

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

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

2 980 572

②1 N° d'enregistrement national : 11 58681

⑤1 Int Cl⁸ : G 01 G 3/16 (2013.01), G 01 N 15/02

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 28.09.11.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 29.03.13 Bulletin 13/13.

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 ATO-
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES — FR.

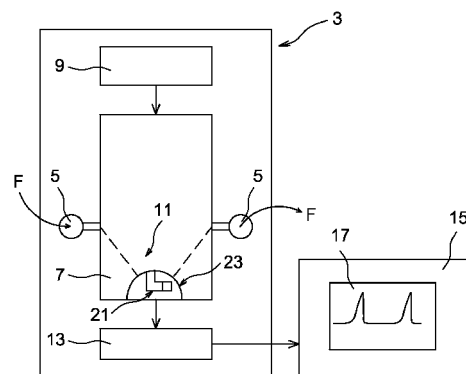
⑦2 Inventeur(s) : BLANCO-GOMEZ GERALD et
AGACHE VINCENT.

⑦3 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES.

⑦4 Mandataire(s) : BREVALEX.

⑤4 DISPOSITIF DE DETECTION MASSIQUE DE PARTICULES EN MILIEU FLUIDE ET PROCEDE DE MISE EN
OEUVRE.

⑤7 L'invention porte sur un dispositif de détection mas-
sique de particules en milieu fluide, comportant un oscilla-
teur (7) électromécanique, des moyens d'excitation (9)
agencés pour mettre en vibration ledit oscillateur, un circuit
fluidique d'alimentation (5) et un réseau fluide (11) inté-
gré dans ledit oscillateur, ledit réseau fluide (11) étant en
communication fluide avec ledit circuit d'alimentation (5),
ledit réseau fluide (11) comprenant au moins un site de
piégeage (21) configuré pour piéger une particule d'intérêt
en fonction de la taille de ladite particule d'intérêt.



FR 2 980 572 - A1



**DISPOSITIF DE DÉTECTION MASSIQUE DE PARTICULES EN
MILIEU FLUIDE ET PROCÉDÉ DE MISE EN ŒUVRE.**

DESCRIPTION

5

DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne le domaine de la
détection massique ou gravimétrique à partir
d'échantillons liquides en utilisant des structures
10 résonantes de types NEMS/MEMS (Nano/Micro Electro
Mechanical System).

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Dans de nombreux domaines industriels, on cherche
à détecter des particules dans un milieu fluide.

15 C'est le cas notamment dans le domaine des
biotechnologies (par exemple la cytométrie) où on a
besoin de détecter en direct des agents pathogènes.
C'est également le cas dans le domaine de l'analyse
physique ou chimique des fluides pour la
20 caractérisation de micro/nanoparticules.

La technique de détection massique repose sur les
détection et quantification des décalages de la
fréquence de résonance d'un oscillateur
électromécanique lorsqu'une particule se dépose à sa
25 surface. Dans l'ensemble de la description, on entend
par particule, une bille (pré-fonctionnalisée ou non)
de taille micrométrique ou nanométrique, mais aussi un
objet chimique ou biologique de types protéine,
peptide, fragment d'ADN, bactérie, virus, ou d'autres
30 cellules, etc.

Il existe plusieurs travaux décrivant la mise en vibration d'un résonateur ou oscillateur immergé dans un milieu liquide. Cependant, le facteur de qualité d'une telle structure est relativement faible, en raison de l'augmentation de l'amortissement du mouvement vibratoire lié à la viscosité et densité élevées du milieu liquide par rapport à un milieu sec.

Pour contourner ce problème, il y a eu des travaux consistant à évider l'oscillateur afin d'y confiner la solution à analyser au sein même de l'oscillateur. On peut citer l'article de J. Lee et al., "Toward Attogram Mass Measurements in Solution with Suspended Nanochannel Resonators", Nano letters, 2010, 10, 2537-2542. L'oscillateur se présente sous la forme d'une poutre en porte-à-faux (cantilever) dans laquelle est prévue une veine fluidique. L'oscillateur est mis en vibration par couplage électrostatique, tandis que le fluide à analyser s'écoule au sein de la veine fluidique piloté par un différentiel de pression. Ce dispositif permet de réaliser une détection d'espèces biologiques en milieu liquide tout en entretenant le mouvement oscillatoire dans un environnement sec (air ou sous vide modéré). Deux mécanismes sont prévus pour maintenir de façon temporaire des particules à l'extrémité libre de la poutre. Un premier mécanisme adapté aux structures vibrantes hors plan, concerne l'ajustement de la force centrifuge induite par le mouvement vibratoire de l'oscillateur, ayant l'écoulement contrôlé par un différentiel de pression dans la veine fluidique. Un second mécanisme de maintien temporaire de particules

concerne l'alternation rapide du sens de l'écoulement du fluide.

Cependant, ces genres de mécanismes peuvent engendrer un décrochage de particule, et de plus, le système est bloquant, ainsi dès qu'une première particule est fixée, les particules amenées d'un réservoir en amont seront de même fixées à la suite de la première particule. En outre, l'utilisateur doit disposer d'un équipement capable de gérer les flux du liquide en pression. Par ailleurs, la détection de la résonance mécanique est réalisée par un montage optique composé d'un laser, d'une photodiode et d'un circuit électrique de traitement de signaux, lesquels contribuent à l'encombrement global du système.

D'autres travaux ont proposés des oscillateurs comprenant une veine fluidique dont la paroi interne est fonctionnalisée afin de permettre d'accrocher des espèces biologiques ou chimiques déterminées en fonction de leur affinité. Cela suppose une étape préalable et incommode de fonctionnalisation chimique dans tout le réseau fluidique. De plus, un même dispositif ne peut être dédié qu'à la capture d'une seule espèce biologique ou chimique.

On citera encore la demande internationale WO2009/141516 décrivant un dispositif de détection gravimétrique de particules en milieu liquide assurant un facteur de qualité important et un encombrement réduit. Ce dispositif comprend un oscillateur électromécanique plan comportant un canal fluidique en communication avec une cavité traversante ménagée dans l'oscillateur et des moyens d'actionnement de

l'oscillateur par couplage électrostatique. Le piégeage des particules est réalisé de manière chimique en fonctionnalisant la paroi interne de la cavité au sein de l'oscillateur ou de manière électrique basée sur un effet diélectrophorétique selon une configuration quadripolaire des électrodes. Ce dispositif ne permet le piégeage des particules qu'en fonction de leur nature biologique.

Ainsi, l'objet de la présente invention est de remédier aux inconvénients précités en proposant un dispositif de détection massique de particules en milieu fluide de sensibilité optimale tout en permettant un piégeage simple, efficace, et plus distinctif des particules.

15

EXPOSÉ DE L'INVENTION

L'invention a pour objet un dispositif de détection massique de particules en milieu liquide, comportant un oscillateur électromécanique, des moyens d'excitation agencés pour mettre en vibration ledit oscillateur, un circuit fluide d'alimentation, et un réseau fluide intégré dans ledit oscillateur, ledit réseau fluide étant en communication fluide avec le circuit fluide d'alimentation, le réseau fluide comprenant au moins un site de piégeage configuré pour piéger une particule d'intérêt en fonction de la taille de ladite particule d'intérêt.

Ainsi, en adaptant les dimensions du réseau fluide intégré dans ledit oscillateur, les particules d'intérêt peuvent être détectées de manière sélective en fonction de leur taille.

30

Avantageusement, ledit site de piégeage est situé au niveau d'un ventre de vibration de l'oscillateur électromécanique.

5 Ainsi, les sites de piégeage sont placés aux endroits les plus propices pour optimiser la sensibilité de la détection. En effet, la position de la particule piégée au niveau d'un emplacement présentant un maximum d'amplitude de vibration augmente le décalage de la fréquence de résonance et par
10 conséquent optimise la détection de la particule et augmente la sensibilité du dispositif de détection.

Avantageusement, ledit site de piégeage est formé dans une branche fluidique de piégeage montée en dérivation par rapport à une branche fluidique de
15 contournement, ladite branche de piégeage présentant, dans le cas où le site de piégeage est libre, une résistance fluidique inférieure à celle de ladite branche de contournement.

Plus particulièrement, le réseau fluidique
20 comporte une branche fluidique de piégeage formant ledit site de piégeage, et une branche fluidique de contournement qui est montée en dérivation par rapport à ladite branche fluidique de piégeage, ladite branche fluidique de piégeage comprenant un logement prolongé
25 par une restriction, lesdites branches fluidique de piégeage et de contournement étant dimensionnées de manière à ce que lorsque ledit logement est libre, ladite branche de piégeage présente une résistance fluidique inférieure à celle de ladite branche de
30 contournement incitant une première particule d'intérêt à passer par la branche de piégeage pour se faire

piéger dans ledit logement, et lorsque ledit logement est occupé, ladite branche de piégeage présente une résistance fluïdique supérieure à celle de ladite branche de contournement incitant une particule d'intérêt suivante à passer par la branche de contournement.

Ceci permet de faciliter un piégeage purement fluïdique de la particule par opposition à des piégeages plus complexes de type mécanique, optique ou électrique de l'art antérieur. Ainsi, la présente invention permet un couplage efficace entre les emplacements correspondant aux réponses mécaniques optimales de détection massique des particules et un piégeage fluïdique passif basé sur la sélection par la taille des particules.

Avantageusement, le réseau fluïdique comporte une pluralité de sites de piégeage situés aux niveaux de différents ventres de vibration dudit oscillateur.

Ceci permet de piéger une pluralité de particules, ce qui peut augmenter l'efficacité de détection.

Ledit réseau fluïdique est un microréseau ou un nanoréseau fluïdique.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, les sites de piégeage sont arrangés en série aux bornes du circuit d'alimentation.

Ceci facilite le piégeage de particules de manière séquentielle le long d'un chemin fluïdique dudit réseau.

Selon un autre mode de réalisation particulier de l'invention, les sites de piégeage sont arrangés en parallèle aux bornes du circuit d'alimentation.

5 Ceci permet un piégeage quasi-simultané des particules.

Selon un aspect de la présente invention, ledit oscillateur est de type plaque à cavité évidée présentant une forme prise parmi un disque, un anneau, et un polygone.

10 Selon un autre aspect de la présente invention, ledit oscillateur est un résonateur de type poutre cantilever, poutre bi-encastree, nanofil, ou membrane.

Ceci permet de choisir l'oscillateur et le nombre de sites de piégeage les plus adaptés aux types des
15 particules d'intérêt.

Avantageusement, ledit oscillateur est de forme carrée et présente une largeur et une épaisseur telles que le rapport de la largeur sur l'épaisseur est supérieur à 10, et par exemple compris entre 10 et 30.

20 C'est une forme facile à fabriquer et présente quatre sites de piégeage.

Ceci augmente le choix des fréquences de résonance et de la forme du réseau fluide selon l'application visée.

25 Avantageusement, le dispositif comporte des moyens d'excitation et des moyens de détection qui sont choisis parmi les moyens suivants : capacitif, piézo-électrique, piézo-métallique, électro-magnétique, piézo-résistif, thermique, thermo-élastique, et
30 optique.

Avantageusement, le circuit d'alimentation comporte des premier et second canaux d'alimentation qui sont séparés l'un de l'autre par le réseau fluïdique, ledit réseau fluïdique étant en communication d'une part avec le premier canal d'alimentation et d'autre part avec le second canal d'alimentation de sorte que le débit dans le réseau fluïdique est contrôlable par un ajustement des débits dans les premier et second canaux d'alimentation.

5

Ainsi, on peut finement ajuster le débit dans le réseau fluïdique de manière simple en définissant les différences des débits dans les canaux d'alimentation. Ceci permet également de renouveler les solutions d'intérêt de manière plus aisée en vidangeant tout simplement les canaux d'alimentation qui présentent de grandes sections au lieu de vidanger les solutions d'intérêt à travers le réseau fluïdique intégré qui est de plus faible diamètre hydraulique.

10

15

Avantageusement, le système de détection comporte un ensemble d'oscillateurs électromécaniques de différentes échelles, chacun des oscillateurs intégrant un réseau fluïdique d'une échelle correspondante, les différents réseaux fluïdiques étant en communication avec les premier et second canaux d'alimentation.

20

Ceci permet de piéger de manière sélective des particules de tailles variables présentes dans la solution d'intérêt.

25

L'invention vise également un procédé de détection massique de particules en milieu liquide, mis en œuvre avec un dispositif de détection selon l'une

30

quelconque des caractéristiques précédentes, comportant les étapes suivantes :

- alimenter le(s) réseau(x) fluide(s) avec une solution d'intérêt, de telle sorte que des particules cibles soient piégées dans l'oscillateur,
- mettre en vibration le(s) oscillateur(s) à une(des) fréquence(s) de résonance, et
- détecter un décalage de la fréquence de résonance par rapport à une fréquence de référence.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront dans la description détaillée non limitative ci-dessous.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

On décrira à présent, à titre d'exemples non limitatifs, des modes de réalisation de l'invention, en se référant aux dessins annexés, dans lesquels :

La Fig. 1 illustre très schématiquement un dispositif de détection massique de particules en milieu liquide, selon l'invention ;

La Fig. 2 illustre un mécanisme de piégeage dans le réseau fluide intégré à un oscillateur électromécanique, selon l'invention ;

La Fig. 3 illustre une cartographie des amplitudes de vibration pour un oscillateur électromécanique en forme de plaque carrée ;

Les Figs. 4A et 4B illustrent des oscillateurs électromécaniques de type plaque à cavité évidée présentant une forme carrée intégrant des réseaux fluidiques, selon l'invention ;

La Fig. 5 illustre le dispositif de détection dans lequel le circuit d'alimentation comporte des

canaux d'alimentations selon un mode de réalisation préféré de l'invention ; et

Les Figs. 6A et 6B illustrent le dispositif de détection comportant une suite d'oscillateurs électromécaniques de différentes échelles selon des modes de réalisation préférés de l'invention.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ D'UN MODE DE RÉALISATION PRÉFÉRÉ

La Fig. 1 illustre très schématiquement un dispositif de détection massique de particules en milieu liquide, selon l'invention.

Le dispositif de détection 3 comporte un circuit fluidique d'alimentation 5, un oscillateur 7 (ou résonateur) électromécanique, des moyens d'excitation 9 agencés pour mettre en vibration l'oscillateur 7, et un réseau fluidique 11 intégré dans l'oscillateur 7 et alimenté en liquide (solution d'intérêt) F par le circuit fluidique d'alimentation 5.

L'oscillateur 7 électromécanique peut se présenter sous la forme d'une poutre, d'un fil, d'une membrane ou d'une plaque supportée par des moyens de support (voir Fig. 3). Le réseau fluidique 11 est, de préférence, intégré dans l'oscillateur 7 de sorte que le liquide (ou fluide) F analysé par le dispositif de détection 3 est isolé de manière étanche de l'environnement dans lequel l'oscillateur 7 est actionné. Le réseau fluidique 11 est un microréseau ou un nanoréseau fluidique qui peut être constitué de canaux de forme sensiblement parallélépipédique gravés au sein de l'oscillateur 7.

Les moyens d'excitation 9 comportent avantageusement des électrodes disposées en regard de l'oscillateur 7. Ces électrodes sont mises en œuvre et agencées par rapport à l'oscillateur 7 pour que celui-ci puisse entrer en vibration selon un mode de vibration déterminé.

De même, des moyens de détection 13 pour détecter la vibration de l'oscillateur 7 peuvent également comprendre des électrodes disposées en regard de l'oscillateur 7. Dans ce cas, les moyens de détection 13 sont avantageusement intégrés au dispositif de détection 3. Ces moyens de détection 13 sont configurés pour détecter des variations de la fréquence de vibration ou fréquence de résonance de l'oscillateur 7 sachant que toute variation de fréquence est indicative d'une variation de masse de l'oscillateur 7, notamment, suite à un dépôt de particules dans ce dernier. Les moyens de détection 13 peuvent être reliés à un dispositif de traitement 15 de type ordinateur comprenant des moyens de visualisation 17 pour analyser l'évolution de la fréquence de résonance et ainsi procéder à la détection de particules.

Les particules peuvent être des billes fonctionnalisées, par exemple des billes métalliques dont la surface est fonctionnalisée, de manière à constituer une surface de collecte (ou surface de capture) d'une espèce chimique ou biologique, dite espèce cible. Ainsi, avec un oscillateur 7 de même type, on peut moduler le type de bille introduite, et en particulier selon la fonctionnalisation de sa surface externe, de façon à collecter une espèce

chimique ou biologique donnée. Au fur et à mesure que la capture s'effectue, la masse de l'oscillateur 7 croît, entraînant une variation de la fréquence de résonance, dont la détermination permet de quantifier la masse de l'espèce cible collectée. Cela permet d'estimer la quantité ou la concentration de l'espèce cible dans le liquide circulant dans le réseau fluïdique 11. Les particules peuvent aussi être des espèces biologiques de type cellule, bactéries ou virus. L'évolution de la masse de l'oscillateur 7 permet alors de déterminer le comportement de l'espèce dans ce dernier. Par exemple, on peut introduire une cellule et la soumettre à une contrainte (en la soumettant à un fluide particulier) et vérifier si elle vit (sa masse reste constante, ou augmente) ou si elle meurt (sa masse diminue).

On notera que le dispositif de détection 3 peut être réalisé en deux parties selon une méthode connue décrite dans la demande internationale WO2009/141516 de la demanderesse. Une première partie peut être structurée sur un premier substrat et une deuxième partie peut être réalisée sur un deuxième substrat scellé sur le premier substrat. Les substrats peuvent être choisis parmi des matériaux de nature métallique, polycristalline, ou monocristalline.

Conformément à l'invention, le réseau fluïdique 11 comprend au moins un site de piégeage 21 configuré pour piéger une particule d'intérêt en fonction de la taille de la particule d'intérêt de types cellules ou billes pré-fonctionnalisées.

La Fig. 2 illustre le mécanisme de piégeage dans le réseau fluïdique intégré à un oscillateur électromécanique.

Le piégeage fluïdique d'une particule d'intérêt
5 est assuré par un circuit fluïdique de piégeage 112 appartenant au réseau fluïdique 11. Ce circuit fluïdique 112 comporte une branche fluïdique de piégeage 113 montée par rapport à une branche fluïdique de contournement 114 en dérivation, le site de piégeage
10 21 étant formé dans la branche fluïdique de piégeage 113. En effet, la branche de piégeage 113 correspond à un canal comportant un logement 115 (par exemple, de section sensiblement semi-circulaire) prolongé par une restriction 116 selon une configuration de type
15 entonnoir. Le logement 115 qui correspond à l'emplacement de piégeage est situé en amont de la restriction 116 par rapport à l'écoulement du liquide F.

Ainsi, dans le circuit de piégeage 112,
20 l'écoulement du liquide F se scinde au niveau de l'orifice amont 117 du logement 115, en deux chemins qui se raccordent au niveau de l'orifice de sortie 119 de la restriction 116. Le premier chemin est aménagé par la restriction 116 de la branche de piégeage 113 et
25 le second chemin plus long, est formé par la branche de contournement 114.

La configuration et le dimensionnement du circuit de piégeage 112 sont réalisés en accord avec les applications de la détection et les caractéristiques
30 des particules visées. Ainsi, la géométrie du site de piégeage 21 est dimensionnée de manière sélective en

fonction de la taille ou diamètre de la particule d'intérêt. En particulier, le logement 115 et l'orifice entre ce dernier et la restriction 116 peuvent être facilement dimensionnés pour accueillir et retenir la
5 particule d'intérêt.

Le principe de piégeage fluïdique de particules est décrit dans la publication de W. H. Tan et al., "A trap-and-release integrated microfluidic system for dynamic microarray applications", *Proceedings of the*
10 *National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104, 1146-1151. Ce principe repose sur une variation de la résistance fluïdique 'vue' par chaque particule circulant dans le réseau fluïdique.

Ainsi, les branches de piégeage 113 et de contournement 114 sont dimensionnellement configurées pour présenter dans le cas où le site de piégeage 21 est libre, une résistance fluïdique inférieure à celle de la branche de contournement 114.
15

Plus particulièrement, lorsque le site de piégeage 21 est libre, une particule donnée a tendance à passer par la branche de piégeage 113 qui présente une résistance fluïdique relativement plus faible que celle de contournement 114 et se fait donc piéger par le site de piégeage 21. La particule placée dans le
20 site de piégeage 21 joue alors le rôle d'un obstacle, augmentant ainsi considérablement la résistance fluïdique de la branche de piégeage 113. Ainsi, la particule suivante qui va 'voir' le site 21 occupé va observer une très grande résistance fluïdique et va
25 donc emprunter la branche de contournement 114.
30

Ce critère de piégeage impose que le débit Q_1 dans la branche de piégeage 113 libre soit supérieur à celui Q_2 de la branche de contournement 114 selon l'expression suivante :

$$5 \quad P = \left(\frac{C_2}{C_1}\right) \left(\frac{L_2}{L_1}\right) \left(\frac{W_2+H}{W_1+H}\right)^2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^3 = \frac{Q_1}{Q_2} \geq 1 \quad (1)$$

où H représente la hauteur des branches 113 et 114 sachant que tous les canaux intégrés dans l'oscillateur 7 ont sensiblement la même hauteur; W_1 représente la largeur du premier chemin (c'est-à-dire, la largeur de la restriction 116 dans la branche de piégeage 113); W_2 représente la largeur du second chemin (c'est-à-dire, la largeur de la branche de contournement 114); L_1 (respectivement L_2) représente la longueur du premier chemin (respectivement du second chemin); α_1 (respectivement α_2) est le ratio entre la largeur et la hauteur du premier chemin (respectivement du second chemin) en respectant la condition $\alpha_{1,2} \leq 1$; et $C_{1,2}(\alpha_{1,2}) = f \times Re$ où f est un coefficient de friction et Re le nombre de Reynolds. Ainsi, pour un bon fonctionnement de piégeage, la valeur de P relatif aux dimensions du circuit fluïdique de piégeage 112 est choisie supérieure à 1 tout en étant minimisée afin de limiter l'encombrement. On note que P est indépendant des intervalles de débit utilisés dans la limite des régimes laminaires ($Re \ll 1$).

Ainsi, on prend en compte le diamètre de la particule d'intérêt pour déterminer le dimensionnement du circuit de piégeage 112, et donc du réseau fluïdique 11 qui lui-même permet de déterminer les dimensions de l'oscillateur 7. Généralement, on dimensionne W_1 et W_2

en fonction de la dimension de la particule que l'on souhaite piéger. Ensuite, on détermine les autres paramètres dimensionnels ou fluidiques du dispositif en utilisant l'équation (1).

5 Par exemple, afin de retenir des particules de $15\ \mu\text{m}$ de diamètre, on peut utiliser pour les canaux du circuit de piégeage 112, les paramètres suivants : une hauteur H de $18\ \mu\text{m}$; un premier chemin (restriction 116 dans la branche de piégeage 113) de largeur W_1 de $7,5\ \mu\text{m}$
10 et de longueur L_1 de $4,5\ \mu\text{m}$; et un second chemin de largeur W_2 de $20\ \mu\text{m}$ et de longueur L_2 de $172,5\ \mu\text{m}$. Ainsi, le ratio des longueurs des premier et second chemins est de 38,3 et la valeur de P est de 3,95. On notera que les microbilles ou particules de $15\ \mu\text{m}$ peuvent être
15 fonctionnalisées pour l'étude de réactions d'hybridation ou pour réaliser une détection spécifique de sondes ADN, antigènes, protéines. De même, le site de piégeage 21 peut aussi être fonctionnalisé ce qui augmente la capacité de détection.

20 Selon un deuxième exemple, si on veut retenir des particules ou billes de plus petite taille par exemple de l'ordre de $2\ \mu\text{m}$, et en prenant en compte une résolution de fabrication autour de $1\ \mu\text{m}$, les paramètres suivants peuvent être utilisés pour le
25 dimensionnement du circuit de piégeage 112 : $H = 3\ \mu\text{m}$, $W_1 = 1\ \mu\text{m}$, $W_2 = 4\ \mu\text{m}$, ce qui implique un ratio de longueurs $L_1/L_2 > 24,7$. On peut par exemple prendre $L_1/L_2 = 50$ et dans ce cas, la valeur de P atteint 2,03, ce qui est suffisant pour que le site de piégeage 21

fonctionne convenablement tout en restant assez faible afin de minimiser l'encombrement.

Un troisième exemple qui peut être appliqué à la biologie cellulaire concerne la détection des virus VIH qui présentent typiquement un diamètre de 100 nm et une masse d'environ 80 ag. Dans ce cas, les paramètres suivants peuvent être utilisés pour le dimensionnement du circuit de piégeage : $H = 200 \text{ nm}$, $W_1 = 70 \text{ nm}$, $W_2 = 150 \text{ nm}$, ce qui implique un ratio de longueurs L_1/L_2 au moins égal à 7, et dans le cas de la limite inférieure, la valeur de P atteint 1,02.

Avantageusement, le réseau fluïdique 11 comprend au moins un site de piégeage 21 situé au niveau d'un ventre 23 de vibration de l'oscillateur 7 électromécanique. L'emplacement du site de piégeage 21 au niveau du ventre 23 de vibration de l'oscillateur 7 est avantageux, car il augmente la sensibilité de détection de la particule d'intérêt.

En effet, lorsqu'une particule de masse Δm se fixe sur l'oscillateur 7 électromécanique, le décalage de la fréquence de résonance Δf de l'oscillateur 7 dépend de la masse ajoutée Δm , de la masse totale m de l'oscillateur 7 ainsi que d'un coefficient de correction α qui dépend spécifiquement de la position de la particule ajoutée définie selon l'équation suivante :

$$\frac{\Delta f}{f} = -\alpha \frac{\Delta m}{m}$$

Ainsi, en piégeant une particule de masse ponctuelle Δm donnée dans une position présentant un

maximum d'amplitude de vibration on obtient un décalage de la fréquence de résonance maximum. Autrement dit, le piégeage d'une particule dans une telle position, (c'est-à-dire, dans un ventre de vibration), permet de
5 minimiser le coefficient de correction α et par conséquent, d'accroître la sensibilité du dispositif.

A titre d'exemple, la Fig. 3 illustre une cartographie des amplitudes de vibration pour un oscillateur 7 électromécanique en forme de plaque
10 carrée. On utilise par exemple des moyens d'excitation 9 capacitive (via les électrodes) pour exciter l'oscillateur 7 selon un mode d'excitation de contour dit de Lamé. On utilise aussi les moyens de détection 13 pour détecter la réponse mécanique de l'oscillateur
15 en terme fréquentiel.

Les réponses mécaniques de l'oscillateur 7 selon cet exemple, montrent que les coins et le centre de la plaque constituent des nœuds de vibration 25 (zones de vibration minimale), tandis que les milieux des côtés
20 de la plaque constituent des ventres de vibration 23 (zones dont l'amplitude de vibration est maximale).

Ainsi, on utilise la régionalisation de la réponse massique de l'oscillateur 7 pour placer le(s) site(s) de piégeage 21 dans les zones 23 présentant le
25 maximum d'amplitude de vibration en fonction de sa géométrie et de son mode d'excitation.

Avantageusement, selon la présente invention, l'emplacement du site de piégeage 21 au sein de l'oscillateur 7 permet un couplage efficace entre le
30 lieu correspondant à une réponse mécanique optimale de détection massique d'une particule et un piégeage

fluidique passif basé sur la ségrégation par la taille de la particule.

Par ailleurs, on peut prendre avantage des nœuds de vibration 25 pour fixer l'oscillateur 7. En effet, la Fig. 3 montre que les moyens de supports 27 en forme de bras sont répartis aux coins de la plaque carrée afin de minimiser les contraintes mécaniques appliquées sur le résonateur lors d'un cycle vibratoire. Alors, la vibration n'est pas dissipée au reste du dispositif de détection 3 et est concentrée sur l'oscillateur 7. On notera que les bras sont aussi utilisés pour faire passer les connexions entre le réseau fluidique 11 et le circuit d'alimentation 5.

On notera que le réseau fluidique peut comporter plusieurs sites de piégeage 21 situés sur le même ventre 23 de vibration de l'oscillateur 7.

En outre, dans le cas où l'oscillateur 7 comporte plusieurs ventres 23 de vibrations, le réseau fluidique 11 peut comporter une pluralité de sites de piégeage 21 situés aux niveaux des différents ventres 23 de vibration de l'oscillateur 7.

Les sites de piégeage 21 peuvent être associés selon une configuration quelconque aux bornes du circuit d'alimentation 5 dépendant de l'application visée. Ainsi, les sites de piégeage 21 peuvent être arrangés en série, en parallèle ou selon une toute autre configuration combinant les deux types d'associations.

Les Figs. 4A et 4B illustrent des oscillateurs électromécaniques de type plaque à cavité évidée présentant une forme carrée intégrant des réseaux

fluidiques, en configuration série (Fig. 4A) et parallèle (Fig. 4B).

L'oscillateur de forme carrée est facile à fabriquer et peut présenter une largeur et une épaisseur telles que le rapport de la largeur sur l'épaisseur est supérieure à 10, et de préférence compris entre 10 et 30. Cet oscillateur comporte en son sein quatre sites de piégeage situés aux niveaux des quatre ventres de vibration de l'oscillateur.

10 Selon l'exemple de la Fig. 4A, les sites de piégeage 21 sont arrangés en série aux bornes du circuit d'alimentation 5. Ainsi, l'occupation des sites 21 est réalisée de manière séquentielle.

En revanche, dans l'exemple de la Fig. 4B, les sites de piégeage 21 sont arrangés en parallèle aux bornes du circuit d'alimentation 5, chaque site 21 étant directement relié au circuit d'alimentation 5. Dans ce cas, on peut avoir un piégeage quasi-simultané des particules. De plus, les sites de piégeage 21 peuvent être différemment dimensionnés afin de piéger des particules de tailles différentes.

25 Plus généralement, l'oscillateur 7 de type plaque à cavité évidée peut présenter la forme d'un disque, d'un anneau, ou d'un polygone. Bien entendu, le nombre de ventres 23 de vibration dépend de la forme de la plaque, mais aussi du mode de vibration.

L'oscillateur peut aussi présenter la forme d'une poutre en porte-à-faux (cantilever), d'une poutre bi-encastree, d'un nanofil, ou d'une membrane qui peut éventuellement être percée. Dans le cas d'une poutre cantilever, qui vibre selon le mode fondamental de

flexion, il y a seulement un ventre de vibration au sommet libre de la poutre qui vibre avec la plus grande amplitude.

Par ailleurs, les moyens d'excitation 9 peuvent être choisis parmi les moyens suivants : capacitif, piézo-électrique, piézo-métallique, électromagnétique, thermique, thermo-élastique, et optique.

Avantageusement, le piégeage fluïdique et la maximisation de la réponse du détecteur massique selon l'invention sont indépendants du mode d'excitation et permet donc de choisir le mode d'excitation vibratoire le plus adapté. Le mode vibratoire peut être choisi en fonction du type de l'oscillateur 7 et de l'application visée. Ainsi, le mode vibratoire peut être pris dans l'ensemble constitué par un mode vibratoire de volume (extensionnel), un mode de contour de Lamé, un mode vibratoire dit de « verre à vin » (wine-glass), un mode vibratoire de torsion, un mode vibratoire de flexion, et un mode de membrane.

En outre, les moyens de détection 13 peuvent aussi être choisis de manière indépendante parmi les moyens suivants : capacitif, piézo-électrique, piézo-métallique, piézo-résistif, thermo-élastique, et optique.

La Fig. 5 illustre un dispositif de détection dans lequel le circuit d'alimentation comporte des canaux d'alimentation selon un mode de réalisation préféré de l'invention.

Le circuit d'alimentation 5 comporte des premier et second canaux d'alimentation 51, 52 (ou canaux by-pass) dont les sections sont dans une échelle de

quelques centaines de microns de large et donc beaucoup plus grandes que celles des canaux du réseau fluïdique 11 qui sont dans une échelle micrométrique ou nanométrique. L'extrémité amont 511 du premier canal 51 d'alimentation est connectée à une première entrée 53 fluïdique et son extrémité aval 513 est connectée à une première sortie 54 fluïdique. De même, les extrémités amont 521 et aval 523 du second canal 52 d'alimentation sont connectées à des secondes entrée 56 et sortie 57 fluïdiques respectivement. Les entrées et sorties sont interchangeables (autrement dit, une embouchure peut faire fonction d'entrée ou de sortie, en fonction de l'utilisation du dispositif).

Les premier et second canaux d'alimentation sont séparés l'un de l'autre par le réseau fluïdique. Le réseau fluïdique 11 est alors un réseau central qui est en communication d'une part avec le premier canal 51 d'alimentation et d'autre part avec le second canal 52 d'alimentation de sorte que le débit dans le réseau fluïdique soit contrôlable par un ajustement des débits dans les premier et second canaux d'alimentation. Les premier et second canaux d'alimentation 51, 52 sont avantageusement montés de manière sensiblement symétrique par rapport au réseau fluïdique 11 central.

Les premier et second canaux d'alimentation 51, 52 permettent de régler de manière précise et simple le débit dans le réseau fluïdique 11 central. En effet, on peut régler le débit dans chacun des canaux d'alimentation 51, 52 et le différentiel de débit entre les deux canaux 51, 52 permet de piloter très finement le débit dans le réseau fluïdique 11 central.

De plus, les premier et second canaux d'alimentation 51, 52 qui sont de large section par rapport au réseau fluide 11 central peuvent être rapidement vidangés permettant ainsi de renouveler les solutions d'intérêt de manière aisée. Ainsi, il n'est pas nécessaire de faire passer tout le fluide par le réseau 11 central (un conduit de faible section implique le besoin d'augmenter la différence de pression entre amont et aval pour maintenir un haut débit pour vidanger), ce qui aurait pris beaucoup plus de temps et où de plus, il y aurait eu des risques de blocage ou d'obstruction.

On notera que dans l'exemple de la Fig. 5, les sites de piégeage 21 sont associés en série mais bien entendu, ils peuvent aussi être associés en parallèle (voir Fig. 4B) ou selon une toute autre configuration.

L'alimentation et le contrôle de pilotage du fluide peuvent être assurés par un générateur de débit de type pousse seringue 63 (voir Fig. 6). En variante, le pilotage et l'alimentation du fluide peuvent être assurés par un générateur de pression (non représenté) de type flacon pressurisé.

Par ailleurs, on notera qu'il est aussi envisageable d'avoir un circuit d'alimentation 5 comportant une seule entrée fluide et une seule sortie fluide avec le réseau fluide en communication directe entre l'entrée fluide et la sortie fluide (voir Figs. 4A, 4B).

Par ailleurs, le dispositif de détection selon l'invention peut comporter un ensemble d'oscillateurs 7 électromécaniques de mêmes ou de différentes échelles

connectés en série ou en parallèles aux bornes du circuit d'alimentation 5.

Les Figs. 6A et 6B illustrent un dispositif de détection comportant une suite d'oscillateurs électromécaniques de différentes échelles selon des modes de réalisation préférés de l'invention.

Chacun des oscillateurs 7a-7c électromécaniques intègre un réseau fluidique 11a-11c d'une échelle correspondante et les différents réseaux fluidiques 11a-11c sont en communication avec les premier et second canaux d'alimentation 51, 52.

Les différents réseaux fluidiques 11a-11c sont connectés en dérivation entre les premier et second canaux d'alimentation 51, 52. Ainsi, une distribution des échantillons liquides en configuration parallèle peut traverser les réseaux fluidiques 11a-11c de piégeage de particules de la plus grande taille vers la plus petite taille (comme représenté sur les Fig. 6A) ou inversement (non représenté), en introduisant un module de filtration entre le circuit d'alimentation et les réseaux fluidiques 11a-11c.

Ainsi, les différents réseaux fluidiques 11a-11c peuvent sélectivement piéger des particules de tailles variables présentes dans le fluide correspondant à la solution d'intérêt 61 alimentée par le générateur d'alimentation 63. Ceci est particulièrement intéressant pour des échantillons ou solutions d'intérêt de type sérum accueillant plusieurs espèces de particules de tailles très diverses. Ainsi, un premier réseau fluidique 11a peut être dimensionnellement configuré pour piéger des cellules

de tailles $10\mu\text{m} - 100\mu\text{m}$, un deuxième réseau fluide 11b peut être dimensionnellement configuré pour piéger des bactéries de tailles $0,5\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$, et un troisième réseau fluide 11c peut être dimensionnellement configuré pour piéger des virus de tailles $10\text{nm} - 400\text{nm}$.

L'exemple de la Fig. 6A, montre que chacun des premier et second canaux d'alimentation 51, 52 présente une section constante. En effet, il est assez pratique pour des raisons de fabrication et de vidange d'avoir des canaux d'alimentation de même section tout le long des canaux.

En variante, la Fig. 6B montre que chacun des premier et second canaux d'alimentation 51, 52 peut être formé d'un ensemble de tronçons 51a-51c, 52a-52c de différentes sections. Ceci permet de maintenir un même ratio de résistances hydrauliques entre les tronçons d'alimentation 51a-51c, 52a-52c et ceux du réseau central 11a-11c. Ainsi, on peut faire varier l'ordre de grandeur des résistances hydrauliques des canaux d'alimentation en fonction de l'échelle du réseau fluide afin de mieux régler les débits dans les différents réseaux 11a-11c.

Selon un autre exemple, chacun des canaux d'alimentations peut comporter seulement deux tronçons : un premier tronçon connecté aux réseaux microfluidiques et un second tronçon de plus faible section connecté aux réseaux nanofluidiques permettant d'augmenter la plage de débit pour les plus petits réseaux fluidiques.

Un procédé de détection massique de particules en milieu fluide selon l'invention consiste à mettre en

œuvre le dispositif 3 de détection décrit précédemment. Cette mise en œuvre comprend l'alimentation du(des) réseau(x) fluide(s) 11a-11c avec une solution d'intérêt 61 par l'intermédiaire des canaux d'alimentation 51, 52 de sorte que des particules cibles soient piégées dans l'oscillateur. Ensuite, on utilise les moyens d'excitation 9 pour mettre en vibration le(s) oscillateur(s) 7a-7c à leurs fréquences de résonance respectives. Finalement, on utilise les moyens de détection 13 pour détecter tout décalage de la fréquence de résonance par rapport à une fréquence de référence, indicatif du piégeage de particule(s). Par fréquence de référence, on entend par exemple une fréquence de résonance déterminée préalablement. Il peut notamment s'agir d'une fréquence de résonance avant l'alimentation du réseau fluide avec la solution d'intérêt (résonateur « à vide »), ou d'une fréquence de résonance durant l'alimentation du réseau avec la solution d'intérêt, mais mesurée à un instant antérieur.

On peut observer des signaux ou pics de piégeage sur les moyens de visualisation 17 indiquant l'occupation des différents sites de piégeage 21.

Bien entendu, diverses modifications peuvent être apportées par l'homme du métier à l'invention qui vient d'être décrite, uniquement à titre d'exemples non limitatifs.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de détection massique de particules en milieu liquide, comportant un oscillateur (7) électromécanique, des moyens d'excitation (9) agencés pour mettre en vibration ledit oscillateur, un circuit
5 fluide d'alimentation (5), et un réseau fluide (11) intégré dans ledit oscillateur, ledit réseau fluide (11) étant en communication fluide avec ledit circuit fluide d'alimentation (5), caractérisé
10 en ce que le réseau fluide (11) comprend au moins un site de piégeage (21) configuré pour piéger une particule d'intérêt en fonction de la taille de ladite particule d'intérêt.

15

2. Dispositif de détection selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit site de piégeage est
situé au niveau d'un ventre (23) de vibration de l'oscillateur (7) électromécanique.

20

3. Dispositif de détection selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que ledit site de piégeage est formé dans une branche fluide de piégeage montée en dérivation par rapport à une branche fluide de
25 contournement, ladite branche de piégeage présentant, dans le cas où le site de piégeage est libre, une résistance fluide inférieure à celle de ladite branche de contournement.

30

4. Dispositif de détection selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que le réseau fluide

comporte une pluralité de sites de piégeage situés aux niveaux de différents ventres de vibration dudit oscillateur.

5 5. Dispositif de détection selon la revendication 4, caractérisé en ce que les sites de piégeage sont arrangés en série aux bornes du circuit d'alimentation.

10 6. Dispositif de détection selon la revendication 4, caractérisé en ce que les sites de piégeage sont arrangés en parallèle aux bornes du circuit d'alimentation.

15 7. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit oscillateur est de type plaque à cavité évidée présentant une forme prise parmi un disque, un anneau, et un polygone.

20 8. Dispositif de détection selon la revendication 7, caractérisé en ce que ledit oscillateur est de forme carrée et présente une largeur et une épaisseur telles que le rapport de la largeur sur l'épaisseur est compris entre 10 et 30.

25 9. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ledit oscillateur est un résonateur de type poutre cantilever, poutre bi-encasté, nanofil ou membrane.

30 10. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé

en ce que lesdits moyens d'excitation sont choisis parmi les moyens suivants : capacitif, piézo-électrique, piézo-métallique, électro-magnétique, thermique, thermo-élastique, et optique.

5

11. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de détection choisis parmi les moyens suivants : capacitif, piézo-électrique, piézo-métallique, piézo-résistif, thermo-élastique, et optique.

10

12. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit réseau fluidique est un microréseau ou un nanoréseau fluidique.

15

13. Dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le circuit d'alimentation comporte des premier et second canaux d'alimentation séparés l'un de l'autre par le réseau fluidique, ledit réseau fluidique étant en communication d'une part avec le premier canal d'alimentation et d'autre part avec le second canal d'alimentation de sorte que le débit dans le réseau fluidique soit contrôlable par un ajustement des débits dans les premier et second canaux d'alimentation.

20

25

14. Dispositif de détection selon la revendication 13, caractérisé en ce qu'il comporte un ensemble d'oscillateurs électromécaniques de différentes échelles, chacun des oscillateurs intégrant

30

un réseau fluïdique d'une échelle correspondante et en ce que les différents réseaux fluïdiques sont en communication avec les premier et second canaux d'alimentation.

5

15. Procédé de détection massique de particules en milieu liquide, mise en œuvre avec un dispositif de détection selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte les

10 étapes suivantes :

-alimenter le(s) réseau(x) fluïdique(s) avec une solution d'intérêt,

-mettre en vibration le(s) oscillateur(s) à une(des) fréquence(s) de résonance, et

15

-détecter un décalage de la fréquence de résonance par rapport à une fréquence de résonance de référence.

1 / 5

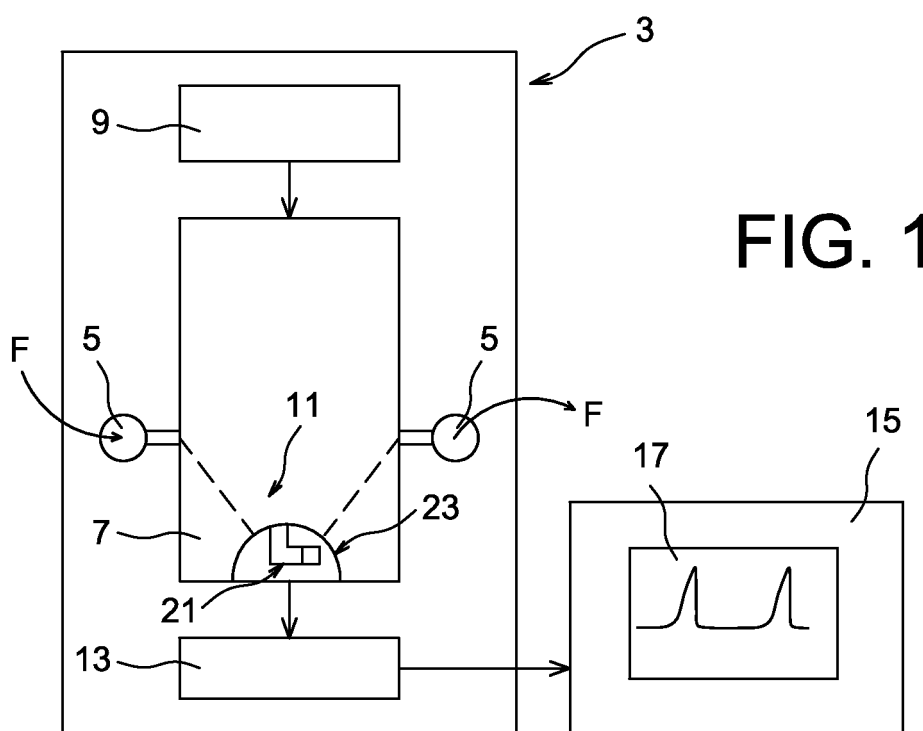
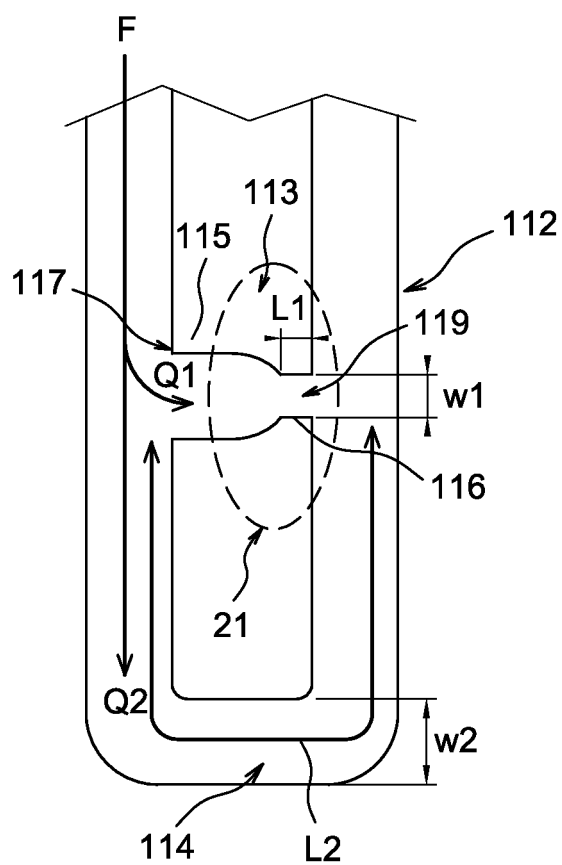


FIG. 2



2 / 5

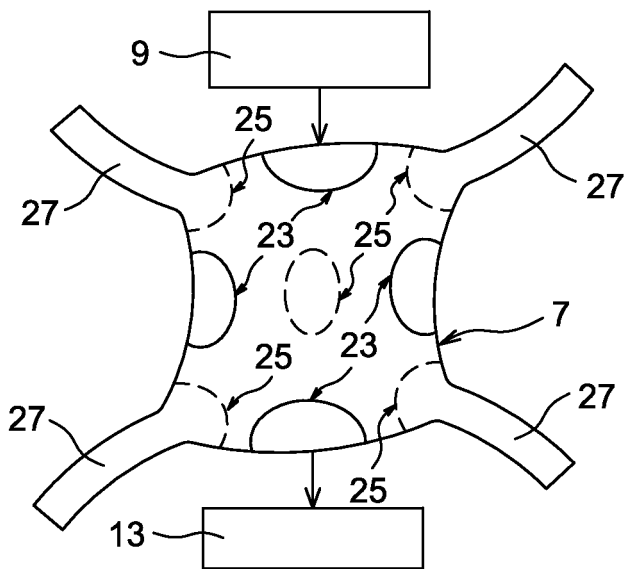


FIG. 3

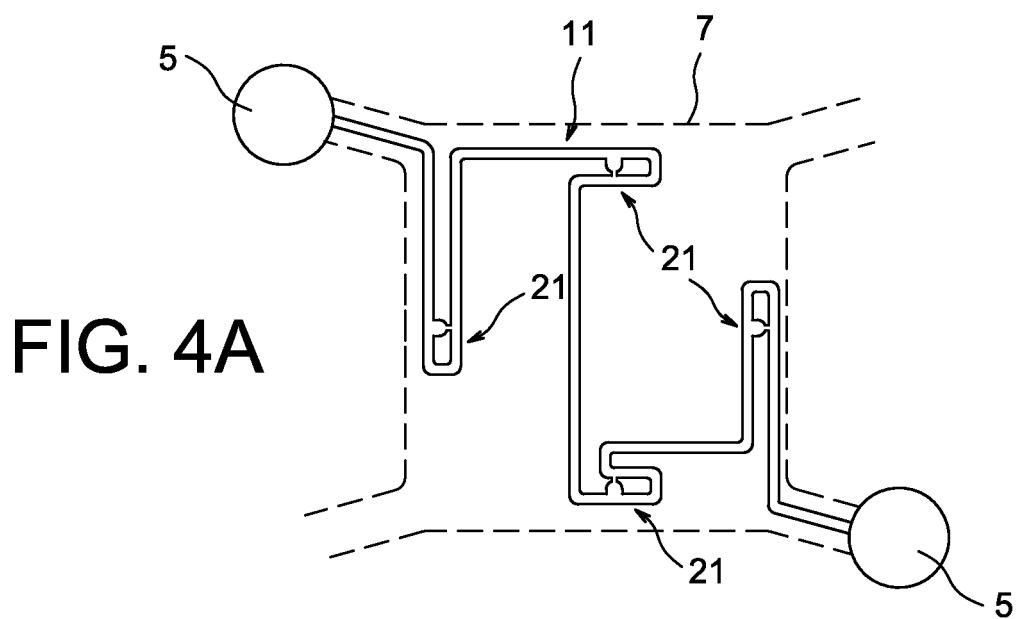


FIG. 4A

3 / 5

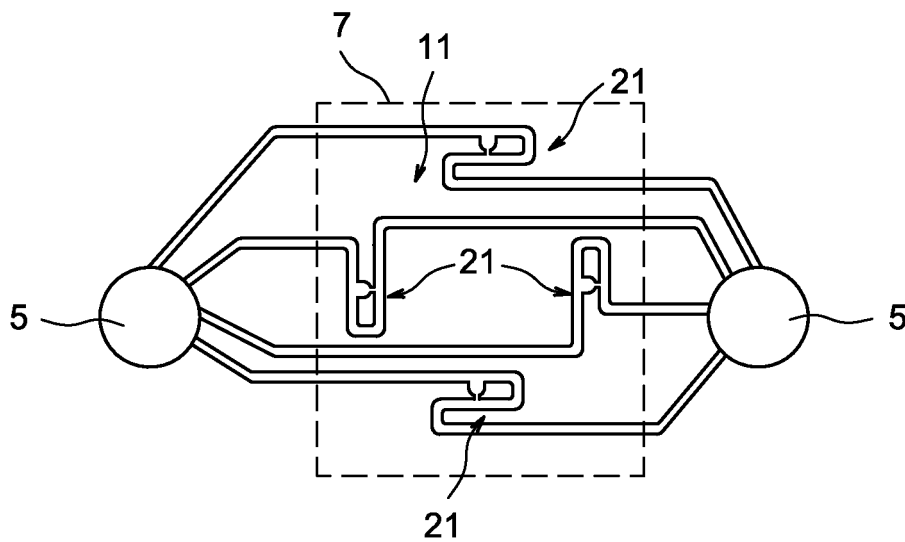


FIG. 4B

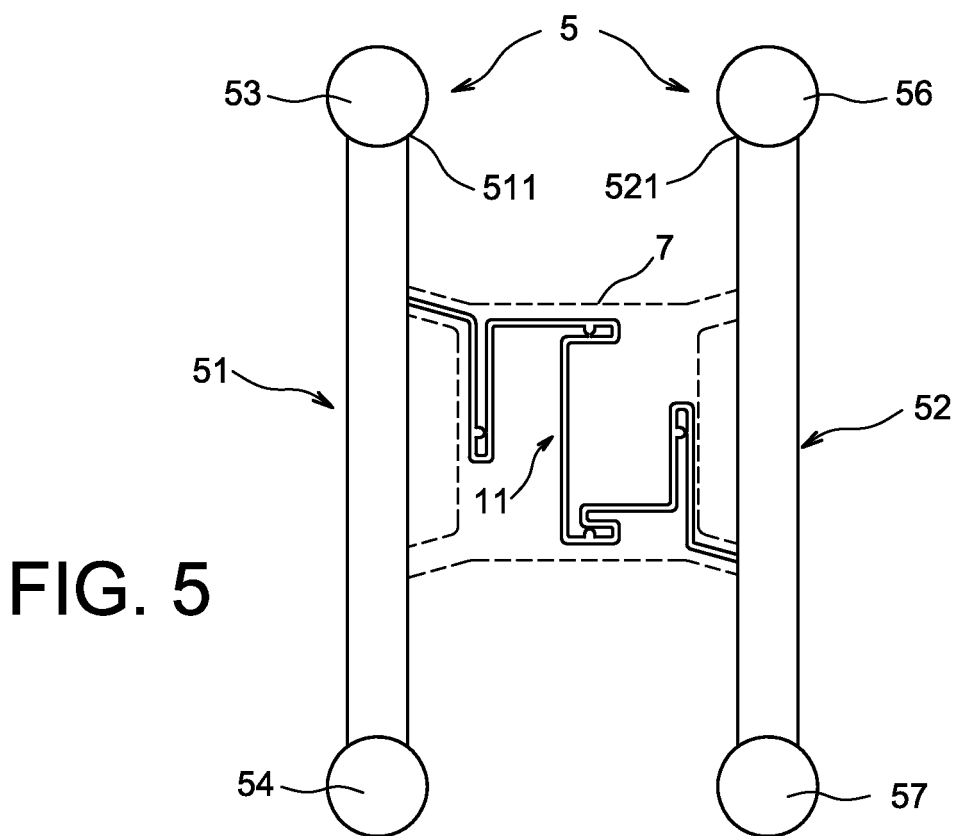


FIG. 5

4 / 5

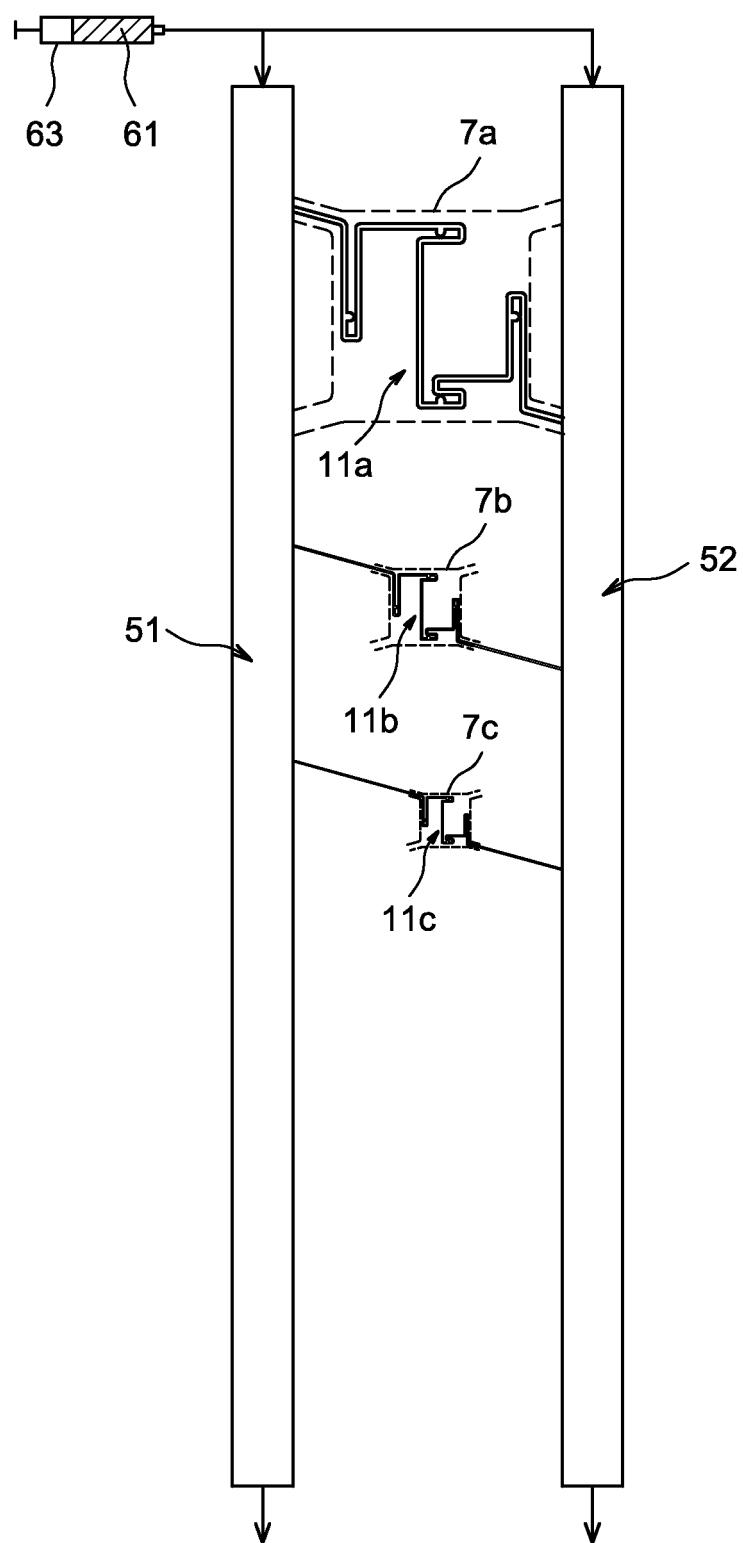


FIG. 6A

5 / 5

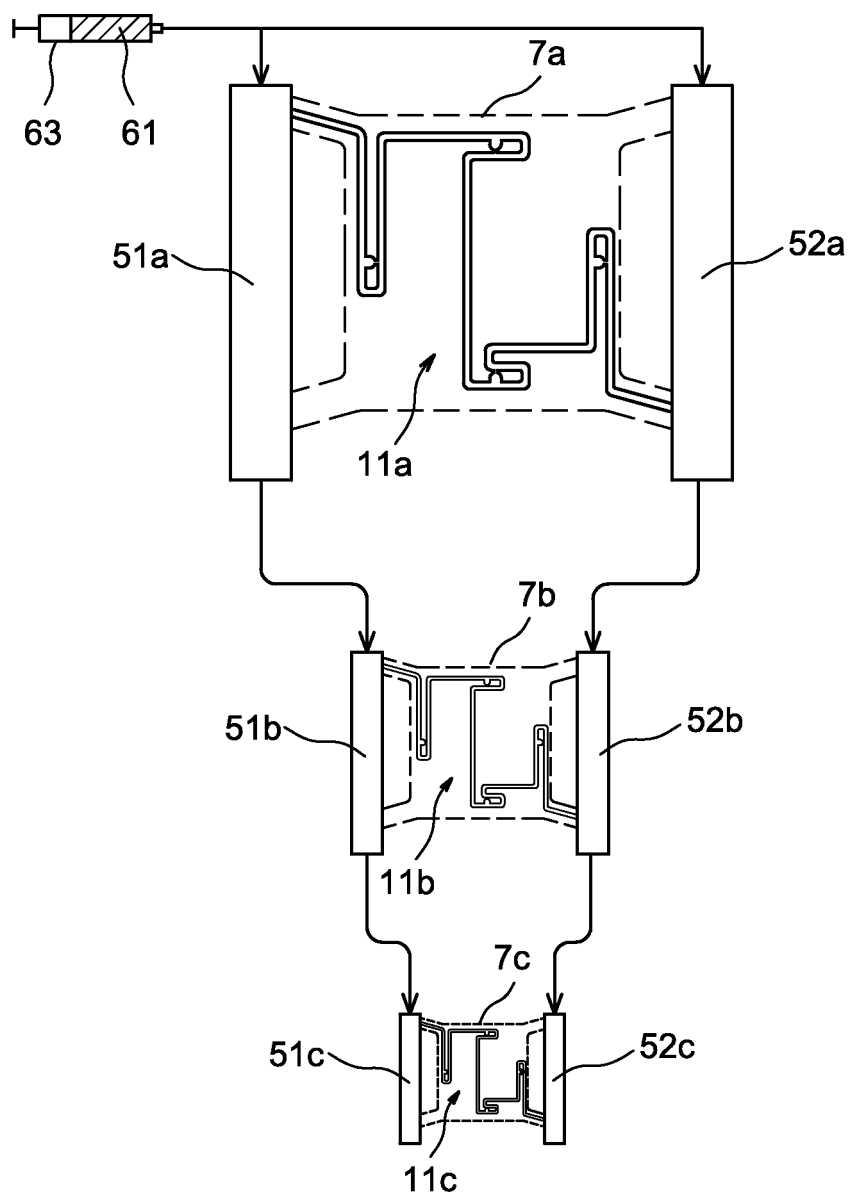


FIG. 6B



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 757981
FR 1158681

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	FR 2 931 549 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 27 novembre 2009 (2009-11-27) * abrégé; figures 1,2,13 * * page 14, ligne 21 - ligne 25 * * page 17, ligne 31 - page 18, ligne 21 * * page 12, ligne 4 - ligne 10 * -----	1-15	G01G3/16 G01N15/02
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G01G
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
5 avril 2012		Pugno, Roberto	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1158681 FA 757981**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **05-04-2012**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 2931549 A1	27-11-2009	EP 2286192 A1	23-02-2011
		FR 2931549 A1	27-11-2009
		US 2011167908 A1	14-07-2011
		WO 2009141516 A1	26-11-2009
