(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) **N° de publication :** **2 772 971**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **97 16359**

(51) Int Cl^6 : **H 01 F 7/06,** A 61 M 1/10

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 23.12.97.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 25.06.99 Bulletin 99/25.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire :** *Se reporter à la fin du présent fascicule*

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

(71) **Demandeur(s) :** *COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE Etablissement de caractere scientifique technique et industriel* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** LOCATELLI MARCEL, GRUSS JEAN ANTOINE et BOUVIER ALAIN.

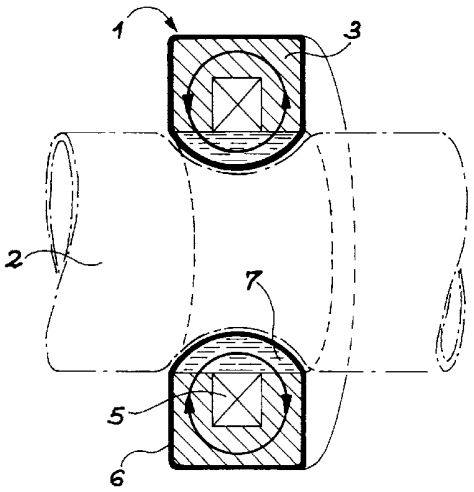
(73) **Titulaire(s) :**

(74) **Mandataire(s) :** BREVATOME.

(54) ACTIONNEUR A FERROFLUIDE DE PROXIMITE.

(57) L'invention concerne un actionneur à ferrofluide (1) destiné à fournir une action mécanique en réponse à un signal électrique d'excitation, comprenant:

- un bobinage (5) susceptible d'être alimenté par ledit signal électrique d'excitation,
- un circuit magnétique (3) formant un réceptacle rigide pour contenir ledit bobinage (5), ce réceptacle étant fermé à l'exception d'une ouverture formant entrefer,
- une enveloppe souple (6) associée au circuit magnétique (3), recouvrant ladite ouverture, pour constituer avec celui-ci une enceinte fermée contenant le ferrofluide (7), l'enceinte ainsi constituée procurant au ferrofluide (7) des moyens de rétention ailleurs que dans la zone d'entrefer en l'absence du signal électrique d'excitation et permettant le déplacement du ferrofluide (7) depuis les moyens de rétention jusqu'à la zone d'entrefer en présence du signal électrique d'excitation, le déplacement du ferrofluide (7) fournissant ladite action mécanique.



FR 2 772 971 - A1

ACTIONNEUR A FERROFLUIDE DE PROXIMITE

Domaine technique

La présente invention concerne un actionneur à ferrofluide de proximité. Un tel actionneur s'applique en particulier à des dispositifs d'assistance cardiaque. Il peut aussi être disposé autour d'un organe, par exemple autour d'une artère.

Etat de la technique antérieure

Un actionneur à ferrofluide utilise les propriétés d'un ferrofluide pour déplacer un volume donné.

Les ferrofluides, ou liquides magnétiques, sont constitués à partir d'une suspension colloïdale de particules magnétiques dans un liquide porteur. On connaît en particulier l'effet de pression magnétique présent à l'interface d'un ferrofluide plongé dans un champ magnétique. Le brevet US-A-4 967 831 décrit une application des ferrofluides pour effectuer un pompage alternatif afin d'obtenir le retour d'un liquide sur l'évaporateur d'un caloduc fonctionnant en apesanteur. Dans le domaine biomédical, les ferrofluides ont trouvé des applications en tant qu'agent de contraste pour l'imagerie médicale à résonance magnétique. Ils peuvent être utilisés dans des dispositifs jouant le rôle de muscles ou d'actionneurs artificiels comme cela est décrit dans le document EP-A-0 272 445.

Les ferrofluides peuvent aussi être utilisés dans le domaine des coeurs artificiels. Le document EP-A-0 272 445 déjà cité et le brevet US-A-4 650 485 décrivent des pompes de coeur artificiel

à ferrofluide. Dans ces documents, le sang circule dans l'actionneur lui-même, ce qui amène des risques importants de thrombose et d'hémolyse du fait, d'une part des surfaces artificielles importantes en contact avec le sang, d'autre part des zones inévitables de turbulences élevées ou de stase dans la pompe. De plus, le ferrofluide et le sang ne sont séparés que par une membrane souple, amenant un risque important d'empoisonnement du sang en cas de rupture de celle-ci. Dans une variante du brevet US-A-4 650 485, le sang est même en contact direct avec le ferrofluide ce qui constitue un risque supplémentaire dû à la miscibilité des fluides et à la fragmentation à l'interface.

Le brevet US-A-3 750 067 divulgue un actionneur à ferrofluide dans lequel le circuit magnétique est constitué par le ferrofluide lui-même et dont seulement une faible partie est mobile. La réluctance magnétique de l'ensemble est assez importante, ce qui signifie que l'énergie électrique nécessaire est importante. Le rendement de ce dispositif est donc faible.

Les actionneurs à ferrofluide sont généralement constitués d'un électro-aimant utilisant ou non un circuit magnétique ouvert de forme générale en C. Dans une telle configuration, le volume à déplacer se trouve dans l'espace libre situé entre les extrémités du circuit, désignées sous le nom de pièces polaires. Le flux de fuite représente alors une partie importante et qui peut être gênante dans certaines applications, d'une part pour des risques éventuels de perturbations par ce flux, d'autre part du fait du gaspillage d'énergie que représente ces fuites. Ces considérations sont très pénalisantes pour des applications dans le domaine médical.

Exposé de l'invention

Pour remédier à ces inconvénients, on propose, selon la présente invention, un actionneur à ferrofluide dont le circuit magnétique de l'électro-aimant enveloppe en partie le bobinage. La fermeture du circuit magnétique se traduit alors par la formation d'un écran magnétique total, d'où des fuites de flux nulles ou quasi nulles.

L'invention a donc pour objet un actionneur à ferrofluide destiné à fournir une action mécanique en réponse à un signal électrique d'excitation, comprenant :

- un bobinage susceptible d'être alimenté par ledit signal électrique d'excitation,
- un circuit magnétique formant un réceptacle rigide pour contenir ledit bobinage, ce réceptacle étant fermé à l'exception d'une ouverture formant entrefer,
- une enveloppe souple associée au circuit magnétique, recouvrant ladite ouverture, pour constituer avec celui-ci une enceinte fermée contenant le ferrofluide, l'enceinte ainsi constituée procurant au ferrofluide des moyens de rétention ailleurs que dans la zone d'entrefer en l'absence du signal électrique d'excitation et permettant le déplacement du ferrofluide depuis les moyens de rétention jusqu'à la zone d'entrefer en présence du signal électrique d'excitation, le déplacement du ferrofluide fournissant ladite action mécanique.

Le circuit magnétique peut posséder une forme torique. Afin d'exercer l'action mécanique vers l'intérieur, l'ouverture du circuit magnétique peut être dirigée vers l'axe de la forme torique.

Le circuit magnétique peut aussi être constitué par une boucle en forme de selle de cheval. Comme précédemment, l'ouverture du circuit magnétique peut être dirigée vers l'intérieur de la boucle en forme de selle de cheval.

Pour une application dans le domaine médical, la forme du circuit magnétique peut épouser la forme d'une zone d'un organe d'un être vivant auquel l'actionneur doit fournir une action mécanique.

Il peut être avantageux pour l'actionneur de comporter des moyens formant aimant permanent pour localiser le ferrofluide en l'absence de signal électrique d'excitation.

L'invention a aussi pour objet un système pour fournir une action mécanique, comportant :

- un manchon cylindrique en matériau souple,

- au moins un actionneur tel que décrit ci-dessus et dont le circuit magnétique, possédant une forme torique, a son ouverture dirigée vers l'axe de la forme torique, l'actionneur étant disposé autour du manchon de façon à exercer son action mécanique sur le manchon.

Selon une première variante de réalisation, l'enveloppe souple de l'actionneur et le manchon ont une partie commune par laquelle s'exerce l'action mécanique de l'actionneur.

Selon une deuxième variante de réalisation, l'enveloppe souple de l'actionneur et le manchon forment des éléments distincts, un lubrifiant étant prévu entre ces éléments.

Le système peut être enfermé dans une enveloppe rigide contenant un gaz et en communication de fluide avec une chambre de compensation.

Il peut comporter des moyens formant aimant permanent permettant, en l'absence du signal d'excitation, de repousser le ferrofluide au delà d'une position dite position d'équilibre du manchon.

Brève description des dessins

L'invention sera mieux comprise au moyen de la description qui va suivre, donné à titre d'exemple non limitatif, accompagnée des dessins annexés parmi lesquels :

- la figure 1 représente un actionneur à ferrofluide selon la présente invention, placé sur un conduit souple à déformer, par exemple une artère, et dans l'état non excité,
- la figure 2 représente l'actionneur de la figure 1 dans l'état excité,
- la figure 3 représente plusieurs actionneurs à ferrofluide selon l'invention, de forme torique, utilisés pour une aide au mouvement dU coeur d'un patient,
- la figure 4 représente deux actionneurs à ferrofluide selon l'invention, de configuration en selle de cheval, utilisés pour une aide au mouvement du coeur d'un patient,
- la figure 5 représente un actionneur à ferrofluide selon l'invention, de forme torique, vu en coupe transversale, équipé d'aimants permanent pour la localisation du ferrofluide,
- la figure 6 représente un système pour fournir une action mécanique sur un manchon cylindrique, comportant deux actionneurs selon l'invention,
- les figures 7A, 7B et 7C illustrent le fonctionnement d'un actionneur à ferrofluide selon

l'invention équipé d'aimants permanents permettant l'obtention d'une compliance déterminée dans l'état non excité de l'actionneur.

Description détaillée de modes de réalisation de l'invention

Les exemples de réalisation qui suivent portent, à titre d'exemple, sur des applications de l'invention destinées au domaine médical. Cependant, l'invention concerne aussi tous les autres domaines où un actionneur à ferrofluide peut être utilisé.

La figure 1 montre un actionneur à ferrofluide 1 selon l'invention placé autour d'une artère, par exemple une aorte 2. L'actionneur 1 est avantageusement de forme torique, de dimensions adaptées à l'aorte considérée.

L'actionneur 1 comprend un circuit magnétique 3 de forme torique, pourvu d'une rainure intérieure 4 formant réceptacle pour un bobinage d'excitation 5 et dont l'ouverture forme entrefer. Le circuit magnétique 3 est percé d'un trou non représenté pour assurer les connexions électriques avec le bobinage.

Le circuit magnétique 3, pourvu du bobinage d'excitation 5, est placé dans une enveloppe souple 6 en matériau biocompatible. Celle-ci se présente initialement comme un tube qui est enfilé sur le circuit magnétique. Les extrémités du tube sont réunies et scellées. Le circuit magnétique 3 peut être rendu solidaire de l'enveloppe souple 6 le long de sa surface de plus grand diamètre. Les dimensions de l'enveloppe souple 6 sont prévues pour pouvoir contenir en outre du ferrofluide 7. L'actionneur étant prévu pour venir, à l'état non excité, en simple contact avec l'aorte 2, le

ferrofluide 7 se trouve alors confiné, dans cet état, dans deux zones latérales de l'actionneur comme cela est représenté sur la figure 1.

A l'état excité, c'est-à-dire lorsque le bobinage 5 est alimenté, le ferrofluide 7 est attiré dans l'entrefer qu'il vient ainsi fermer comme le montre la figure 2. Les lignes de flux magnétique dans le circuit magnétique se referment alors au travers du ferrofluide. Le déplacement du ferrofluide 7 vers le centre du tore provoque une pression à cet endroit et fournit une action mécanique sur l'aorte 2 qui se déforme en conséquence.

A la coupure de l'alimentation électrique du bobinage, le ferrofluide est repoussé par l'aorte qui reprend la position illustrée par la figure 1.

Une telle structure torique peut s'adapter à différentes configurations et en particulier dans le cas d'une aide au mouvement du coeur. C'est ce que montre la figure 3 où trois actionneurs toriques à ferrofluide 11, 12 et 13 entourent l'ensemble des deux ventricules d'un coeur 10.

D'autres formes peuvent être données à l'actionneur. Toujours dans le cas d'une aide au mouvement du coeur, on peut utiliser un système d'aide à deux sous-ensembles, à raison d'un par ventricule. C'est ce que montre la figure 4 où deux actionneurs à ferrofluide 15 et 16 sont utilisés. Les actionneurs 15 et 16 sont fixés sur le coeur 10 au moyen d'un système de maintien non représenté. Pour chaque actionneur 15 et 16, le circuit magnétique est constitué par une boucle en forme de selle de cheval. L'ouverture du circuit magnétique est dirigée vers le coeur.

Il est assez aisé d'adapter la forme de l'actionneur à ferrofluide aux différentes applications possibles. Un actionneur en forme de selle de cheval

permet en particulier une application à la compression d'une artère sans avoir à sectionner celle-ci.

Une amélioration importante de l'actionneur selon l'invention, en particulier lorsque la localisation du ferrofluide à l'état non excité est un critère important, consiste à utiliser des aimants permanents afin de localiser le ferrofluide à un endroit désiré. Ceci permet de garder le ferrofluide à proximité de l'entrefer. De même, en cas de rupture accidentelle de l'enveloppe souple, le ferrofluide reste localisé, ce qui évite une dispersion du liquide magnétique en attendant une intervention qui devient ainsi moins critique. Cet avantage est particulièrement intéressant pour une application médicale. Un actionneur ainsi équipé est représenté à la figure 5. Sur cette figure, l'actionneur, de forme torique, est vu en coupe transversale. On reconnaît le circuit magnétique 20 pourvu d'une rainure intérieure 21 dans laquelle est logé un bobinage 22. Le circuit magnétique 20 et le bobinage 22 sont contenus dans l'enveloppe souple 23 qui contient également le ferrofluide 24. Des aimants permanents 25 et 26, de forme annulaire, sont fixés sur les faces externes, perpendiculaires à l'axe du tore, du circuit magnétique 20. Les aimants permanents 25 et 26 sont prévus pour localiser le ferrofluide 24 sur ces faces externes du circuit magnétique 20 en l'état non excité de l'actionneur, comme c'est le cas sur la figure 5. A l'état excité, le ferrofluide est attiré dans l'entrefer du circuit magnétique 20.

La figure 6 illustre une autre application d'actionneurs à ferrofluide selon l'invention sur le réseau sanguin. Dans cette application, un manchon artificiel 30, en matériau biocompatible, est inséré sur une artère ou sur l'aorte 31. Dans ce cas, le

système pour fournir une action mécanique peut comprendre un ou plusieurs actionneurs élémentaires, de forme torique, enfilés sur le manchon 30. Le système représenté à la figure 6 comprend deux actionneurs élémentaires 32 et 33. L'enveloppe souple et étanche d'un actionneur peut intégrer ou non une partie du manchon. Sur la figure 6, l'enveloppe souple de l'actionneur 33 et le manchon 30 ont une partie commune. L'autre possibilité d'association a été représentée sur la même figure : l'enveloppe souple de l'actionneur 32 et le manchon 30 forment des éléments distincts et un lubrifiant peut alors être inséré entre le manchon 30 et l'actionneur 32.

Cette disposition offre la possibilité de favoriser le flux sanguin dans une direction donnée en jouant sur la séquence d'alimentation des actionneurs. Par exemple, pour obtenir un flux vers le bas, on alimente l'actionneur 32, puis l'actionneur 33. Ensuite, on coupe l'alimentation de l'actionneur 32, puis l'alimentation de l'actionneur 33.

En fonctionnement, la compensation des variations de volume peut être assurée par la souplesse de l'enveloppe souple des actionneurs et par la souplesse des tissus corporels environnants. Dans une variante de réalisation, le système peut comprendre une enveloppe rigide 34, scellée sur le manchon 30 pour constituer un espace annulaire intérieur 35 dans lequel se trouvent les actionneurs 32 et 33 et qui est rempli d'un gaz. L'espace 35 est relié, par un conduit 36, à une chambre de compensation souple 37 qui permet d'assurer la compensation des variations de volume.

Dans une variante de réalisation, les aimants utilisés pour localiser le ferrofluide peuvent aussi être utilisés pour assurer une compliance donnée lors des phases non actives du fonctionnement de

l'actionneur à ferrofluide selon l'invention. Les figure 7A à 7C illustrent le fonctionnement d'un tel actionneur. Sur ces figures, l'actionneur 40 est du type torique et exerce une action mécanique vers l'intérieur, par exemple sur un manchon 41. L'actionneur 40, vu en coupe transversale, n'a été représenté que partiellement. Il est du type représenté à la figure 5 et comprend un circuit magnétique 42, un bobinage d'excitation 43, une enveloppe souple 44 et un ferrofluide 45. Il comprend en outre des aimants permanents 46 et 47. Ces aimants permanents sont disposés de façon à permettre, en l'absence de signal d'excitation, de repousser le ferrofluide au delà d'une position dite position d'équilibre du manchon. La figure 7A montre l'actionneur lors d'une phase active : le ferrofluide 45 est dans la zone d'entrefer et exerce une pression sur le manchon 41. Lorsque le signal électrique d'excitation est annulé et que le manchon 41 est en expansion sous l'action de la pression du fluide circulant à l'intérieur du manchon (par exemple sous l'action de la pression sanguine), les aimants 46 et 47 repoussent le ferrofluide 45 au delà de la position d'équilibre du manchon, représentée à la figure 7B, jusqu'à l'emplacement montré à la figure 7C.

REVENDICATIONS

1. Actionneur à ferrofluide (1,32,33,40) destiné à fournir une action mécanique en réponse à un signal électrique d'excitation, comprenant :

- un bobinage (5,22,43) susceptible d'être alimenté par ledit signal électrique d'excitation,

- un circuit magnétique (3,20,42) formant un réceptacle rigide pour contenir ledit bobinage, ce réceptacle étant fermé à l'exception d'une ouverture formant entrefer,

- une enveloppe souple (6,23,44) associée au circuit magnétique, recouvrant ladite ouverture, pour constituer avec celui-ci une enceinte fermée contenant le ferrofluide (7,24,45), l'enceinte ainsi constituée procurant au ferrofluide des moyens de rétention ailleurs que dans la zone d'entrefer en l'absence du signal électrique d'excitation et permettant le déplacement du ferrofluide depuis les moyens de rétention jusqu'à la zone d'entrefer en présence du signal électrique d'excitation, le déplacement du ferrofluide fournissant ladite action mécanique.

2. Actionneur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le circuit magnétique (3,20,42) possède une forme torique.

3. Actionneur selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'ouverture du circuit magnétique (3,20,42) est dirigée vers l'axe de la forme torique.

4. Actionneur (15,16) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le circuit magnétique est constitué par une boucle en forme de selle de cheval.

5. Actionneur selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'ouverture du circuit magnétique

est dirigée vers l'intérieur de la boucle en forme de selle de cheval.

6. Actionneur selon l'une des revendications 3 ou 5, caractérisé en ce que ladite forme du circuit magnétique épouse la forme d'une zone d'un organe (2,10) d'un être vivant auquel l'actionneur doit fournir une action mécanique.

7. Actionneur selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens formant aimant permanent (25,26; 46,47) pour localiser le ferrofluide en l'absence de signal électrique d'excitation.

8. Système pour fournir une action mécanique, comportant :

- un manchon cylindrique (30) en matériau souple,

- au moins un actionneur (32,33) selon la revendication 3, disposé autour du manchon (30) de façon à exercer son action mécanique sur le manchon.

9. Système selon la revendication 8, caractérisé en ce que l'enveloppe souple de l'actionneur (33) et le manchon (30) ont une partie commune par laquelle s'exerce l'action mécanique de l'actionneur.

10. Système selon la revendication 8, caractérisé en ce que l'enveloppe souple de l'actionneur (32) et le manchon (30) forment des éléments distincts, un lubrifiant étant prévu entre ces éléments.

11. Système selon l'une quelconque des revendications 8 à 10, caractérisé en ce qu'il est enfermé dans une enveloppe rigide (34) contenant un gaz et en communication de fluide avec une chambre de compensation (37).

12. Système selon l'une quelconque des revendications 8 à 11, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens formant aimant permanent (46,47) permettant, en l'absence du signal d'excitation, de repousser le ferrofluide (45) au delà d'une position dite position d'équilibre du manchon (41).

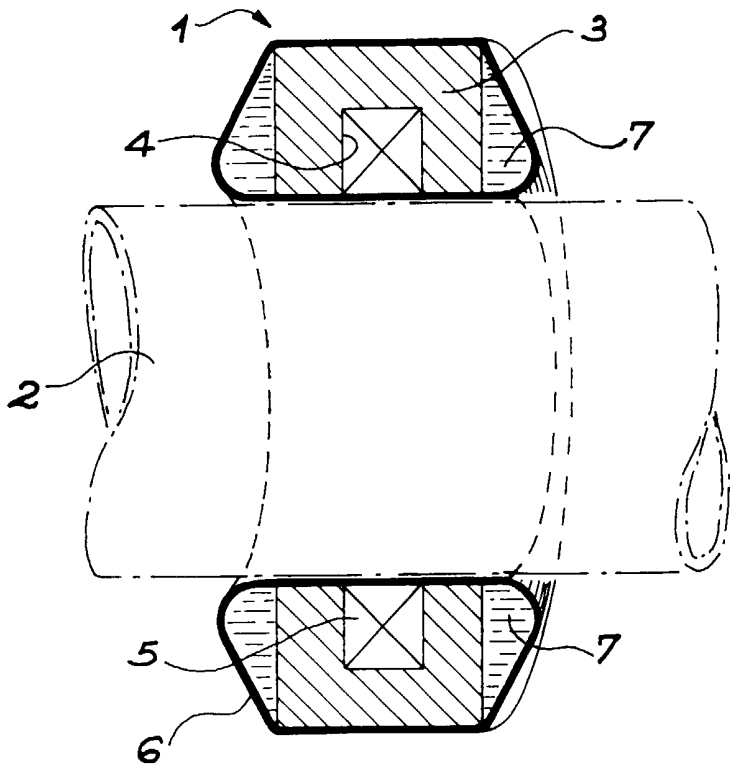


FIG. 1

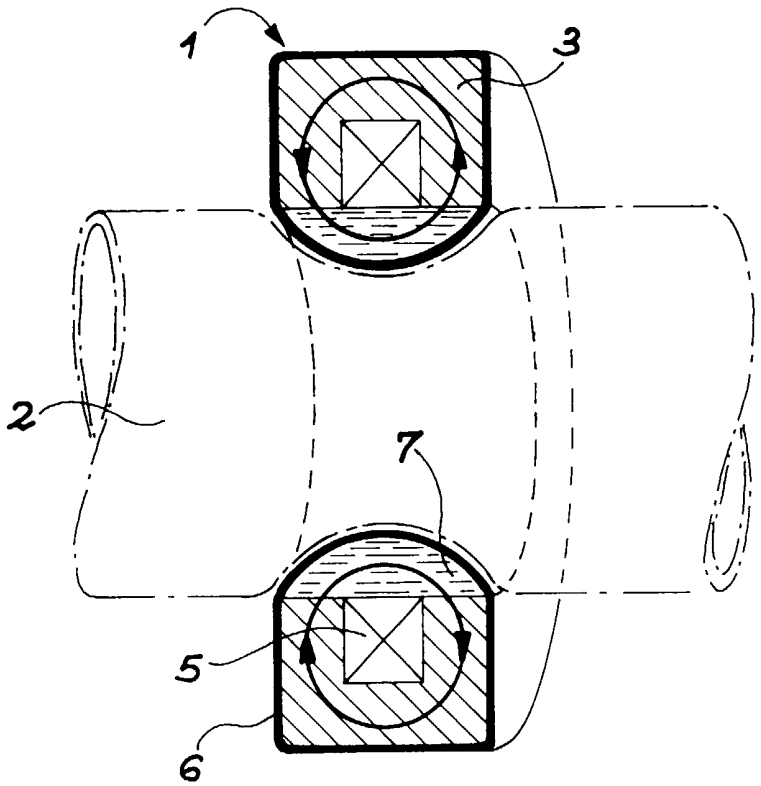


FIG. 2

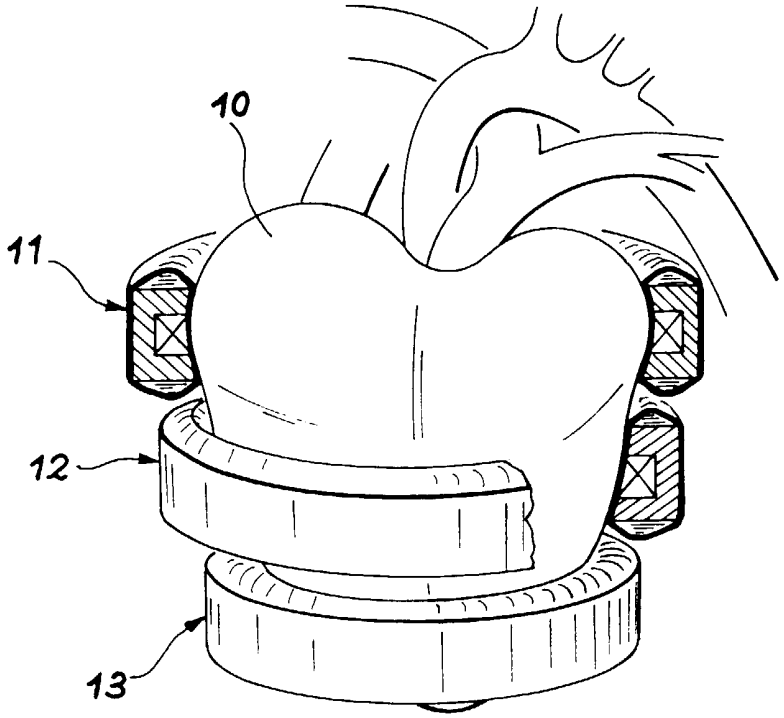


FIG. 3

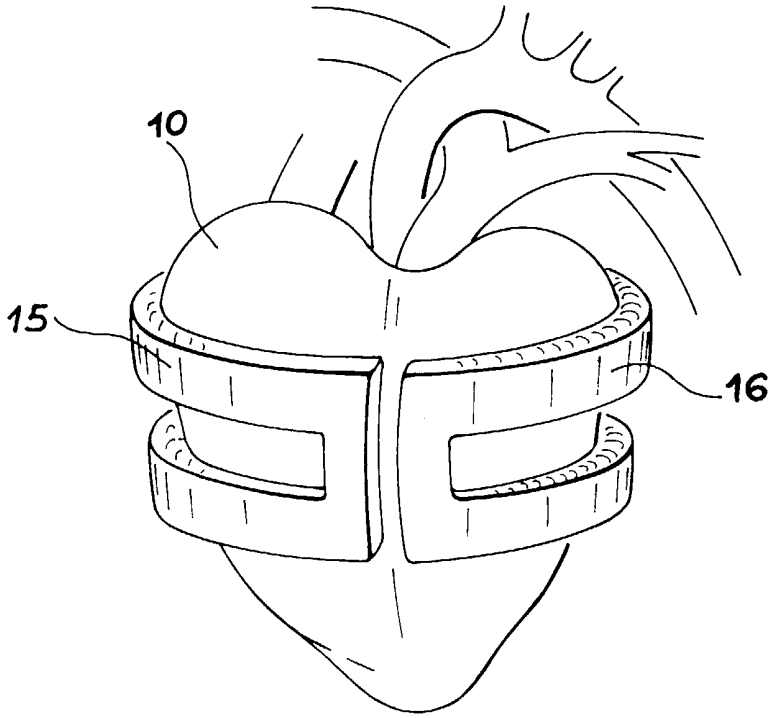


FIG. 4

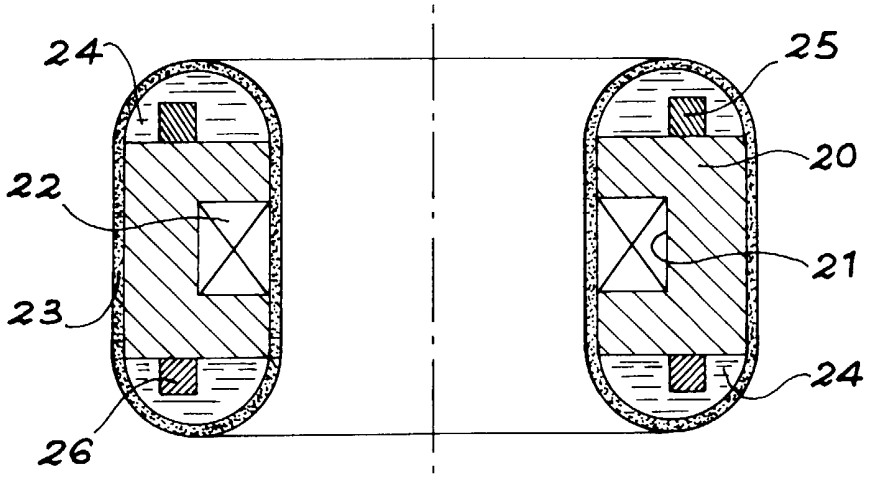


FIG. 5

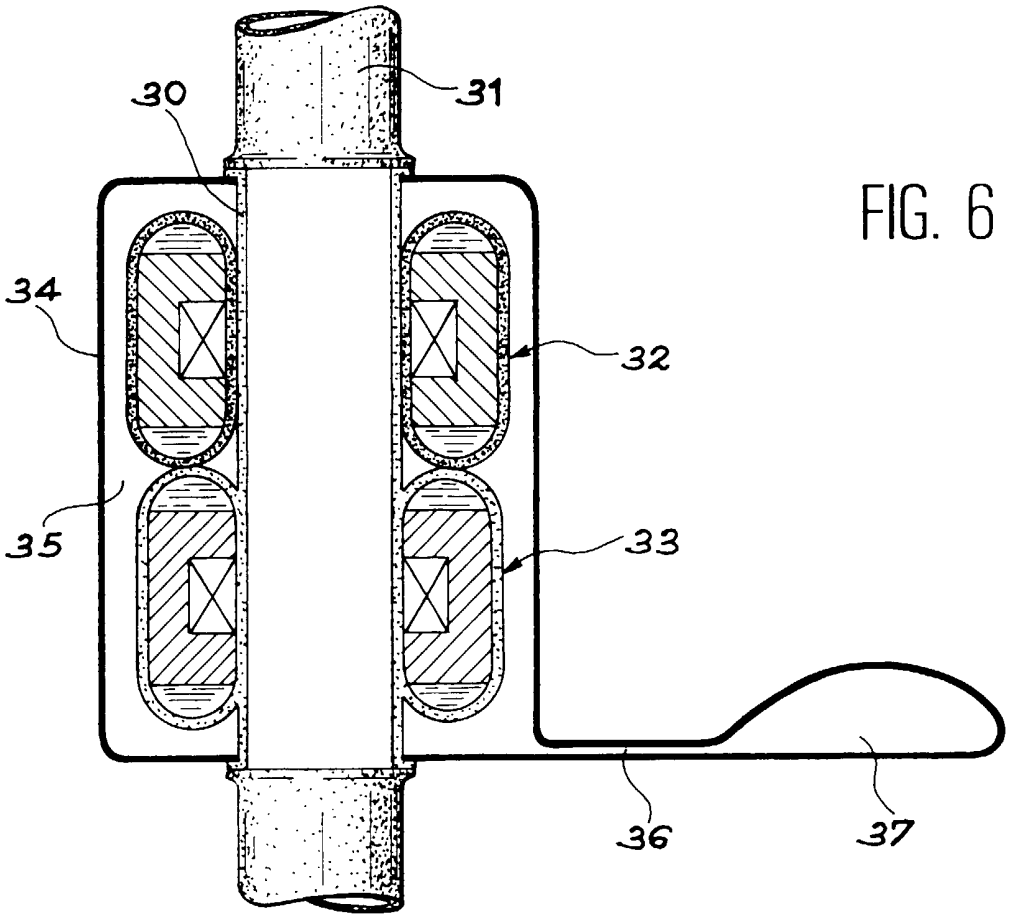


FIG. 6

FIG. 7A

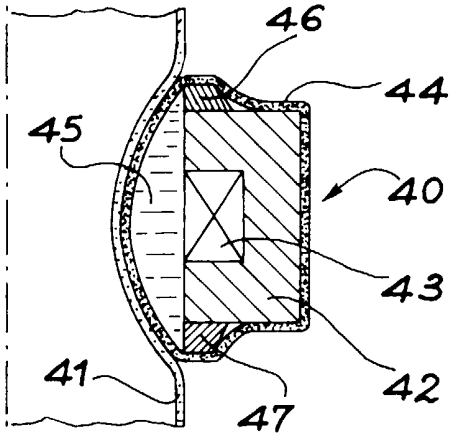


FIG. 7B

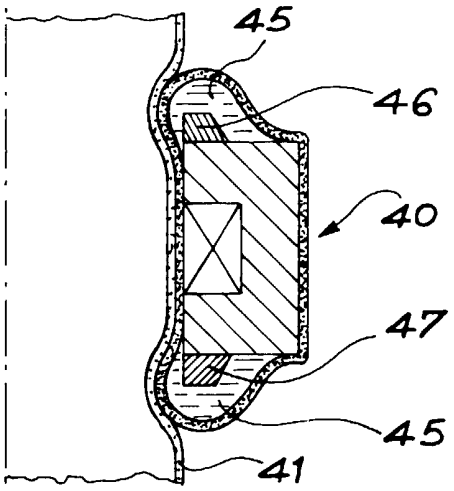
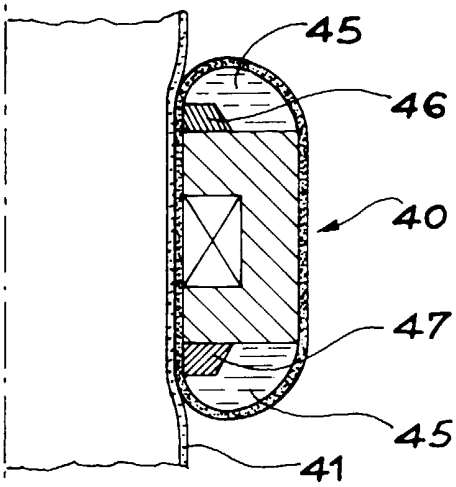


FIG. 7C



2772971

REPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
de la
PROPRIETE INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRELIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement national

FA 551911
FR 9716359

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendications concernées de la demande examinée
X	US 3 677 667 A (MORRISON CLYDE A) 18 juillet 1972 * colonne 2, ligne 30 - colonne 4, ligne 30; figures 1-3 *	1-3,6,8, 9
A	WO 97 31662 A (HAEHNDEL THOMAS ;STAHLMANN HANNS DIETRICH (DE); NETHE ARNIM (DE);) 4 septembre 1997 * page 5, ligne 1 - page 6, dernière ligne; revendications; figures *	1,6,12
A	US 2 792 536 A (IMMEL) 14 mai 1957 * colonne 3, ligne 53 - colonne 4, ligne 3; figures 11-13 *	1
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 017, no. 423 (M-1458), 6 août 1993 & JP 05 087056 A (NIPPON TELEGR & TELEPH CORP), 6 avril 1993 * abrégé *	1

DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)

A61M
F04B
H01F

1

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
2 septembre 1998	Marti Almeda, R

CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons

& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 03.82 (P04C13)