Office de la Propriété Intellectuelle du Canada
Un organisme d'Industrie Canada

Canadian Intellectual Property Office
An agency of Industry Canada

CA 2431812 C 2011/06/14

(11)(21) 2 431 812

(12) BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT

(13) C

(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2001/12/19
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2002/06/27
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2011/06/14
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2003/06/13
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2001/004059
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2002/050572
(30) Priorité/Priority: 2000/12/21 (FR00/16832)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G01V 1/145* (2006.01), *B06B 1/06* (2006.01), *G01V 1/00* (2006.01)

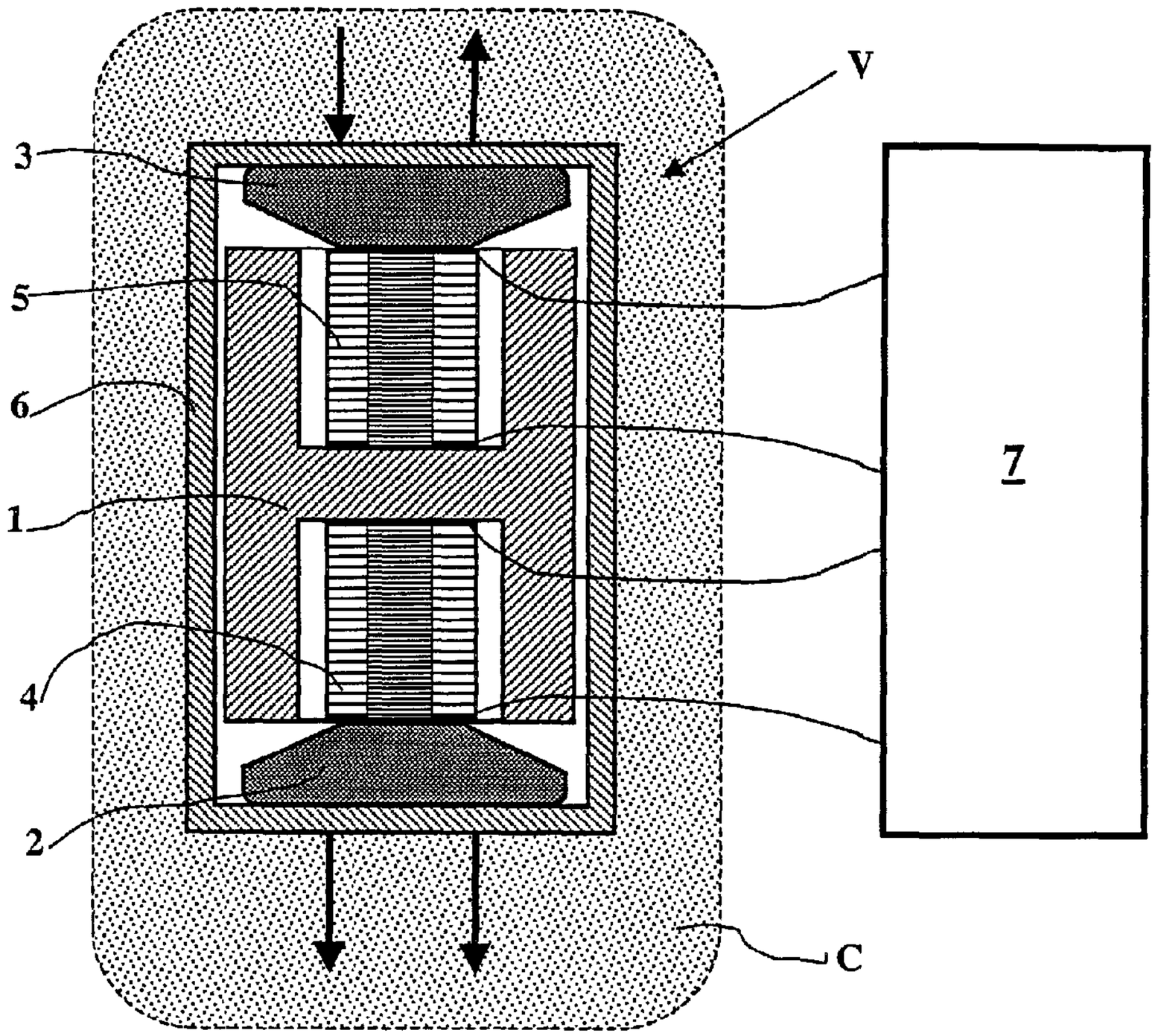
(72) Inventeurs/Inventors:
BARONI, AXELLE, FR;
MEYNIER, PATRICK, FR

(73) Propriétaire/Owner:
IFP ENERGIES NOUVELLES, FR

(74) Agent: ROBIC

(54) Titre : DISPOSITIF POUR ENGENDRER DES ONDES ELASTIQUES FOCALISEES DANS UN MILIEU MATERIEL TEL QUE LE SOUS-SOL, ET METHODE POUR SA MISE EN OEUVRE

(54) Title: DEVICE FOR GENERATING FOCUSED ELASTIC WAVES IN A MATERIAL MEDIUM SUCH AS UNDERGROUND, AND METHOD USING SAME



(57) Abrégé/Abstract:
Dispositif electromécanique pour engendrer des ondes élastiques dans un milieu matériel, tel que le sous-sol dans un domaine de fréquence où les longueurs d'ondes des ondes générées sont grandes devant les dimensions du dispositif, et aussi une méthode

CA 2431812 C 2011/06/14

(11)(21) 2 431 812

(13) C

(57) Abrégé(suite)/Abstract(continued):
pour sa mise en oeuvre. Le dispositif comporte un ou plusieurs vibrateurs adaptés à être enfouis dans le milieu, associé à un système de commande. Chaque vibrateur comporte au moins une masse d'inertie (1), plusieurs pavillons (2, 3) assurant le couplage mécanique avec le milieu, des transducteurs électromécaniques (4, 5) reliant les masses d'inertie (1) aux pavillons (2, 3). Le systÞme de commande (7) est adapté à appliquer aux différents transducteurs (4, 5), des signaux de commande respectifs tels que le champ d'ondes élastiques résultant généré dans le milieu par le dispositif, soit orienté préférentiellement suivant une ou plusieurs directions. Ce champ d'ondes focalisé peut être obtenu directement par application de signaux de commande appropriés aux différents transducteurs de chaque vibrateur ou bien en procédant en plusieurs temps d'émission successifs, avec des champs d'ondes différents, de telle sorte que, par combinaison des sismogrammes réalisés au cours de ces différents temps, le champs d'ondes équivalent soit focalisé, ou en combinant des champs d'ondes focalisés émis par plusieurs vibrateurs simples. Applications à la prospection sismique terrestre par exemple.

CA 02431812 2003-06-13

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
27 juin 2002 (27.06.2002)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 02/50572 A1

(51) Classification internationale des brevets[7] :
G01V 1/145, 1/00, B06B 1/06

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR01/04059

(22) Date de dépôt international :
19 décembre 2001 (19.12.2001)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
00/16832 21 décembre 2000 (21.12.2000) FR

(71) Déposant *(pour tous les États désignés sauf US)* : **INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE** [FR/FR]; 1 et 4, avenue de Bois Préau, F-92852 Rueil-Malmaison Cedex (FR).

(72) Inventeurs; et

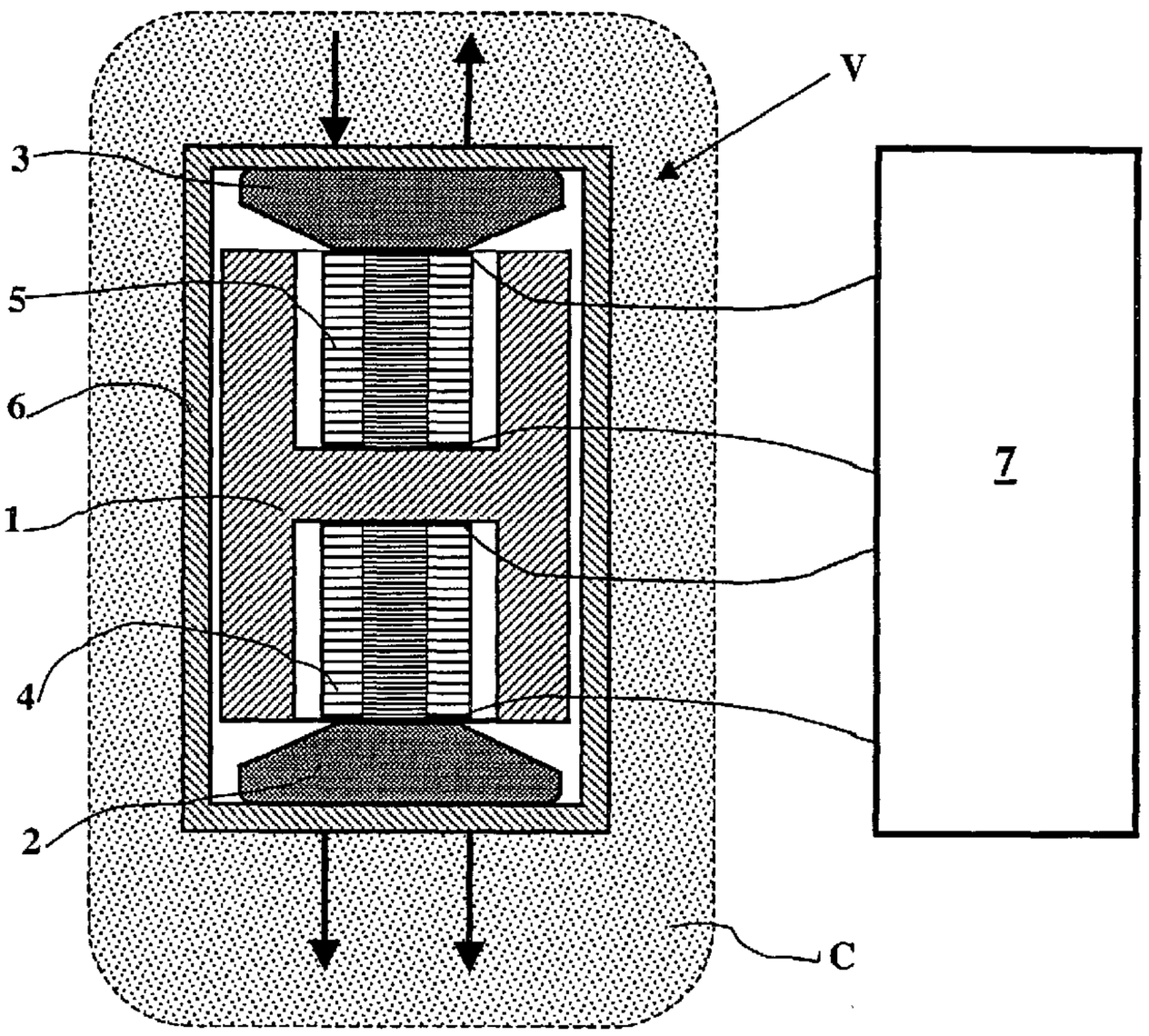
(75) Inventeurs/Déposants *(pour US seulement)* : **BARONI, Axelle** [FR/FR]; 13, boulevard Richelieu, F-92500 Rueil-Malmaison (FR). **MEYNIER, Patrick** [FR/FR]; 23 bis, rue des Garennes, F-78400 Chatou (FR).

(74) Mandataire : **ELMALEH, Alfred**; Institut Francais du Pétrole, 1 et 4, avenue de Bois Préau, F-92852 Rueil-Malmaison Cedex (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) **Title:** DEVICE FOR GENERATING FOCUSED ELASTIC WAVES IN A MATERIAL MEDIUM SUCH AS UNDERGROUND, AND METHOD USING SAME

(54) **Titre :** DISPOSITIF POUR ENGENDRER DES ONDES ELASTIQUES FOCALISEES DANS UN MILIEU MATERIEL TEL QUE LE SOUS-SOL, ET METHODE POUR SA MISE EN OEUVRE



(57) **Abstract:** The invention concerns an electromechanical device for generating elastic waves in a material medium, such as underground in a frequency domain where the wavelengths of the generated waves are high relative to the dimensions of the device, and a method using said device. The device comprises one or several vibrators adapted to be buried in a medium, associated with a control system. Each vibrator comprises at least a centre mass (1), several head masses (2, 3) providing mechanical coupling with the medium, electromechanical transducers (4, 5) connecting the centre masses (1) to the head masses (2, 3). The control system (7) is adapted to apply to the various transducers (4, 5) respective control signals such that the resulting elastic wave field generated in the medium by the device, is oriented preferably along one or several directions. Said focused wave field can be directly obtained by applying appropriate control signals to the various transducers of each vibrator or by successively transmitting several times, with different wave fields, so that, by combining seismograms produced at those different times, the equivalent wave field is focused, or by combining the focused wave fields transmitted by several single vibrators. The invention is applicable to earth's seismic exploration for example.

[Suite sur la page suivante]

WO 02/50572 A1

WO 02/50572 A1

(81) États désignés *(national)* **:** AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

(84) États désignés *(régional)* **:** brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *avec rapport de recherche internationale*

— *avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues*

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

(57) Abrégé : Dispositif electromécanique pour engendrer des ondes élastiques dans un milieu matériel, tel que le sous-sol dans un domaine de fréquence où les longueurs d'ondes des ondes générées sont grandes devant les dimensions du dispositif, et aussi une méthode pour sa mise en oeuvre. Le dispositif comporte un ou plusieurs vibrateurs adaptés à être enfouis dans le milieu, associé à un système de commande. Chaque vibrateur comporte au moins une masse d'inertie (1), plusieurs pavillons (2, 3) assurant le couplage mécanique avec le milieu, des transducteurs électromécaniques (4, 5) reliant les masses d'inertie (1) aux pavillons (2, 3). Le système de commande (7) est adapté à appliquer aux différents transducteurs (4, 5), des signaux de commande respectifs tels que le champ d'ondes élastiques résultant généré dans le milieu par le dispositif, soit orienté préférentiellement suivant une ou plusieurs directions. Ce champ d'ondes focalisé peut être obtenu directement par application de signaux de commande appropriés aux différents transducteurs de chaque vibrateur ou bien en procédant en plusieurs temps d'émission successifs, avec des champs d'ondes différents, de telle sorte que, par combinaison des sismogrammes réalisés au cours de ces différents temps, le champs d'ondes équivalent soit focalisé, ou en combinant des champs d'ondes focalisés émis par plusieurs vibrateurs simples. Applications à la prospection sismique terrestre par exemple.

DISPOSITIF POUR ENGENDRER DES ONDES ELASTIQUES FOCALISEES DANS UN MILIEU MATERIEL TEL QUE LE SOUS-SOL, ET METHODE POUR SA MISE EN OEUVRE

La présente invention porte sur un dispositif électromécanique à émission focalisée pour engendrer des vibrations dans un milieu matériel, tel que le sous-sol et une méthode pour sa mise en œuvre.

Un tel dispositif trouve des applications notamment dans le cadre d'opérations d'exploration sismique ou de surveillance sismique d'une formation souterraine telle qu'un gisement d'hydrocarbures.

2) Etat de la technique

Les opérations de prospection sismique ont pour objet l'enregistrement de sismogrammes de la formation à explorer à partir d'ondes élastiques captées par des récepteurs appropriés couplés avec la formation (disposés en surface ou dans des puits), ces ondes étant renvoyées par les discontinuités du sous-sol en réponse à des ondes émises par une source d'ondes élastiques d'un type quelconque qu'il s'agisse d'une source impulsionnelle : charge d'explosifs dans un trou, canons à air remorqués par un navire en mer, etc., ou des vibrateurs émettant des signaux de durée

variable, généralement à fréquence variable. La variation de fréquence peut être continue sur une certaine plage de fréquence (balayage ou « sweep ») comme décrit dans le brevet US 2 688 124 ou bien à variation discontinue à codage binaire comme dans le brevet FR 2 589 587.

Les vibrateurs peuvent être, par exemple, de type électromagnétique ou électro-hydraulique ou bien encore piézo-électrique. Un vibrateur de type piézo-électrique comporte par exemple un pavillon destiné à assurer le couplage avec le sol, une masse d'inertie suffisamment lourde accouplée avec le pavillon par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transducteurs piézo-électriques. Chaque transducteur comporte par exemple un empilement d'éléments en céramique piézo-électrique couplés en parallèle, et il est connecté à un générateur de signaux vibratoires. Un vibrateur piézo-électrique est décrit par exemple dans le brevet FR 2 791 780 du demandeur.

Les sources sismiques couplées avec la surface du sol sont directives mais l'énergie sismique qu'elles peuvent émettre dépend beaucoup de la qualité de leur couplage, et celle-ci, des variations climatiques locales. C'est un inconvénient notamment lorsque l'on réalise des opérations de surveillance à long terme d'un gisement en cours d'exploitation de façon à pouvoir comparer, à intervalles de temps de plusieurs mois par exemple, les sismogrammes obtenus successivement, et ainsi détecter des variations de son état. Aussi, lorsque l'on souhaite conserver une certaine reproductibilité des émissions, il est préférable de coupler les sources avec la formation, sous la zone dite altérée ("weathered zone" ou WZ). A cette fin, on creuse un puits de profondeur suffisante pour atteindre la base de la zone altérée, et on installe la source au fond en la reliant à un générateur d'énergie approprié.

Ce mode de couplage a cependant pour inconvénient que la source n'est plus directive et émet vers le haut. Le rayonnement traversant la zone altérée vient perturber les sismogrammes obtenus.

Une source directionnelle est décrite, pour une application acoustique, dans le brevet US 4 996 674. C'est une source immergée de type Janus à haute fréquence comportant une masse fixée entre deux transducteurs piézoélectriques. Un pavillon est fixé à l'extrémité de chaque transducteur opposé à la masse centrale. L'impédance mécanique opposée par le milieu d'immersion est identique au niveau de chacun des pavillons. Les deux transducteurs sont alimentés indépendamment l'un de l'autre de telle façon que l'on annule le mouvement de l'un ou l'autre pavillon. Dans la gamme des fréquences acoustiques relativement élevées, comme les longueurs d'onde des ondes émises sont petites devant les dimensions de la source, il en résulte que l'émission des ondes n'a lieu que vers l'extérieur du pavillon mobile et pratiquement pas du côté opposé. Dans le domaine de très basses fréquences où opèrent les sources sismiques, l'annulation de la vitesse de l'un des pavillons ne rend pas la source directionnelle du fait que le pavillon mobile génère une onde arrière en opposition de phase.

La méthode et le dispositif selon l'invention

Selon un premier aspect de l'invention, il est proposé une méthode de prospection d'un milieu matériel comportant la formation de sismogrammes d'une formation à explorer du milieu matériel à partir d'ondes élastiques émises par une source d'émission dans une gamme de fréquence où les longueurs d'ondes des ondes élastiques sont grandes devant les dimensions de la source d'émission, ladite source d'émission étant un dispositif comportant au moins un vibrateur adapté à être enfoui dans le milieu matériel, incluant chacun une seule masse d'inertie, reliée à au moins une paire de pavillons couplés mécaniquement avec le milieu matériel par au moins une paire de transducteurs électromécaniques, les deux pavillons de chaque paire étant disposés parallèlement l'un à l'autre de part et d'autre de la masse d'inertie, et les deux transducteurs électromécaniques de

chaque paire étant alignés suivant un même axe, et un système de commande pour appliquer des signaux de commande aux transducteurs électromécaniques; où un champ d'onde est généré directement en appliquant à l'un des transducteurs électromécaniques un premier signal de commande combiné obtenu en sommant un premier signal vibratoire $U_F(t)$ et un deuxième signal vibratoire $U_D(t)$, en appliquant à l'autre transducteur électromécanique un deuxième signal de commande combiné obtenu en sommant un troisième signal vibratoire $f_F(U_F(t))$ en opposition de phase au premier signal vibratoire et un quatrième signal vibratoire $f_D(U_D(t))$ en phase avec le deuxième signal vibratoire, de façon à neutraliser un rayonnement du pavillon associé audit autre transducteur électromécanique.

Selon un second aspect de l'invention, il est également proposé une méthode de prospection d'un milieu matériel comportant la formation de sismogrammes d'une formation à explorer du milieu matériel à partir d'ondes élastiques émises par une source d'émission dans une gamme de fréquence où les longueurs d'ondes des ondes élastiques sont grandes devant les dimensions de la source d'émission, ladite source d'émission étant un dispositif comportant au moins un vibrateur adapté à être enfoui dans le milieu matériel, incluant chacun une seule masse d'inertie, reliée à au moins une paire de pavillons couplés mécaniquement avec le milieu matériel par au moins une paire de transducteurs électromécaniques, les deux pavillons de chaque paire étant disposés parallèlement l'un à l'autre de part et d'autre de la masse d'inertie, et les deux transducteurs électromécaniques de chaque paire étant alignés suivant un même axe, et un système de commande pour appliquer des signaux de commande aux transducteurs électromécaniques; où

un premier sismogramme du milieu matériel est généré en appliquant dans un premier temps respectivement aux transducteurs électromécaniques deux signaux vibratoires en opposition de phase $U_F(t)$ et $f_F(U_F(t))$;

un second sismogramme du milieu matériel est généré en appliquant dans un premier temps respectivement aux transducteurs électromécaniques deux signaux vibratoires en phase $U_D(t)$ et $f_D(U_D(t))$, le signal $U_D(t)$ étant choisi en fonction du signal $U_F(t)$; et

un troisième sismogramme du milieu matériel est généré par la somme des premier et second sismogrammes, résultant en un champ d'onde correspondant à une émission focalisée des faisceaux élastiques.

Le dispositif selon l'invention permet d'engendrer dans un milieu matériel, un champ d'ondes vibratoires focalisé (obtenu en un seul temps ou en deux temps successifs avec deux champs d'ondes distincts, non focalisés, mais complémentaires au sens où leur somme résulte en un champ focalisé), dans un domaine de fréquences où les longueurs d'ondes des ondes générées sont grandes devant la dimension du dispositif. Il comporte au moins un vibrateur adapté à être enfoui dans le milieu, incluant au moins une masse d'inertie, au moins deux pavillons couplés mécaniquement avec le milieu (l'impédance mécanique de ce milieu n'est pas forcément uniforme si bien que les deux pavillons peuvent voir des impédances différentes), des transducteurs électromécaniques reliant chaque masse d'inertie aux pavillons et un système de commande adapté à appliquer aux transducteurs électromécaniques, des signaux de commande respectifs tels que le champ d'ondes

résultant généré dans le milieu par le dispositif, soit focalisé dans une direction privilégiée.

Suivant un mode de réalisation, chaque vibrateur comporte une seule masse d'inertie, au moins deux pavillons couplés avec le milieu et des transducteurs électromécaniques fixés rigidement d'une part à la masse d'inertie et respectivement aux pavillons, deux des dits pavillons ayant une orientation commune dans l'espace, le système de commande étant adapté à leur appliquer des signaux de commande différents choisis pour que la combinaison des contraintes appliquées au milieu soit orientée principalement suivant une direction définie.

Suivant un autre mode de réalisation, chaque vibrateur comporte une seule masse d'inertie, au moins une paire de pavillons couplés avec le milieu et au moins une paire de transducteurs électromécaniques fixés rigidement d'une part à la masse d'inertie et respectivement aux pavillons de la dite paire de pavillons, en ce que les deux pavillons de chaque paire ont une orientation commune dans l'espace et sont disposés de part et d'autre de la masse d'inertie, les deux transducteurs électromécaniques de chaque paire étant alignés suivant un même axe.

Suivant un autre mode de réalisation, chaque vibrateur comporte au moins deux paires de pavillons associés à la masse d'inertie par l'intermédiaire d'au moins deux paires de transducteurs, les axes respectifs des différentes paires de transducteurs étant orientés suivant des directions différentes.

Le système de commande comporte des moyens pour appliquer à un premier transducteur de la dite paire de transducteurs, un signal de commande combiné obtenu en sommant un premier signal (U_D) et un deuxième signal (U_F) choisi en fonction du premier signal (U_D) , et pour appliquer au deuxième transducteur de la dite paire de transducteurs, un deuxième signal de commande combiné, obtenu en sommant un premier signal $f_D(U_D)$ et un deuxième signal $f_F(U_F)$, de façon à

neutraliser le rayonnement du pavillon associé au deuxième transducteur. Les fonctions f_D et f_F seront précisées par la suite.

Le deuxième signal U_F s'exprime en fonction du premier signal U_D par exemple par la relation $U_F = U_D \times \frac{2\pi}{\lambda}$.

Suivant un autre mode de réalisation, le dispositif comporte plusieurs vibrateurs comprenant chacun au moins une masse d'inertie, au moins deux pavillons couplés mécaniquement avec le milieu, des transducteurs électromécaniques reliant rigidement la masse d'inertie aux pavillons et un système de commande adapté à appliquer aux transducteurs électromécaniques des vibrateurs, des signaux de commande respectifs tels que le champ d'ondes global produit par le dispositif, soit orienté suivant une direction déterminée dans l'espace.

Le dispositif comporte par exemple des moyens (une masse de ciment ou analogue ou un élément en matériau élastique en contact avec au moins un des pavillons par exemple) pour modifier le coefficient de couplage des différents pavillons avec le milieu, de façon à renforcer la polarisation des ondes appliquées au milieu par le dispositif.

Suivant un autre mode de réalisation, au moins une masse d'inertie est constituée par un volume du dit milieu ou un volume d'un matériau solide.

La méthode de prospection d'un milieu matériel tel que le sous-sol selon l'invention, comporte la formation de sismogrammes de la formation à explorer à partir d'ondes élastiques captées par des récepteurs d'ondes appropriés couplés avec la formation, ces ondes étant renvoyées par les discontinuités du milieu en réponse à des ondes élastiques émises. Elle comporte l'utilisation comme source d'ondes élastiques, d'un dispositif comprenant au moins un vibrateur adapté à être enfoui dans le milieu, incluant au moins une masse d'inertie, au moins deux pavillons couplés mécaniquement avec le milieu, des transducteurs électromécaniques reliant

chaque masse d'inertie aux pavillons et un système de commande des transducteurs, et l'application aux transducteurs, des signaux de commande d'amplitudes et de phases choisies pour que le champ d'ondes résultant appliqué au milieu, soit focalisé dans une certaine direction

Suivant un mode de mise en œuvre où chaque vibrateur comportant une seule masse d'inertie, reliée à au moins une paire de pavillons par au moins une paire de transducteurs électromécaniques, les deux pavillons de chaque paire étant disposés de part et d'autre de la masse d'inertie et ayant une orientation commune dans l'espace, et les deux transducteurs électromécaniques de chaque paire étant alignés suivant un même axe, on génère le champ d'ondes résultant :

- en appliquant dans un premier temps respectivement aux transducteurs électromécaniques respectivement, deux signaux vibratoires en opposition de phase (U_F) et $f_F(-U_F)$ de manière à former un premier sismogramme du milieu ;
- en appliquant dans un deuxième temps respectivement aux deux transducteurs électromécaniques respectivement, deux signaux vibratoires en phase (U_D) et $f_D(U_D)$, avec (U_D) choisi en fonction du premier signal vibratoire (U_F), de manière à former un deuxième sismogramme du milieu ; et
- en sommant les sismogrammes formés dans le premier et deuxième temps, le sismogramme obtenu par sommation résultant en un champ d'ondes, correspondant à une émission focalisée de signaux élastiques.

Suivant un mode de mise en œuvre avec un dispositif comportant une seule masse d'inertie, reliée à au moins une paire de pavillons, par au moins une paire de transducteurs électromécaniques, les deux pavillons de chaque paire étant disposés parallèlement l'un à l'autre et de part et d'autre de la masse d'inertie, et les deux transducteurs électromécaniques de chaque paire étant alignés suivant un même axe, on génère le champ d'ondes résultant en appliquant à l'un des transducteurs électromécaniques un signal vibratoire égal à la somme d'un premier signal

vibratoire (U_D) et d'un deuxième signal vibratoire (U_F) choisi en fonction du premier signal vibratoire (U_D), et en appliquant à l'autre transducteur électromécanique, un deuxième signal de commande combiné obtenu en sommant un premier signal $f_D(U_D)$ et un deuxième signal $f_F(U_F)$ de façon à neutraliser le rayonnement du pavillon associé au deuxième transducteur électromécanique.

Le signal vibratoire (U_F) est relié au signal vibratoire (U_D) par exemple par la relation $U_F = U_D \times \frac{2\pi}{\lambda}$.

Suivant un autre mode de mise en œuvre, on génère le champ d'ondes résultant en rendant dissymétriques les pavillons ou le mode de couplage des pavillons avec le milieu.

Suivant un autre mode de mise en œuvre, on met au moins un premier pavillon en contact avec une masse de ciment ou analogue, et au moins un deuxième pavillon, en contact directement avec le milieu.

Le dispositif selon l'invention permet donc d'enfouir en profondeur un ou plusieurs vibrateurs émettant, dans un domaine de fréquence où les longueurs d'ondes des ondes générées sont grandes devant les dimensions du dispositif, un champ d'ondes focalisé.

Présentation sommaire des figures

D'autres caractéristiques et avantages du dispositif selon l'invention et de la méthode de mise en œuvre, apparaîtront à la lecture de la description ci-après, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 montre schématiquement l'agencement du vibrateur avec son dispositif de commande associé ;

- la Fig.2 montre un exemple schématique de mise en place sur le terrain d'un système sismique terrestre utilisant le vibrateur de la Fig.1 ; et

- les Fig.3A, 3B, 3C montrent les lobes d'émissions respectifs des deux transducteurs du vibrateur, dans une procédure d'acquisition sismique en deux temps (Fig.3A, 3B) permettant d'obtenir par sommation de traces un champ d'ondes résultant très fortement directif (Fig.3C) ;

- la Fig.4 montre schématiquement un mode de réalisation où chaque vibrateur comporte plusieurs transducteurs électromagnétiques orientés différemment dans l'espace ;

- la Fig.5 montre schématiquement un autre mode de réalisation où chaque vibrateur comporte plusieurs paires de transducteurs électromagnétiques orientés chacune suivant une direction différente de celle des autres ;

- la Fig.6 montre schématiquement un autre mode de réalisation où le dispositif comporte plusieurs vibrateurs enterrés au voisinage les uns des autres, adaptés à émettre des ondes focalisées dans des directions différentes les uns des autres ;

- la Fig.7 montre schématiquement un autre mode de réalisation où le dispositif comporte un ou plusieurs vibrateurs comportant deux masses d'inertie et trois transducteurs électromécaniques; et

- la Fig.8 montre schématiquement les composantes dynamiques du dispositif de la Fig.1 par exemple.

DESCRIPTION DETAILLEE

Suivant le mode de réalisation de la Fig.1, le dispositif comporte au moins un vibrateur focalisé V comprenant essentiellement une masse d'inertie suffisamment

lourde 1, deux plaques ou pavillons 2, 3 disposés parallèlement l'un à l'autre et de part et d'autre de la masse d'inertie, deux transducteurs électromécaniques 4, 5 d'un type quelconque (piézoélectriques, magnétostrictifs, hydrauliques, etc.), alignés suivant un même axe, reliant la masse d'inertie 1 respectivement aux deux pavillons 2, 3, et une gaine élastique d'enrobage 6 pour isoler extérieurement le vibrateur V.

Le vibrateur V est disposé (Fig.2) dans une cavité ménagée dans le milieu, dans une zone consolidée, soit directement, soit noyé dans une masse de ciment coulé dans la cavité autour de lui. Un système de commande 7 adapté à appliquer aux deux transducteurs des forces respectives telles que le champ d'ondes résultant généré dans le milieu soit dissymétrique. Au vibrateur V, on associe des récepteurs d'ondes R couplés avec le milieu et un système d'acquisition et d'enregistrement 8 adapté à former des sismogrammes sismiques du milieu à partir des signaux captés par les récepteurs en réponse aux champs d'ondes émis.

Le calcul des signaux à appliquer à chaque vibrateur pour obtenir une émission focalisée suivant une direction donnée, est effectué comme suit.

Dans un premier temps, on se fixe une valeur d'impédance acoustique au niveau de chaque pavillon et on calcule les forces générées sur chacun d'eux. A cet effet, on modélise le vibrateur en se basant sur la technique des matrices de transfert décrite par exemple par Decarpigny J.N. et al, dans J. Acoust. Soc. Am., 78 (5) Nov. 1985, pp 1499 à 1507.

Dans un deuxième temps, on calcule les rapports d'amplitude que doivent avoir les forces générées pour que, après combinaison, certaines directions d'émission soient privilégiées. Pour cela, on peut utiliser les diagrammes de rayonnement théorique de sources ponctuelles de type force ou dipôle, dans des espaces ou demi-espaces, ou encore calculer ces rayonnements au moyen de logiciels spécialisés de calcul numérique bien connus des gens de l'art.

Pour illustrer la méthode de calcul des signaux de commande qui conduisent à annuler le rayonnement d'un côté du dispositif, on considère le cas général d'une paire de transducteurs (Fig.8) où ni le dispositif ni les impédances vues par les deux pavillons ne sont symétriques. On nomme M, la masse de la masse d'inertie 1, M_1 et M_2, les masses respectives des pavillons P1 et P2, K_1 et K_2 les raideurs des transducteurs 4, 5 associés respectivement aux pavillons P1 et P2, Z_1 et Z_2 les impédances du sol vues par respectivement les pavillons P1 et P2, r_1 et r_2 les coefficients de couplage électrodynamiques qui relient la tension électrique à la force dynamique, et $U_1(t)$ et $U_2(t)$ ci-après notées U_1 et U_2, les tensions d'alimentation variables en fonction du temps des transducteurs 4 et 5 (tensions positives si elles impliquent un allongement du pilier, par convention).

Les forces dynamiques F_1 et F_2 développées par les pavillons P1 et P2, dans le milieu environnant, vérifient (en les orientant dans le même sens):

$$F_1 = k_{11}U_1 + k_{12}U_2,$$

$$F_2 = k_{21}U_1 + k_{22}U_2, \text{ avec}$$

$$k_{11} = \frac{Z_1 r_1}{D}\left\{Z_2K_2 - \omega^2\left[M(Z_2 + K_2) + K_2M_2\right] + \omega^4 M_2 M\right\},$$

$$k_{22} = -\frac{Z_2 r_2}{D}\left\{Z_1K_1 - \omega^2\left[M(Z_1 + K_1) + K_1M_1\right] + \omega^4 M_1 M\right\},$$

$$k_{12} = \frac{Z_1 r_2}{D}\left\{Z_2K_1 - \omega^2 K_1M_2\right\},$$

$$k_{21} = -\frac{Z_2 r_1}{D}\left\{Z_1K_2 - \omega^2 K_2M_1\right\},$$

$$D = Z_1Z_2(K_1 + K_2) + K_1K_2(Z_1 + Z_2)$$
$$- \omega^2\left[K_1K_2(M + M_1 + M_2) + (K_1 + K_2)(M_2Z_1 + M_1Z_2) + M(Z_1Z_2 + Z_1K_2 + Z_2K_1)\right]$$
$$+ \omega^4\left[MM_1(Z_2 + K_2) + MM_2(Z_1 + K_1) + M_1M_2(K_1 + K_2)\right] - \omega^6 M_1M_2M.$$

Pour que le dispositif agisse comme une simple force sur le milieu, il faut que $F_1 = F_2$; ce qui implique la valeur suivante pour la tension d'alimentation U_2 :

$$U_2 = \mathrm{f}_F(U_1) = -U_1 \times \frac{r_1}{r_2}\left[\frac{2K_2Z_1Z_2 - \omega^2\left(Z_1Z_2M + Z_1K_2M + Z_1K_2M_2 + Z_2K_2M_1\right) + \omega^4 Z_1M_2M}{2K_1Z_1Z_2 - \omega^2\left(Z_1Z_2M + Z_2K_1M + Z_2K_1M_1 + Z_1K_1M_2\right) + \omega^4 Z_2M_1M}\right].$$

Pour que le dispositif agisse comme un dipôle, il faut que $F_1 = -F_2$;

ce qui implique la valeur suivante pour la tension d'alimentation U_2 :

$$U_2 = \mathrm{f}_D(U_1) = U_1 \times \frac{r_1}{r_2}\left[\frac{Z_2K_2M_1 - Z_1Z_2M - Z_1K_2M - Z_1K_2M_2 + \omega^2 Z_1M_2M}{Z_1K_1M_2 - Z_2Z_1M - Z_2K_1M - Z_2K_1M_1 + \omega^2 Z_2M_1M}\right].$$

Pour que la combinaison des deux émissions soit minimisée d'un coté du dispositif, il faut que $(F_1)_{force} = (F_1)_{dipole} \times \frac{2\pi}{\lambda}$, où λ est la longueur d'onde des ondes générées ; cette dernière relation permet de choisir $(U_1)_{force}$ en fonction de $(U_1)_{dipole}$. ci-après notées respectivement U_F et U_D avec, :

$$U_F = U_D \times \frac{2\pi}{\lambda}. \qquad (1)$$

pour que les rayonnements du dipôle et la force s'annulent d'un côté.

Suivant un premier mode de mise en œuvre, le champ d'ondes résultant est obtenu en deux temps. Dans un premier temps, on applique respectivement aux deux transducteurs 4, 5, deux signaux sinusoïdaux en opposition de phase $U_F(t)$ et $f_F(U_F(t))$ (Fig.3A). Le vibrateur V génère un premier champ d'ondes suivant l'axe commun des deux transducteurs 4, 5 et on procède à l'acquisition des signaux sismiques renvoyés par le milieu, de façon à former un premier sismogramme du milieu. Dans un deuxième temps, on applique aux deux transducteurs deux signaux sinusoïdaux en phase $U_D(t)$ et $f_D(U_D(t))$ (Fig.3B) et on procède pareillement à l'acquisition des signaux sismiques renvoyés par le milieu, de façon à former un deuxième sismogramme du milieu. On règle correctement les signaux $U_F(t)$ et $U_D(t)$ en accord

avec la relation 1 ci-dessus, pour qu'en sommant les sismogrammes formés dans le premier temps et le deuxième temps, on obtienne un sismogramme sismique équivalent correspondant à un champ d'ondes élastiques focalisé, tel que celui de la Fig.3C.

Suivant un deuxième mode de mise en œuvre, on obtient un résultat analogue en appliquant à l'un des transducteurs 4 un signal égal à la somme des signaux précédents $U_F(t) + U_D(t)$, et au transducteur opposé 5, un signal égal à $f_D(U_D(t)) + f_F(U_F(t))$. Ceci a pour effet de neutraliser à distance le rayonnement « arrière », le dispositif étant ainsi rendu focalisé.

L'amplitude relative des signaux de commande l'un par rapport à l'autre dépendent généralement de la longueur d'onde, et on doit les ajuster en conséquence, dans le cas où l'on modifie les fréquences émises (émission de fréquences glissantes par exemple). Suivant le mode de réalisation de la Fig.4, chaque vibrateur V comporte une masse d'inertie 1 et au moins trois transducteurs électromagnétiques, T1, T2, T3. Deux d'entre eux T1, T2 dont les axes sont orientés suivant une direction commune, relient deux pavillons P1, P2 à la masse d'inertie. Le troisième transducteur T3 reliant un troisième pavillon P3 à la masse d'inertie 1, est orienté suivant une direction différente des deux premiers. Le système de commande 7 est commun à tous les transducteurs T1-T3 et leur applique des signaux de commande choisis pour obtenir une émission focalisée suivant une certaine direction.

Le calcul des amplitudes convenant pour ce mode de réalisation, se conduit aisément en appliquant la méthode de calcul décrite plus haut, appliquée au système oscillant T1-T3. Suivant le mode de réalisation de la Fig.5, chaque vibrateur V comporte une masse d'inertie commune 1 et plusieurs (trois dans l'exemple représenté) paires, (T1, T'1), (T2, T'2) (T3, T'3) reliant chacune deux pavillons (P1, P'1) ou (P2,P'2) ou (P3, P'3) à la masse d'inertie commune 1, Les transducteurs de chaque paire sont orientés suivant une direction commune, différente de celles des autres paires. Les directions des trois paires sont par exemple orientés suivant les

arêtes d'un trièdre trirectangle. Le système de commande est également commun à tous les couples de transducteurs et leur applique des signaux de commande choisis pour obtenir une émission focalisée suivant une certaine direction. L'amplitude des signaux de commande convenant pour cet autre mode de réalisation, est calculée de même comme indiqué plus haut. Ce mode de réalisation offre une latitude particulièrement grande d'orientation dans l'espace des émissions focalisées.

Suivant le mode de réalisation de la Fig.6, le dispositif comporte n vibrateurs V1-Vn ($n \geq 2$) enfouis dans le sol, au voisinage les uns des autres, comprenant chacun une masse d'inertie I, I' et deux (ou plus) transducteurs électromagnétiques (T1, T'1) et (T2, T'2) reliant chacun un pavillons (P1, P'1) et (P2, P'2) à une des masses d'inertie 1, 1'. Les axes de deux transducteurs de chaque vibrateur V1, V2 sont orientés suivant une direction commune, différente de celle des transducteurs de l'autre vibrateur. Le dispositif comporte un système de commande 7 commun aux deux vibrateurs V1, V2, est adapté à leurs appliquer des signaux de manière à obtenir un champ d'ondes combiné dont l'orientation et la forme globale dépendent des amplitudes et des phases des signaux appliqués respectivement aux vibrateurs. En utilisant par exemple trois vibrateurs dont les axes sont orientés suivant les axes d'un trièdre, on peut, en jouant sur les amplitudes et phases, orienter le champ d'ondes produit en fonction de la zone du sous-sol à explorer.

Suivant le mode de réalisation de la Fig.7, chaque vibrateur comporte au moins deux masses d'inertie I, I' reliées entre elles par un transducteur électromécanique T1, chacune des masses 1, 1' étant reliée mécaniquement par un transducteur électromécaniques T2, T3 avec un pavillon P, P'.

On peut obtenir également un champ d'ondes résultant privilégiant une direction d'émission par rapport à la direction opposée, en rendant inégal le mode de couplage des deux pavillons avec le milieu. On peut mettre par exemple l'un des pavillons, (le pavillon 2 par exemple), en contact avec une masse de ciment ou analogue, et le pavillon opposé (3 par exemple), en contact directement avec le

milieu. On peut également intercaler entre l'un des pavillons et le milieu une couche d'un matériau présentant une qualité acoustique différente : une couche d'élastomère par exemple.

Un autre moyen consiste encore à utiliser des transducteurs 4, 5 de caractéristiques différentes.

Suivant un mode préféré de réalisation, les transducteurs sont de type piézo-électrique. Ils comportent chacun un pilier constitué, de façon connue en soi, par empilement d'éléments sensibles piézo-électriques, électriquement connectés en parallèle. On peut dans ce cas rendre les transducteurs différents en modifiant le nombre d'éléments piézo-électriques constitutifs des empilements, ou en prenant des éléments de formes différentes ou de tailles différentes par leur surface et/ou leur épaisseur.

La masse d'inertie peut être réalisée en quelconque matériau : métal, ciment ou analogue, ou même d'un volume du milieu où le dispositif est enfoui, intercalé entre les transducteurs.

REVENDICATIONS

1. Une méthode de prospection d'un milieu matériel comportant la formation de sismogrammes d'une formation à explorer du milieu matériel à partir d'ondes élastiques émises par une source d'émission dans une gamme de fréquence où les longueurs d'ondes des ondes élastiques sont grandes devant les dimensions de la source d'émission, ladite source d'émission étant un dispositif comportant au moins un vibrateur adapté à être enfoui dans le milieu matériel, incluant chacun une seule masse d'inertie, reliée à au moins une paire de pavillons couplés mécaniquement avec le milieu matériel par au moins une paire de transducteurs électromécaniques, les deux pavillons de chaque paire étant disposés parallèlement l'un à l'autre de part et d'autre de la masse d'inertie, et les deux transducteurs électromécaniques de chaque paire étant alignés suivant un même axe, et un système de commande pour appliquer des signaux de commande aux transducteurs électromécaniques; où un champ d'onde est généré directement en appliquant à l'un des transducteurs électromécaniques un premier signal de commande combiné obtenu en sommant un premier signal vibratoire $U_F(t)$ et un deuxième signal vibratoire $U_D(t)$, en appliquant à l'autre transducteur électromécanique un deuxième signal de commande combiné obtenu en sommant un troisième signal vibratoire $f_F(U_F(t))$ en opposition de phase au premier signal vibratoire et un quatrième signal vibratoire $f_D(U_D(t))$ en phase avec le deuxième signal vibratoire, de façon à neutraliser un rayonnement du pavillon associé audit autre transducteur électromécanique.

2. La méthode selon la revendication 1, dans laquelle le premier signal vibratoire $U_F(t)$ est relié au deuxième signal vibratoire $U_D(t)$ par la relation

$$U_F(t) = U_D(t) \times \frac{2\pi}{\lambda} \ ,$$

où λ est la longueur d'onde des ondes élastiques.

3. La méthode selon les revendications 1 ou 2, dans laquelle on génère le champ d'onde résultant en rendant dissymétrique les pavillons ou le mode de couplage des pavillons avec le milieu matériel.

4. La méthode selon l'une des revendications 1 à 3, dans laquelle on met au moins un premier desdits pavillons en contact avec une masse de ciment et au moins un second desdits pavillons en contact directement avec le milieu matériel.

5. Une méthode de prospection d'un milieu matériel comportant la formation de sismogrammes d'une formation à explorer du milieu matériel à partir d'ondes élastiques émises par une source d'émission dans une gamme de fréquence où les longueurs d'ondes des ondes élastiques sont grandes devant les dimensions de la source d'émission, ladite source d'émission étant un dispositif comportant au moins un vibrateur adapté à être enfoui dans le milieu matériel, incluant chacun une seule masse d'inertie, reliée à au moins une paire de pavillons couplés mécaniquement avec le milieu matériel par au moins une paire de transducteurs électromécaniques, les deux pavillons de chaque paire étant disposés parallèlement l'un à l'autre de part et d'autre de la masse d'inertie, et les deux transducteurs électromécaniques de chaque paire étant alignés suivant un même axe, et un système de commande pour appliquer des signaux de commande aux transducteurs électromécaniques; où

un premier sismogramme du milieu matériel est généré en appliquant dans un premier temps respectivement aux transducteurs électromécaniques deux signaux vibratoires en opposition de phase $U_F(t)$ et $f_F(U_F(t))$;

un second sismogramme du milieu matériel est généré en appliquant dans un premier temps respectivement aux transducteurs électromécaniques deux signaux vibratoires en phase $U_D(t)$ et $f_D(U_D(t))$, le signal $U_D(t)$ étant choisi en fonction du signal $U_F(t)$; et

un troisième sismogramme du milieu matériel est généré par la somme des premier et second sismogrammes, résultant en un champ d'onde correspondant à une émission focalisée des faisceaux élastiques.

6. La méthode selon la revendication 5, dans laquelle le signal vibratoire $U_F(t)$ est relié au signal vibratoire $U_D(t)$ par la relation

$$U_F(t) = U_D(t) \times \frac{2\pi}{\lambda} \ ,$$

où λ est la longueur d'onde des ondes élastiques.

7. La méthode selon la revendication 5 ou 6, dans laquelle on génère le champ d'onde résultant en rendant dissymétrique les pavillons ou le mode de couplage des pavillons avec le milieu matériel.

8. La méthode selon l'une des revendications 5 à 7, dans laquelle on met au moins un premier desdits pavillons en contact avec une masse de ciment et au moins un second desdits pavillons en contact directement avec le milieu matériel.

FIG.1

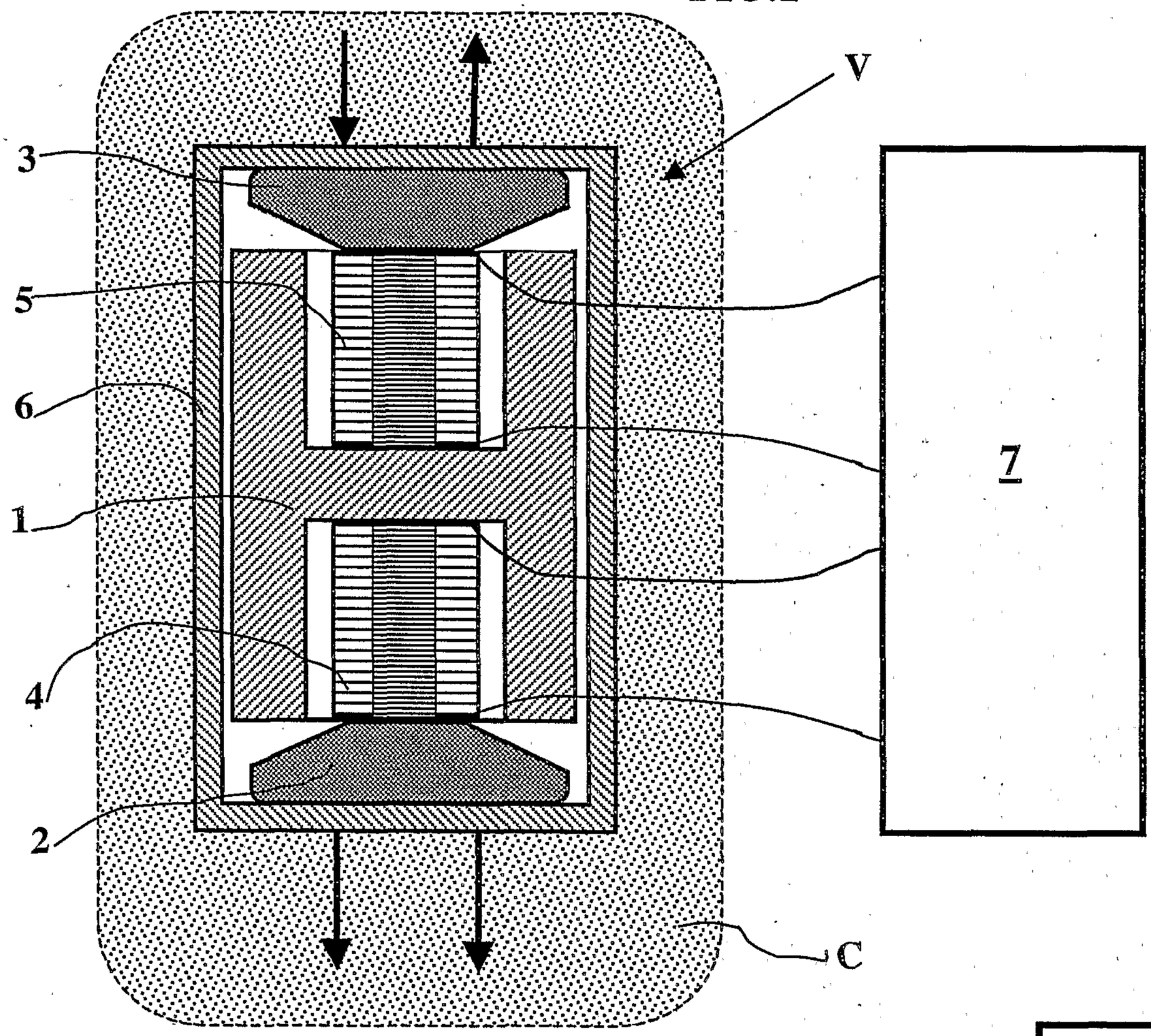


FIG.2

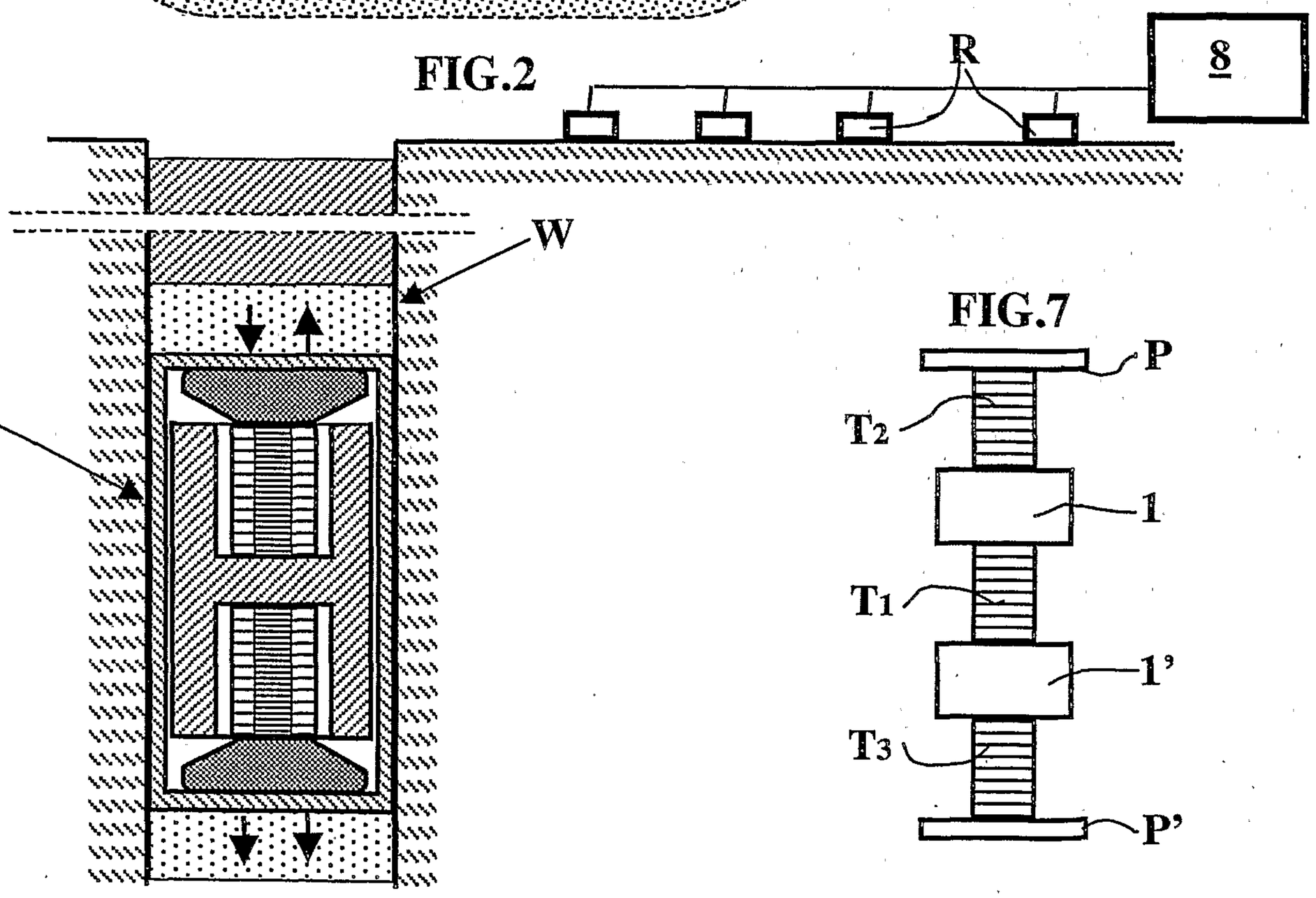


FIG.7

FIG.3A



FIG.3B



FIG.3C

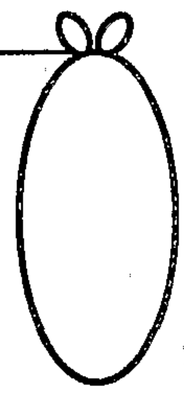


FIG.6

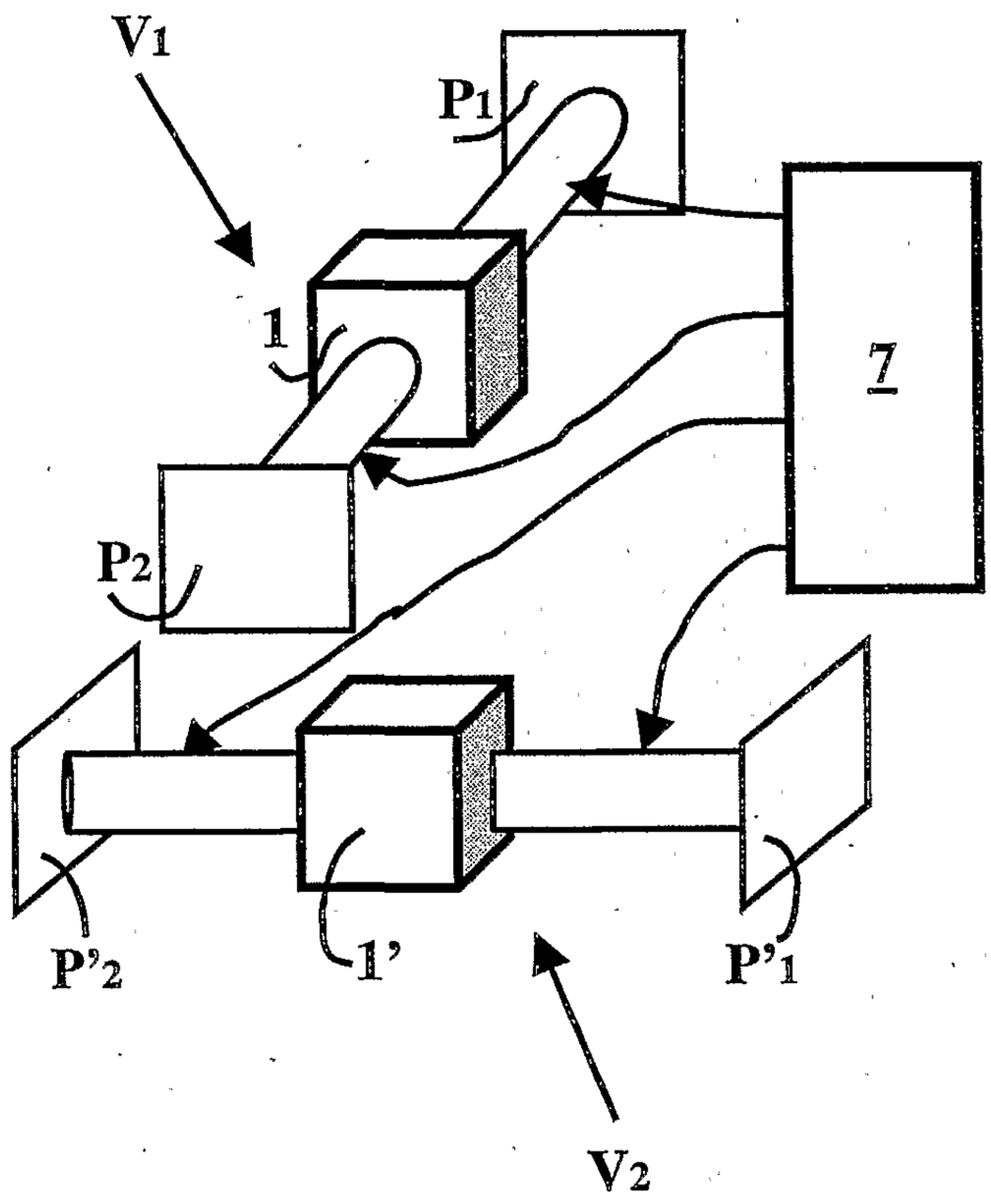


FIG.5

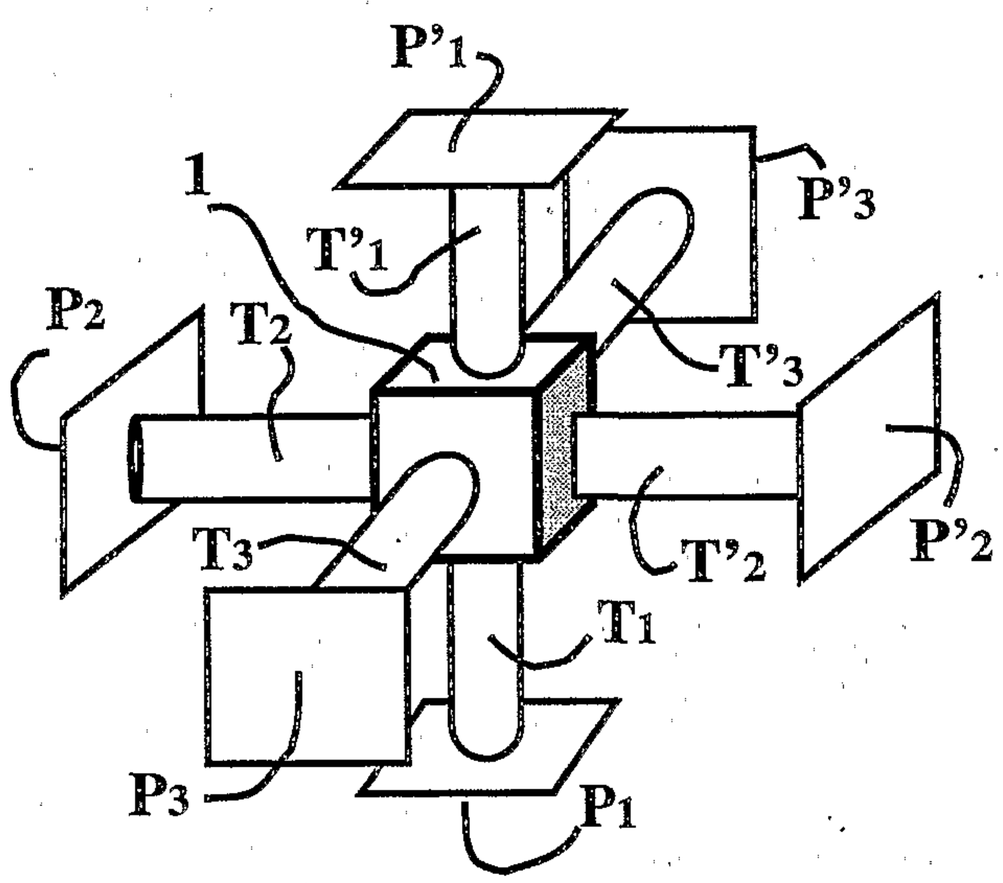


FIG.4

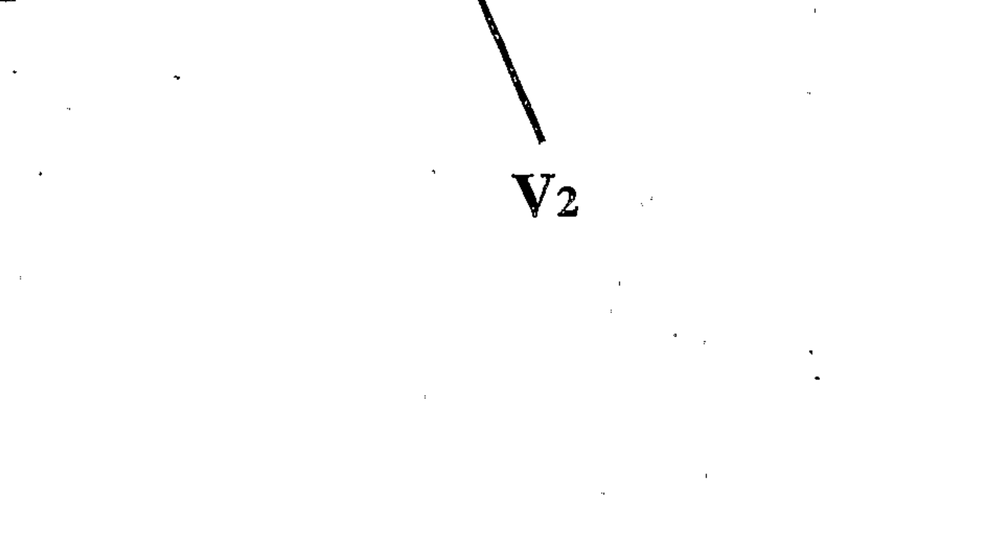
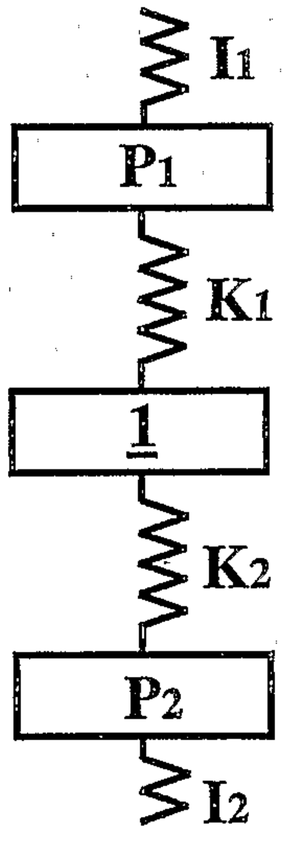
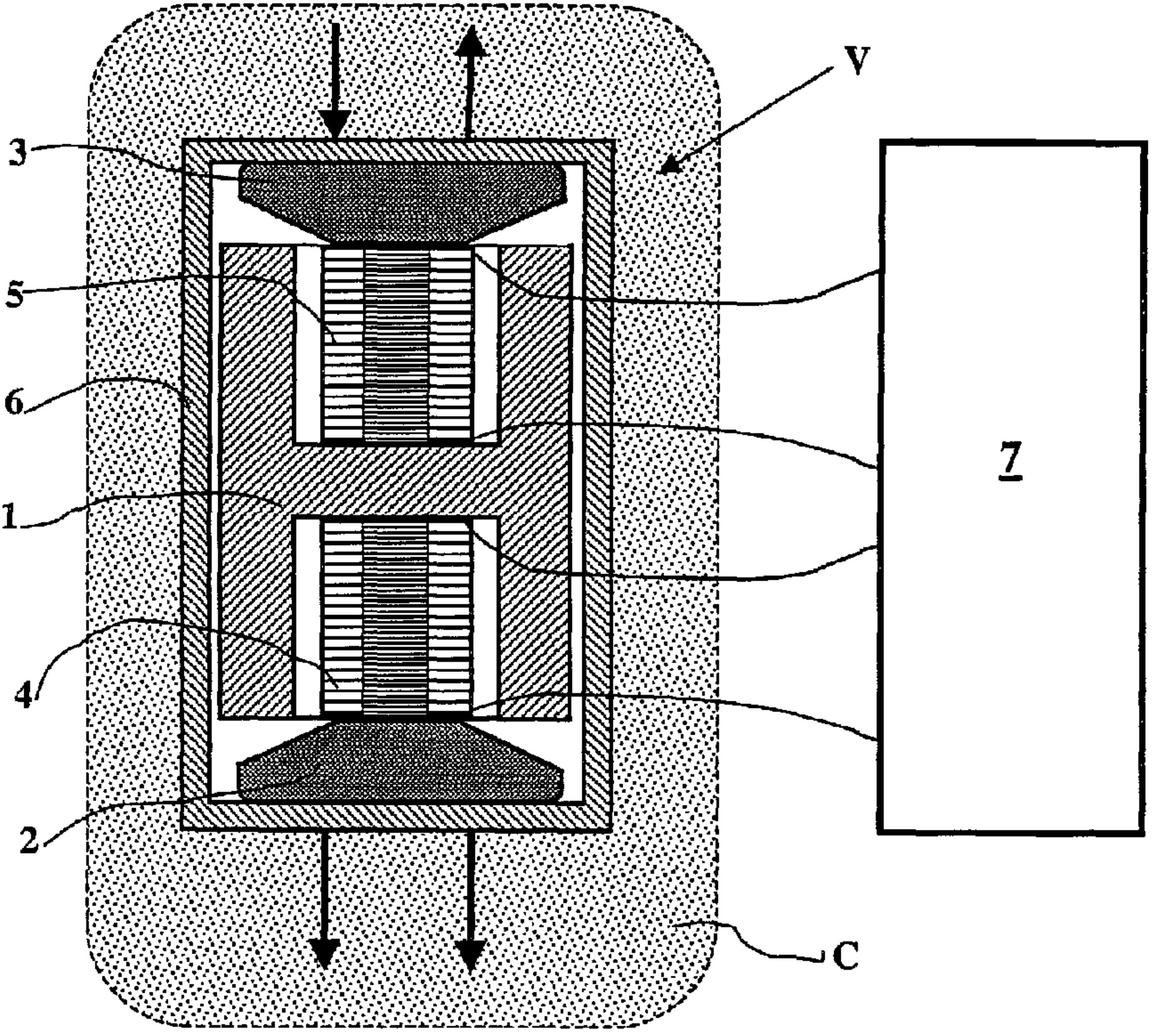


FIG.8




V
3
5
6
1
4
2
7
C