1 (PIKE WILLIAM T [GB] ET AL PIKE WILLIAM THOMAS [GB] ET AL) 12 May 2005 (2005-05-12)	1-10, 13-15
A	paragraphs [0003] - [0006], [0026] - [0030], [0032], [0033], [0045] - [0052]; claim 9; figures 1,2,5,6,7 -----	11,12
X	EP 2 339 381 A2 (PGS GEOPHYSICAL AS [NO]) 29 June 2011 (2011-06-29) paragraphs [0006], [0033] - [0035], [0037], [0038], [0053] - [0055]; figures 3A,4 -----	1,3,7,8, 13-15
X	US 2012/056072 A1 (FOURQUETTE DOMINIQUE CLAIRE [US] ET AL) 8 March 2012 (2012-03-08) paragraphs [0048] - [0050], [0058]; figure 1 ----- -/--	1-3,7,8, 13,15



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family 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 application or patent 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

10 December 2014

Date of mailing of the international search report

18/12/2014

Name and mailing address of the ISA/

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

Authorized officer

Bream, Philip

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2014/052414

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	B. CARON ET AL: "Vibration control of the beam of the future linear collider", CONTROL ENGINEERING PRACTICE, vol. 20, no. 3, 1 March 2012 (2012-03-01), pages 236-247, XP055123198, ISSN: 0967-0661, DOI: 10.1016/j.conengprac.2011.11.001 the whole document -----	15
A	B Bolzon ET AL: "Study of vibrations and stabilization at the sub-nanometer scale for CLIC final doublets STUDY OF VIBRATIONS AND STABILIZATION AT THE SUB-NANOMETRE SCALE FOR CLIC FINAL DOUBLET*", 1 September 2008 (2008-09-01), XP055123200, Retrieved from the Internet: URL:http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/32/69/13/PDF/LAPP-TECH-2008-05.pdf [retrieved on 2014-06-13] the whole document -----	15
A	B Bolzon ET AL: "Modelling of simple cases in view of active stabilisation for a future linear collider", HAL - Hyper Article on Line, 1 January 2005 (2005-01-01), XP055123199, FR Retrieved from the Internet: URL:http://hal.in2p3.fr/in2p3-00025041/en/ [retrieved on 2014-06-13] the whole document -----	15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2014/052414

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2005097959	A1	12-05-2005	CA 2564680 A1 08-06-2006
			CN 101014879 A 08-08-2007
			EP 1754082 A2 21-02-2007
			JP 4782114 B2 28-09-2011
			JP 5453599 B2 26-03-2014
			JP 2008500547 A 10-01-2008
			JP 2011185943 A 22-09-2011
			JP 2014059303 A 03-04-2014
			US 2005097959 A1 12-05-2005
			WO 2006059231 A2 08-06-2006
EP 2339381	A2	29-06-2011	AU 2010246571 A1 07-07-2011
			EP 2339381 A2 29-06-2011
			US 2011153219 A1 23-06-2011
US 2012056072	A1	08-03-2012	US 2012056072 A1 08-03-2012
			US 2012056363 A1 08-03-2012

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2014/052414

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. G01V1/18
ADD.

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)
G01V G01P G01C F16F

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 cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2005/097959 A1 (PIKE WILLIAM T [GB] ET AL PIKE WILLIAM THOMAS [GB] ET AL) 12 mai 2005 (2005-05-12)	1-10, 13-15
A	alinéas [0003] - [0006], [0026] - [0030], [0032], [0033], [0045] - [0052]; revendication 9; figures 1,2,5,6,7 -----	11,12
X	EP 2 339 381 A2 (PGS GEOPHYSICAL AS [NO]) 29 juin 2011 (2011-06-29) alinéas [0006], [0033] - [0035], [0037], [0038], [0053] - [0055]; figures 3A,4 -----	1,3,7,8, 13-15
X	US 2012/056072 A1 (FOURQUETTE DOMINIQUE CLAIRE [US] ET AL) 8 mars 2012 (2012-03-08) alinéas [0048] - [0050], [0058]; figure 1 ----- -/-	1-3,7,8, 13,15



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

10 décembre 2014

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

18/12/2014

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,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Bream, Philip

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	B. CARON ET AL: "Vibration control of the beam of the future linear collider", CONTROL ENGINEERING PRACTICE, vol. 20, no. 3, 1 mars 2012 (2012-03-01), pages 236-247, XP055123198, ISSN: 0967-0661, DOI: 10.1016/j.conengprac.2011.11.001 le document en entier -----	15
A	B Bolzon ET AL: "Study of vibrations and stabilization at the sub-nanometer scale for CLIC final doublets STUDY OF VIBRATIONS AND STABILIZATION AT THE SUB-NANOMETRE SCALE FOR CLIC FINAL DOUBLET*", 1 septembre 2008 (2008-09-01), XP055123200, Extrait de l'Internet: URL:http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/32/69/13/PDF/LAPP-TECH-2008-05.pdf [extrait le 2014-06-13] le document en entier -----	15
A	B Bolzon ET AL: "Modelling of simple cases in view of active stabilisation for a future linear collider", HAL - Hyper Article on Line, 1 janvier 2005 (2005-01-01), XP055123199, FR Extrait de l'Internet: URL:http://hal.in2p3.fr/in2p3-00025041/en/ [extrait le 2014-06-13] le document en entier -----	15

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2014/052414

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2005097959 A1	12-05-2005	CA 2564680 A1	08-06-2006
		CN 101014879 A	08-08-2007
		EP 1754082 A2	21-02-2007
		JP 4782114 B2	28-09-2011
		JP 5453599 B2	26-03-2014
		JP 2008500547 A	10-01-2008
		JP 2011185943 A	22-09-2011
		JP 2014059303 A	03-04-2014
		US 2005097959 A1	12-05-2005
		WO 2006059231 A2	08-06-2006
EP 2339381 A2	29-06-2011	AU 2010246571 A1	07-07-2011
		EP 2339381 A2	29-06-2011
		US 2011153219 A1	23-06-2011
US 2012056072 A1	08-03-2012	US 2012056072 A1	08-03-2012
		US 2012056363 A1	08-03-2012