

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 07.12.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 14.06.24 Bulletin 24/24.

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 :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.

72 Inventeur(s) : AGACHE Vincent et CAILLAT Patrice.

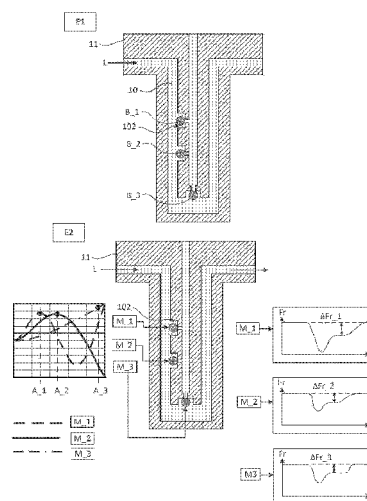
73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public à caractère industriel et commercial.

74 Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

54 Procédé de détection de cibles à l'aide d'un oscillateur mécanique et de particules fonctionnalisées.

57 L'invention concerne un procédé de détection d'au moins une cible, mis en œuvre à l'aide d'un système de détection qui comporte un dispositif de mesure (1_A, 1_B) comportant un oscillateur (11_A, 11_B) mécanique et un circuit fluide (10_A, 10B) intégré à l'oscillateur et dans lequel est amené à circuler un fluide contenant ladite au moins une cible à détecter, ledit oscillateur (11_A, 11_B) étant apte à être excité selon plusieurs modes de vibration (M_1, M_2, M_3) et comportant sur le réseau fluide au moins un premier piège positionné sur un anti-nœud d'un premier mode de vibration de l'oscillateur et un deuxième piège positionné sur un anti-nœud d'un deuxième mode de vibration de l'oscillateur, un anti-nœud de vibration correspondant à une position dans laquelle l'amplitude de vibration va de 80% à 100% de l'amplitude maximale pour le mode de vibration sélectionné.

Figure à publier avec l'abrégié : Figure 3



Description

Titre de l'invention : Procédé de détection de cibles à l'aide d'un oscillateur mécanique et de particules fonctionnalisées

Domaine technique de l'invention

[0001] La présente invention se rapporte à un procédé de détection de cibles (ou biomarqueurs) à l'aide d'un oscillateur mécanique et de particules fonctionnalisées.

Etat de la technique

[0002] Pour détecter la présence de biomarqueurs d'intérêt tels que des protéines, exosomes, ARN circulant, ADN circulant, virus, ou des espèces cibles de plus grandes dimensions telles que bactéries et cellules, il est connu d'utiliser des biocapteurs. Dans les biocapteurs, il existe notamment les capteurs gravimétriques. Ceux-ci sont basés sur l'utilisation d'un oscillateur ou résonateur mécanique, mis en vibration sur sa fréquence de résonance. Toute cible qui se greffe sur l'oscillateur, entraîne l'augmentation de la masse de celui-ci, ce qui diminue sa fréquence de résonance, d'un décalage proportionnel à la masse de la cible.

[0003] En mesurant les fluctuations de fréquence de résonance en continu, il est alors possible de remonter à la masse adsorbée sur l'oscillateur en temps réel et suivre ainsi des cinétiques d'adsorption avec des cibles. La plupart des approches sont cependant basées sur une immersion de l'oscillateur dans le fluide à analyser. Un inconvénient majeur est alors l'amortissement de l'oscillation du résonateur par le fluide (visqueux), dégradant son facteur de qualité mécanique ($Q \sim 10$ à 100 typiquement lorsque le résonateur est immergé) et par conséquent la limite de détection du capteur. De plus, pour conférer à la mesure une spécificité, une fonctionnalisation préalable du capteur est requise, ce qui peut compliquer son intégration dans un canal microfluidique en raison des contraintes de localisation des sondes, et de compatibilité entre la méthode employée pour immobilisation des sondes avec les matériaux en présence. Pour remédier à l'amortissement du fluide, une alternative initialement proposée par l'équipe du professeur Scott Manalis au "MIT" consiste à intégrer et délimiter un canal fluidique à l'intérieur même de l'oscillateur, tandis que celui-ci oscille dans une cavité exempte de fluide. L'avantage réside alors en un facteur de qualité très peu altéré et une limite de détection optimisée, même en présence de fluide circulant dans l'oscillateur. Ce type d'oscillateur est couramment appelé SMR ("Suspended Microchannel Resonator") ou encore SNR ("Suspended Nanochannel Resonator"), selon les dimensions du canal. Par un gradient de pression imposé entre une entrée fluidique et une sortie fluidique du circuit, il est possible de contrôler l'écoulement du fluide (son débit et sens d'écoulement), et donc le passage de particules en suspension dans le

SMR (ou SNR). Ce type de capteur a été utilisé pour diverses applications, incluant la pesée individuelle de particules biologiques telles que des cellules, bactéries, des nanoparticules ou encore la détection de protéines spécifiques par la fonctionnalisation préalable des parois internes du SMR. Ce principe de fonctionnement est désormais bien connu.

- [0004] La publication référencée "*Y.C. Weng, F.F. Delgado, S. Son, T.P. Burg, S.C. Wasserman, S.R. Manalis. Mass sensors with mechanical traps for weighing single cells in different fluids, Lab on a chip (2011)*" décrit un oscillateur muni d'un système de piégeage d'une particule biologique. L'oscillateur peut notamment comporter une poutre munie d'un canal d'aspiration central, avec une restriction à son extrémité libre, formant un piège pour une particule.
- [0005] Il est également connu de la demande de brevet **EP2574885A1** un dispositif de détection massique de particules. Ce dispositif comporte un circuit fluidique intégré dans un oscillateur électromécanique. Le circuit fluidique comporte un ou plusieurs pièges pour des particules injectées dans le circuit fluidique. Les particules peuvent notamment être des billes dont la surface est fonctionnalisée de manière à former une surface de capture d'une espèce cible présente dans un liquide injecté dans le circuit fluidique. Au fur et à mesure que la capture des espèces cibles s'effectue, la masse de l'oscillateur s'accroît, entraînant une variation de la fréquence de résonance, cette variation permettant ensuite de déduire la masse de l'espèce cible collectée sur chaque bille.
- [0006] Les solutions antérieures ne permettent cependant pas d'exploiter au maximum les capacités de l'oscillateur, ni de détecter la présence de plusieurs cibles à l'aide d'un même oscillateur.
- [0007] Un premier but de l'invention est ainsi de proposer une solution qui permet d'exploiter au mieux les capacités d'un oscillateur tel que ceux déjà décrits ci-dessus.
- [0008] Un deuxième but de l'invention est de proposer une solution pour permettre la détection de plusieurs cibles contenues dans un même liquide et à l'aide d'un seul oscillateur.

Exposé de l'invention

- [0009] Ce but est atteint par un procédé de détection d'au moins une cible, mis en œuvre à l'aide d'un système de détection qui comporte :
- Un dispositif de mesure qui comporte un oscillateur mécanique et un circuit fluidique intégré à l'oscillateur et dans lequel est amené à circuler un fluide contenant ladite au moins une cible à détecter, ledit oscillateur étant apte à être excité selon plusieurs modes de vibration et comportant sur le réseau fluidique au moins un premier piège positionné sur un anti-nœud d'un premier

mode de vibration de l'oscillateur et un deuxième piège positionné sur un anti-nœud d'un deuxième mode de vibration de l'oscillateur, un anti-nœud de vibration correspondant à une position dans laquelle l'amplitude de vibration va de 80% à 100% de l'amplitude maximale pour le mode de vibration sélectionné,

- Des moyens d'injection d'un fluide dans le circuit fluide,
- Des moyens d'excitation dudit oscillateur selon le premier mode de vibration et/ou le deuxième mode de vibration,
- Des moyens de mesure de la fréquence de résonance de l'oscillateur,

[0010] Ledit procédé comportant des étapes de :

- Piégeage d'une première particule dans le premier piège de l'oscillateur et piégeage d'une deuxième particule dans le deuxième piège de l'oscillateur,
- Première excitation de l'oscillateur selon le premier mode de vibration et mesure d'une première fréquence de résonance de l'oscillateur,
- Détection de ladite au moins une cible à partir d'une variation de ladite première fréquence de résonance,
- Deuxième excitation de l'oscillateur selon le deuxième mode de vibration et mesure d'une deuxième fréquence de résonance de l'oscillateur,
- Détection de ladite au moins une cible à partir d'une variation de ladite deuxième fréquence de résonance.

[0011] Selon une particularité, la première particule et la deuxième particule ont leur surface externe fonctionnalisée par des sondes distinctes, une première sonde complémentaire d'une première cible pour la première particule et une deuxième sonde complémentaire d'une deuxième cible pour la deuxième particule, ladite première cible et ladite deuxième cible étant présente dans le fluide injecté dans le circuit fluide.

[0012] Selon une autre particularité, le procédé comporte une étape d'injection dans le circuit fluide de particules dites secondaires fonctionnalisées chacune par une sonde spécifique de la première cible et/ou de la deuxième cible.

[0013] Selon une autre particularité, chaque particule est réalisée sous la forme d'une bille rigide.

[0014] Selon une autre particularité, les billes sont de tailles différentes.

[0015] Selon une autre particularité, la première excitation et la deuxième excitation sont réalisées de manière simultanée.

[0016] L'invention concerne également un système de détection employé pour mettre en œuvre le procédé de caractérisation de particules, ledit système comprenant :

- Un dispositif de mesure qui comporte un oscillateur mécanique et un circuit fluide intégré à l'oscillateur et dans lequel est amené à circuler un fluide contenant les particules à caractériser, ledit oscillateur étant apte à être excité

selon plusieurs modes de vibration et comportant sur le réseau fluïdique au moins un premier piège positionné sur un anti-nœud d'un premier mode de vibration de l'oscillateur et un deuxième piège positionné sur un anti-nœud d'un deuxième mode de vibration de l'oscillateur, un anti-nœud de vibration correspondant à une position dans laquelle l'amplitude de vibration va de 80% à 100% de l'amplitude maximale pour le mode de vibration sélectionné,

- Des moyens d'injection d'un fluïde dans le circuit fluïdique,
- Des moyens d'excitation dudit oscillateur selon le premier mode de vibration et/ou le deuxième mode de vibration,
- Des moyens de mesure de la fréquence de résonance de l'oscillateur.

[0017] Selon une particularité, le système comporte des moyens de détection de la variation de la fréquence de résonance.

[0018] Selon une autre particularité, l'oscillateur comporte une poutre fixée en porte à faux et qui intègre le circuit fluïdique.

[0019] Selon une réalisation particulière, le circuit fluïdique comporte un canal principal et un canal intermédiaire, chaque piège fluïdique étant réalisé sous la forme d'une cavité entre le canal principal et le canal intermédiaire, qui comporte une partie élargie prolongée d'une restriction.

[0020] Selon une autre réalisation particulière, le circuit fluïdique comporte un canal principal s'étendant entre une entrée fluïdique et une sortie fluïdique, le canal principal comportant une première branche dans laquelle débouche l'entrée fluïdique, une deuxième branche prolongeant ladite première branche, via une branche de jonction, et débouchant sur la sortie fluïdique, chaque piège fluïdique étant réalisé sous la forme d'une branche de dérivation par rapport au canal principal et comportant un logement dimensionné pour accueillir une particule et une restriction prolongeant ledit logement.

Brève description des figures

[0021] D'autres caractéristiques et avantages vont apparaître dans la description détaillée qui suit, faite en liaison avec les figures listées ci-dessous :

- Les figures 1A et 1B représentent le système de détection de l'invention, respectivement selon deux variantes de réalisation de son dispositif de mesure ;
- La [Fig.2] montre des exemples de courbes de déformée de l'oscillateur du dispositif de la [Fig.1A] et de la [Fig.1B] selon différents modes de vibration ;
- La [Fig.3] montre une première configuration de fonctionnement du système de l'invention ;
- La [Fig.4] montre une deuxième configuration de fonctionnement du système de l'invention ;
- La [Fig.5] illustre une autre configuration de fonctionnement du système de

l'invention ;

- La [Fig.6] représente un tableau reprenant les performances attendues pour différents oscillateurs ;

[0022] **Description détaillée d'au moins un mode de réalisation**

[0023] L'invention vise à détecter plusieurs cibles de manière simultanée en utilisant des particules fonctionnalisées, en utilisant un même oscillateur.

[0024] Les particules sont préférentiellement des entités suffisamment rigides. On utilise avantageusement des billes dont la surface externe est fonctionnalisée par une ou plusieurs sondes choisies pour capturer des cibles présentes dans un liquide L. De manière non limitative, dans la suite de la description, on pourra parler de billes ou de particules fonctionnalisées.

[0025] L'invention vise notamment la détection de cibles telles que protéines, exosomes, ARN circulant, ADN circulant, virus, présents dans le liquide injecté dans le circuit fluide et captés par la surface fonctionnalisée des particules.

[0026] Les figures 1A et 1B montrent le système de détection pouvant être utilisé dans la mise en œuvre du procédé de caractérisation de l'invention.

[0027] Le système de détection comporte un dispositif de mesure 1_A, 1_B mécanique et fluide, des moyens d'excitation M_Exc et des moyens de mesure M_Fr.

[0028] Le dispositif de mesure 1 comporte un circuit fluide 10_A, 10_B dans lequel vont être injectées les particules.

[0029] Le dispositif de mesure 1_A, 1_B comporte également un oscillateur 11_A, 11_B, connu également sous le nom de résonateur, de type SMR ou SNR (désigné ci-après "oscillateur") le circuit fluide 10_A, 10_B étant intégré à l'oscillateur.

[0030] L'oscillateur 11_A, 11_B comporte une poutre fixée en porte-à-faux de manière à présenter une extrémité libre. La poutre est agencée pour osciller à l'intérieur d'une cavité, préférentiellement une cavité sous vide afin de réduire l'amortissement de la poutre en vibration par les molécules d'air. La poutre est capable d'être excitée selon plusieurs modes de vibration, chacun de ces modes se traduisant par une déformation de la poutre présentant localement des nœuds et ventres de vibration (ou ci-après anti-nœuds) à différents endroits prédéterminés par les lois de la mécanique et dynamique des structures.

[0031] Le circuit fluide 10_A, 10_B est intégré à la poutre de l'oscillateur.

[0032] Le principe de base repose sur le piégeage de plusieurs particules fonctionnalisées à l'intérieur de l'oscillateur 11_A, 11_B.

[0033] Selon une première variante de réalisation représentée sur la [Fig.1A], le circuit fluide 10_A comporte un canal principal 100_A et un canal intermédiaire 101_A. Le circuit fluide 10_A est arrangé de manière à présenter plusieurs pièges fluidiques 102_A, destinés chacun à pouvoir piéger une particule distincte.

- [0034] Chaque piège fluïdique 102_A est réalisé sous la forme d'une intersection entre le canal principal 100_A et le canal intermédiaire 101_A. Un piège fluïdique comporte une cavité débouchant d'un côté sur le canal principal 100_A et de l'autre côté sur le canal intermédiaire 101_A. Du côté du canal principal, la cavité comporte une partie élargie 103_A pour accueillir la particule et, du côté du canal intermédiaire, elle comporte une restriction 104_A ou un étranglement.
- [0035] On applique un gradient de pression entre le canal principal 100_A et le canal intermédiaire 101_A, de sorte qu'une fraction du flux principal est aspirée dans le canal intermédiaire, via chaque piège fluïdique.
- [0036] Le gradient de pression permet de capturer (par aspiration) toute particule suffisamment rigide (ou entité biologique plus ou moins rigide également) circulant dans le canal principal 100_A et dont le diamètre est supérieur à la restriction créée dans le piège fluïdique considéré. La rigidité de la particule l'empêche de traverser la restriction. Par extension de ce principe, en disposant de N pièges fluïdiques, il est possible de capturer N particules. Les particules ou billes fonctionnalisées vont ainsi pouvoir être piégées dans chaque piège fluïdique.
- [0037] La taille de la partie élargie de la cavité doit être adaptée à celle de la particule à accueillir pour que cette dernière puisse rester piégée.
- [0038] Selon une autre variante de réalisation représentée sur la [Fig.1B], le circuit fluïdique 10_B du dispositif de mesure 1_B comporte un canal principal 100_B s'étendant entre une entrée fluïdique et une sortie fluïdique. Le canal principal comporte une première branche 100_B dans laquelle débouche l'entrée fluïdique, une deuxième branche 101_B prolongeant ladite première branche, via une première branche de jonction 105_B, et débouchant sur la sortie fluïdique. Le circuit fluïdique 10_B comporte plusieurs pièges fluïdiques. Chaque piège fluïdique 102_B est réalisé sous la forme d'une branche de dérivation par rapport au canal principal et comporte un logement 103_B dimensionné pour accueillir une particule et une restriction 104_B prolongeant ledit logement. Chaque piège fluïdique est agencé de sorte que son logement 103_B communique d'un côté avec la première branche 100_B du canal principal et que sa restriction 104_B débouche de l'autre côté dans la deuxième branche 101_B du canal principal. A l'aide de ce circuit fluïdique 10_B, le piégeage de particules se fait sans élément de contrôle externe, par un système hydrodynamique. L'avantage d'un piège hydrodynamique réside dans le fait de ne pas nécessiter la présence d'un canal intermédiaire et donc de source de pression supplémentaire pour aspirer la ou les particules. Le logement et la restriction sont conçus de sorte que la résistance hydraulique de la restriction soit inférieure à la résistance hydraulique au niveau du canal principal. Ainsi la particule se loge préférentiellement dans le premier logement libre qui se présente sur son trajet, tandis que les particules suivantes poursuivent leur trajectoire.

- [0039] Ci-après, on conserve des références générales pour les éléments communs aux deux variantes de réalisation du dispositif de mesure.
- [0040] Partant des deux arrangements possibles du dispositif de mesure 1, on place ainsi plusieurs pièges fluidiques 102 sur l'oscillateur 11 le long du circuit fluidique 10.
- [0041] Selon un aspect particulier de l'invention, chaque piège fluidique 102 est positionné sur un anti-nœud ou ventre de vibration différent, associé chacun à un mode de vibration distinct de l'oscillateur.
- [0042] Autrement dit, avec un oscillateur 11 qui comporte par exemple trois pièges fluidiques (tel que représenté sur la [Fig.3]), on a :
- Le premier piège fluidique placé sur un anti-nœud A_1 d'un premier mode de vibration M_1 de son oscillateur 11 ;
 - Le deuxième piège fluidique placé sur un anti-nœud A_2 d'un deuxième mode de vibration M_2 de son oscillateur 11 ;
 - Le troisième piège fluidique placé sur un anti-nœud A_3 d'un troisième mode de vibration M_3 de son oscillateur 11 ;
- [0043] Pour rappel, un anti-nœud de vibration correspond à une zone de piégeage où l'amplitude de vibration est maximale. Dans le cadre de l'invention, on pourra considérer que le piège fluidique est bien sur un anti-nœud de vibration lorsque l'amplitude de vibration va de 80% à 100% de l'amplitude maximale pour le mode de vibration sélectionné.
- [0044] Avantageusement, le piège fluidique sera positionné de manière à correspondre à une amplitude de vibration égale à 100% de de l'amplitude de vibration maximale. pour le mode de vibration sélectionné.
- [0045] L'emplacement d'un piège fluidique 102 au niveau d'un anti-nœud de vibration est avantageux car il augmente la sensibilité de détection de l'oscillateur pour le mode de vibration correspondant par rapport à la particule piégée dans ledit emplacement.
- [0046] En effet, lorsqu'une particule de masse Δm est piégée dans un piège fluidique de l'oscillateur, le décalage de la fréquence de résonance Δf de l'oscillateur dépend de la masse ajoutée Δm , de la masse totale m de l'oscillateur ainsi que d'un coefficient de correction α qui dépend spécifiquement de la position de la particule ajoutée, selon la relation suivante :
- [0047]
$$\frac{\Delta f}{f} = - \alpha \frac{\Delta m}{m}$$
- [0048] 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 fréquence maximum. Autrement dit, le piégeage de la particule dans une telle position (au niveau d'un anti-nœud) permet de maximiser le coefficient de correction α et par conséquent, d'accroître la sensibilité du dispositif.

- [0049] Le système comporte en outre des moyens de mise en vibration ou moyens d'excitation de l'oscillateur. Il peut s'agir d'une excitation réalisée par un mode capacitif, piézo-électrique, électromagnétique, thermique, thermo-élastique et optique.
- [0050] Les moyens de mise en vibration M_Exc sont commandés de manière à pouvoir exciter l'oscillateur 11 selon plusieurs modes de vibration distincts.
- [0051] Selon un aspect particulièrement avantageux, on peut tirer profit de la mesure piézo-résistive intégrée à l'oscillateur pour faire une détection multimodale. En l'occurrence, il s'agira de mesurer simultanément plusieurs modes de résonance de l'oscillateur, entraînés par l'actionnement de la piézocéramique située en dessous du composant. Plus particulièrement, la configuration des jauges piézorésistives et de la céramique permettront d'exciter et lire simultanément les fréquences de résonance associées à chaque mode de flexion hors plan de la poutre de l'oscillateur, même si d'autres modes tels que les modes dans le plan ou en torsion par exemple pourront être sollicités et mesurés.
- [0052] Il serait également possible d'exciter l'oscillateur 11 selon chaque mode de vibration, de manière distincte et successive (non simultanée), pour interroger chaque piège fluide de manière indépendante.
- [0053] La [Fig.2] montre un diagramme représentant plusieurs courbes d'excitation de l'oscillateur, chaque courbe correspondant à la déformée résultant d'un mode de vibration M_1, M_2, M_3 distinct de l'oscillateur. Cette [Fig.2] indique également la position d'un anti-nœud A_1, A_2, A_3 associé à chacun des trois modes de vibrations.
- [0054] Le système comporte également des moyens de mesure M_Fr de la fréquence de résonance de l'oscillateur 11. Il peut s'agir de moyens matériels et logiciels permettant de mesurer la fréquence de résonance (notamment par lecture du courant piézorésistif circulant dans la jauge piézorésistive implantée dans l'oscillateur 11, et dont les fluctuations de fréquence sont directement reliées aux fluctuations de fréquence de résonance de l'oscillateur sur chacun de ses modes de vibrations sollicités) et de moyens de détection des variations de cette fréquence (notamment un circuit électronique d'amplification du courant piézorésistif par pont de Wheatstone, suivi d'une électronique numérique embarquée dans une carte de type FPGA qui va permettre de lire numériquement ces signaux, les traduire en mesures de fluctuation de fréquence de résonance et permettre un asservissement avec un actionnement piézoélectrique).
- [0055] Dans le cadre de l'invention, plusieurs billes sont par exemple injectées successivement dans le circuit fluide 10. Chaque bille est amenée à être piégée sur un site correspondant à un anti-nœud d'un mode de vibration distinct de l'oscillateur. Chaque bille dispose d'une surface fonctionnalisée de manière à pouvoir capturer une cible. De manière non limitative, on peut distinguer deux configurations de fonctionnement distinctes :

- Dans une première configuration illustrée par la [Fig.3], on utilise un oscillateur 11 disposant de pièges fluidiques 102 tous identiques, destinés à piéger des billes toutes identiques. On peut ainsi mesurer l'adsorption d'un seul type de cible sur une plus grande surface développée conférée par l'ensemble des billes, en isolant chaque bille sur un anti-nœud distinct pour avoir un maximum de sensibilité de détection.
- Dans une deuxième configuration illustrée par la [Fig.4], on utilise un oscillateur 11 disposant de pièges fluidiques 102 ayant des dimensions distinctes au niveau de leur logement d'accueil et de leur restriction, de manière à pouvoir accueillir des billes de tailles distinctes. On peut ainsi procéder à une analyse multi-cibles.

[0056] En liaison avec la [Fig.3], l'oscillateur 11 est donc muni de pièges fluidiques 102 tous identiques et de billes toutes identiques, les billes ayant chacune une surface fonctionnalisée de manière identique pour capturer une cible unique présente dans le liquide L injecté dans le circuit fluidique 10.

[0057] Dans cette réalisation, le fait de piéger plusieurs billes permet d'accroître la surface développée et donc la quantité de sondes accessibles pour le greffage des cibles, tout en exploitant les trois modes de vibrations et les trois anti-nœuds correspondants, pour également accroître la sensibilité de détection en comparaison d'une fonctionnalisation intégrale des parois du capteur.

[0058] Selon la première configuration, le processus de détection est décrit ci-dessous en liaison avec la [Fig.3] :

[0059] E1 : Injection de plusieurs billes B₁, B₂, B₃, par exemple au nombre de trois. Chaque bille vient se placer dans un piège fluidique 102 distinct.

[0060] Chaque bille se charge de la cible présente dans le liquide L injecté dans le circuit fluidique 10.

[0061] E2 : Le système permet ensuite de venir interroger les sites de piégeage de manière simultanée en appliquant les différents modes de vibration M₁, M₂, M₃ de l'oscillateur ou de manière indépendante en sélectionnant un mode de vibration parmi les différents modes de vibration M₁, M₂, M₃ de l'oscillateur.

[0062] Le système mesure la fréquence de résonance Fr pour chacun des modes de vibration de l'oscillateur. Comme indiqué ci-dessus, toute espèce cible qui se greffe sur une bille B₁, B₂, B₃ piégée dans l'oscillateur 11, entraîne l'augmentation de la masse de celui-ci, ce qui diminue sa fréquence de résonance, d'un décalage proportionnel à la masse de la cible. En mesurant les fluctuations de fréquence de résonance en continu, il est alors possible de remonter à la masse adsorbée sur l'oscillateur en temps réel et suivre ainsi des cinétiques d'adsorption avec des espèces cibles. Pour chacun des modes de vibration M₁, M₂, M₃ de l'oscillateur 11, on constate en effet une

variation de la fréquence de résonance ΔFr_1 , ΔFr_2 , ΔFr_3 .

- [0063] La deuxième configuration de fonctionnement est décrite ci-dessous en liaison avec la [Fig.4].
- [0064] Pour cette autre configuration, on utilise des billes B_1 , B_2 de tailles différentes, et disposant d'une surface fonctionnalisée par des sondes différentes. En effet, les billes sont fonctionnalisées en surface pour présenter des sondes complémentaires de cibles dont on souhaite détecter la présence dans le milieu circulant dans le circuit micro-fluidique 10. En utilisant des billes de tailles et sonde différentes, on pourra adresser la capacité de mesurer l'adsorption de plusieurs cibles différentes.
- [0065] L'oscillateur 11 comporte par exemple deux pièges fluidiques de dimensions distinctes.
- [0066] E10 : On injecte d'abord les plus petites billes, c'est-à-dire celles qui sont dimensionnées de sorte qu'elles ne se logent que dans les plus petites restrictions et passent à travers les plus grosses restrictions pour ne pas obstruer ces dernières. Ensuite on injecte les billes les plus grosses. L'obstruction des pièges occupés préalablement par les plus petites billes va empêcher d'y loger les plus grosses. On pourra réaliser cette séquence N fois, N étant le nombre de types de billes possibles (de diamètre et nature de sonde donné) auquel on associe des restrictions de largeur adaptée. A titre d'exemple, on vient placer deux billes distinctes dans deux pièges fluidiques distincts de l'oscillateur. La bille B_1 la plus petite vient ainsi se loger dans le piège ayant la restriction la plus étroite et la bille B_2 plus grosse vient se loger dans le piège ayant la plus restriction la plus large.
- [0067] E20 : On excite l'oscillateur 11 selon les différents modes de vibration M_1 , M_2 pour enregistrer la fréquence de résonance Fr de l'oscillateur.
- [0068] En confinant les différentes billes B_1 , B_2 à différentes positions dans le capteur, sur des anti-nœuds pour amplifier le signal de masse, on peut par approche multimodale déduire la variation de masse absorbée sur chaque bille et ainsi remonter à la concentration en espèces cibles qui se sera absorbée sur la bille correspondante.
- [0069] En confinant les billes sur les différents pièges fluidiques de l'oscillateur, c'est-à-dire sur les anti-nœuds liés à chaque mode de vibration, il est possible de déduire la variation de masse absorbée sur chaque particule et ainsi de remonter à la concentration en espèces cibles absorbée sur le piège fluidique adressé.
- [0070] Dans l'exemple repris sur la [Fig.4], une première bille B_1 se place ainsi sur un anti-nœud lié au premier mode de vibration M_1 de l'oscillateur. La seconde bille B_2 se place sur un anti-nœud lié au deuxième mode de vibration M_2 de l'oscillateur, cette position étant dans cet exemple proche d'un nœud de vibration pour le premier mode de vibration M_1 ce qui produira peu de signal sur ce mode de vibration résultant de l'adsorption de masse.

- [0071] Selon une autre configuration de fonctionnement illustrée par la [Fig.5], pour renforcer le signal (amplification par la masse et accroître la spécificité), on pourra également utiliser une deuxième famille de billes recouvertes d'anticorps secondaires, complémentaires des cibles C préalablement accrochées aux billes B_p déjà piégées dans l'oscillateur. De cette manière on dispose de billes dites primaires B_p, initialement piégées dans l'oscillateur ([Fig.5] - E100), et de billes dites secondaires B_s portant des anticorps secondaires. Ces billes secondaires B_s viennent ainsi se greffer sur les billes primaires B_p ([Fig.5] - E200).
- [0072] Le gradient de masse, consécutif à l'adsorption avec une bille secondaire B_s sur chaque cible C greffée sur la ou les billes primaires B_p, sera significativement plus important qu'avec un anticorps secondaire seul greffé sur les billes primaires B_p.
- [0073] Par exemple, on prend un design (noté SMR6 dans le tableau de la [Fig.6]) ayant une résolution expérimentale de l'ordre 1,139fg (1 femtogramme =10⁻¹⁵g), compatible avec la pesée d'une bille secondaire d'or de 60nm de diamètre dont la masse flottante dans l'eau est de 2,07fg (pour une bille d'or de 70nm, sa masse flottante est de 3,287fg). En comparaison, les anticorps classiques ont typiquement une masse autour de quelques dizaines de kiloDalton (par ex. 100kDa=0,166ag), et donc un seul anticorps est indétectable avec l'oscillateur SMR6. Dans le cas d'un oscillateur ayant la configuration notée SMR2, sa résolution expérimentale est estimée autour de 9,65 ag, ce qui est compatible avec la pesée d'une bille secondaire d'or de 15nm (masse flottante 32ag) ou encore 20nm (masse flottante 76ag).
- [0074] Le principe de fonctionnement de cette configuration est illustré par la [Fig.5] avec un oscillateur disposant d'un seul piège fluide 102.
- [0075] On pourra appliquer ce principe aux variantes listées ci-dessus (c'est-à-dire avec le piégeage de plusieurs billes "primaires" de tailles distinctes ou non) pour renforcer le signal relatif à l'adsorption des cibles (distinctes ou non) au sein d'un seul et même capteur. On pourra utiliser des billes secondaires de masse potentiellement identiques/proches (ou de distribution en masse qui se chevauche) pour chacune des cibles correspondantes, dans la mesure où la détection multimodale permet de connaître précisément l'emplacement de la bille primaire où chacune de ses billes secondaires sont greffées.
- [0076] Le tableau de la [Fig.6] résume les performances attendues (résolution en masse) pour des capteurs référencés SNR1 à SMR6, en tenant compte uniquement du bruit thermomécanique, d'une amplitude d'oscillation à la limite de non-linéarité mécanique et en supposant un facteur de qualité conservateur Q=1000 avec une fréquence d'échantillonnage du mHz pour les mesures de fluctuations en temps réel.
- [0077] En multipliant par un facteur 10 conservateur la résolution théorique limitée par le bruit thermomécanique, on peut raisonnablement s'attendre à ce que la résolution ex-

périmentale des capteurs soit plutôt autour de 1ag à 1fg (pour les designs respectifs SNR1 et SMR6). C'est ce seuil que l'on souhaitera atteindre pour être en mesure de détecter des biomarqueurs par adsorption sur la bille et quantifier un temps de réponse attendu.

[0078] L'invention présente ainsi de nombreux avantages. On peut ainsi piéger plusieurs particules au sein d'un même oscillateur, ces particules pouvant par exemple se distinguer les unes des autres par leur diamètre et/ou par la fonctionnalisation de leurs surfaces respectives. Cette approche multi-particules et donc multi-sondes permettra de réaliser une détection multi-cibles au sein d'un seul et même oscillateur.

[0079] L'invention est par ailleurs adaptable à différentes configurations d'oscillateur.

Revendications

[Revendication 1] Procédé de détection d'au moins une cible, mis en œuvre à l'aide d'un système de détection qui comporte :

- Un dispositif de mesure (1_A, 1_B) qui comporte un oscillateur (11_A, 11_B) mécanique et un circuit fluide (10_A, 10B) intégré à l'oscillateur et dans lequel est amené à circuler un fluide contenant ladite au moins une cible à détecter, ledit oscillateur (11_A, 11_B) étant apte à être excité selon plusieurs modes de vibration (M_1, M_2, M_3) et comportant sur le réseau fluide au moins un premier piège positionné sur un anti-nœud d'un premier mode de vibration de l'oscillateur et un deuxième piège positionné sur un anti-nœud d'un deuxième mode de vibration de l'oscillateur, un anti-nœud de vibration correspondant à une position dans laquelle l'amplitude de vibration va de 80% à 100% de l'amplitude maximale pour le mode de vibration sélectionné,
- Des moyens d'injection d'un fluide dans le circuit fluide,
- Des moyens d'excitation (M_Exc) dudit oscillateur selon le premier mode de vibration et/ou le deuxième mode de vibration,
- Des moyens de mesure (M_Fr) de la fréquence de résonance de l'oscillateur.

Ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte des étapes de :

- Piégeage d'une première particule (B_1) dans le premier piège de l'oscillateur et piégeage d'une deuxième particule (B_2) dans le deuxième piège de l'oscillateur,
- Première excitation de l'oscillateur selon le premier mode de vibration (M_1) et mesure d'une première fréquence de résonance de l'oscillateur,
- Détection de ladite au moins une cible à partir d'une variation (ΔFr_1) de ladite première fréquence de résonance,
- Deuxième excitation de l'oscillateur selon le deuxième mode de vibration (M_2) et mesure d'une deuxième fréquence de résonance de l'oscillateur,
- Détection de ladite au moins une cible à partir d'une variation

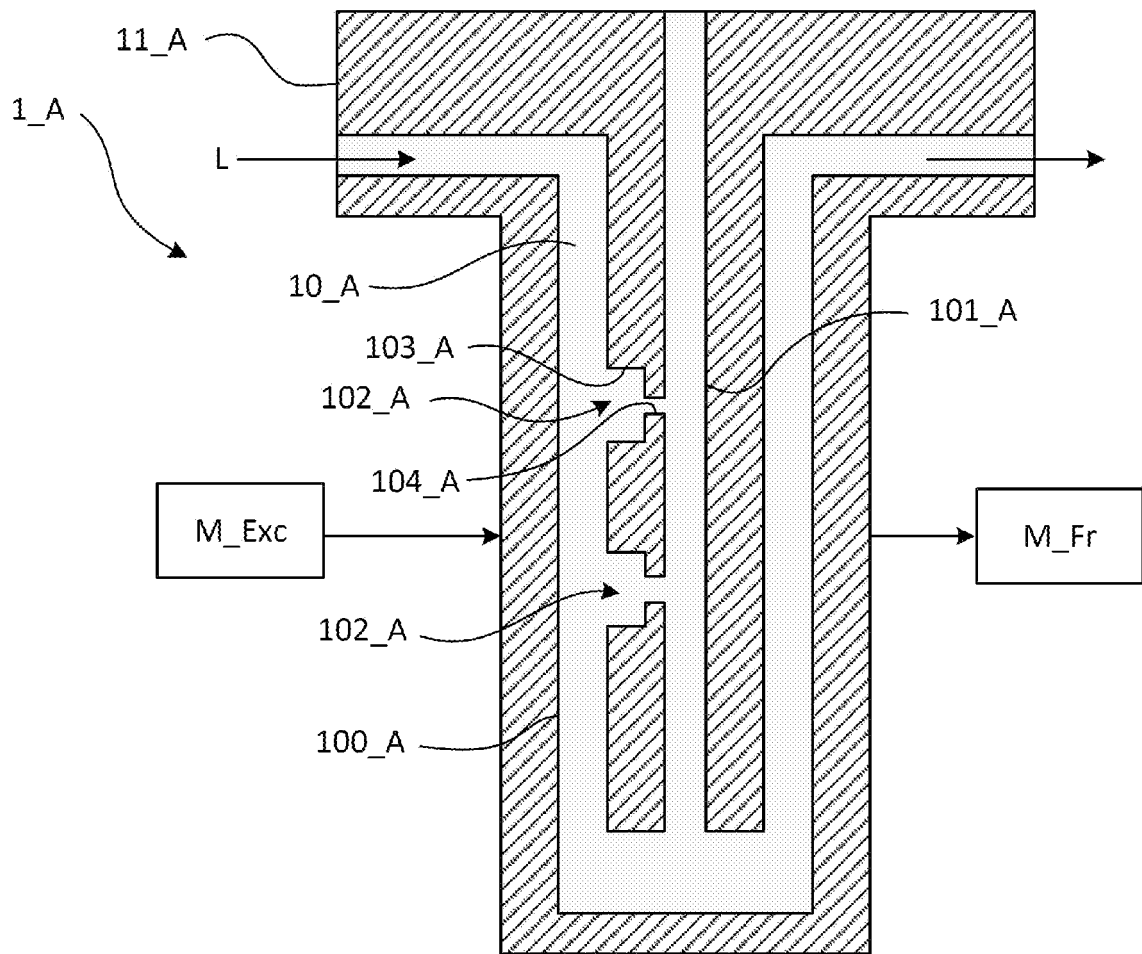
(ΔFr_2) de ladite deuxième fréquence de résonance.

- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la première particule (B_1) et la deuxième particule (B_2) ont leur surface externe fonctionnalisée par des sondes distinctes, une première sonde complémentaire d'une première cible pour la première particule et une deuxième sonde complémentaire d'une deuxième cible pour la deuxième particule, ladite première cible et ladite deuxième cible étant présente dans le fluide injecté dans le circuit fluidique.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comporte une étape d'injection dans le circuit fluidique de particules dites secondaires fonctionnalisées chacune par une sonde spécifique de la première cible et/ou de la deuxième cible.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que chaque particule est réalisée sous la forme d'une bille rigide.
- [Revendication 5] Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que les billes sont de tailles différentes.
- [Revendication 6] Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la première excitation et la deuxième excitation sont réalisées de manière simultanée.
- [Revendication 7] Système de détection employé pour mettre en œuvre le procédé de détection de cibles tel que défini dans l'une des revendications précédentes, ledit système comprenant :
- Un dispositif de mesure (1_A, 1_B) qui comporte un oscillateur (11_A, 11_B) mécanique et un circuit fluidique (10_A, 10_B) intégré à l'oscillateur et dans lequel est amené à circuler un fluide contenant les particules à caractériser, ledit oscillateur étant apte à être excité selon plusieurs modes de vibration (M_1, M_2) et comportant sur le réseau fluidique au moins un premier piège positionné sur un anti-nœud d'un premier mode de vibration de l'oscillateur et un deuxième piège positionné sur un anti-nœud d'un deuxième mode de vibration de l'oscillateur, un anti-nœud de vibration correspondant à une position dans laquelle l'amplitude de vibration va de 80% à 100% de l'amplitude maximale pour le mode de vibration sélectionné,
 - Des moyens d'injection d'un fluide dans le circuit fluidique,

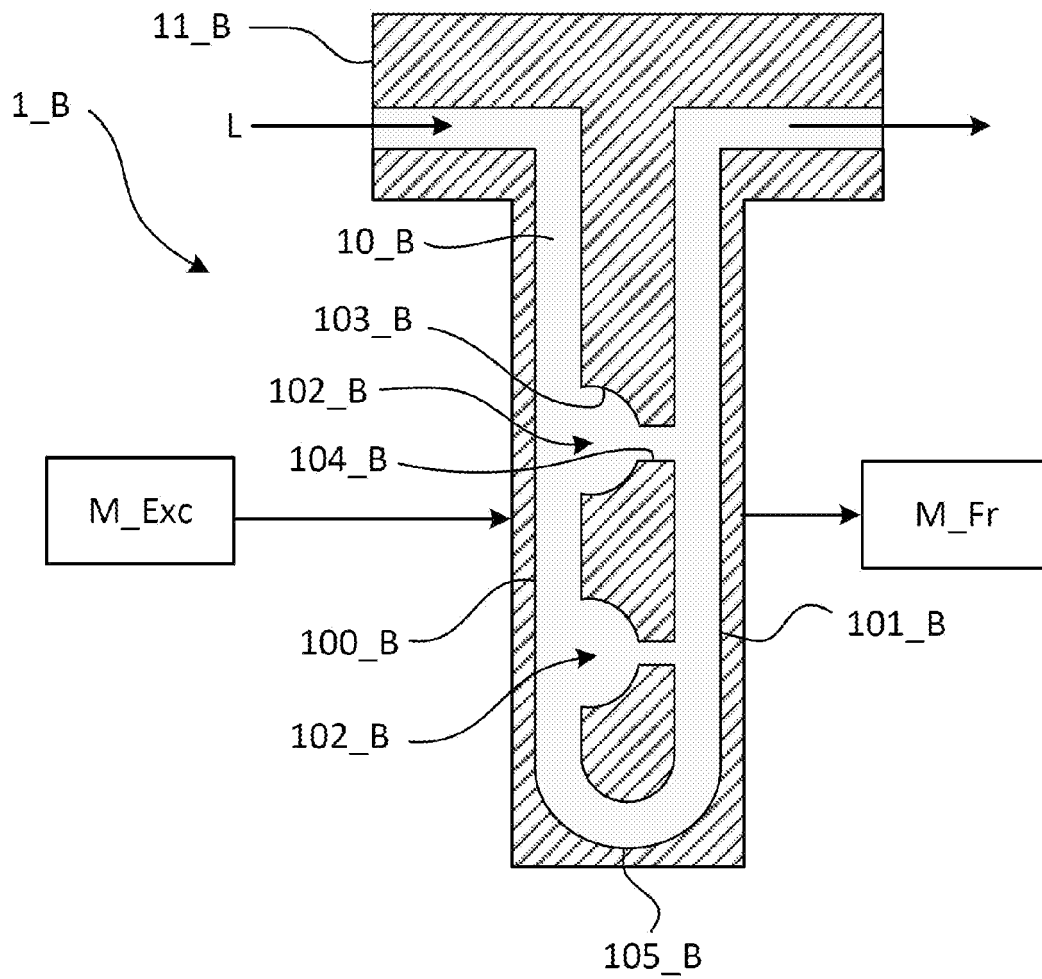
- Des moyens d'excitation (M_Exc) dudit oscillateur selon le premier mode de vibration et/ou le deuxième mode de vibration,
- Des moyens de mesure (M_Fr) de la fréquence de résonance de l'oscillateur.

- [Revendication 8] Système selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de détection de la variation de la fréquence de résonance.
- [Revendication 9] Système selon la revendication 7 ou 8, caractérisé en ce que l'oscillateur (11_A, 11_B) comporte une poutre fixée en porte à faux et qui intègre le circuit fluide (10_A, 10_B).
- [Revendication 10] Système selon la revendication 9, caractérisé en ce que le circuit fluide (10_A) comporte un canal principal (100_A) et un canal intermédiaire (101_A), chaque piège fluide (102_A) étant réalisé sous la forme d'une cavité entre le canal principal et le canal intermédiaire, qui comporte une partie élargie (103_A) prolongée d'une restriction (104_A).
- [Revendication 11] Système selon la revendication 9, caractérisé en ce que le circuit fluide comporte un canal principal s'étendant entre une entrée fluide et une sortie fluide, le canal principal comportant une première branche (100_B) dans laquelle débouche l'entrée fluide, une deuxième branche (101_B) prolongeant ladite première branche, via une branche de jonction (105_B), et débouchant sur la sortie fluide, chaque piège fluide (102_B) étant réalisé sous la forme d'une branche de dérivation par rapport au canal principal et comportant un logement (103_B) dimensionné pour accueillir une particule et une restriction (104_B) prolongeant ledit logement.

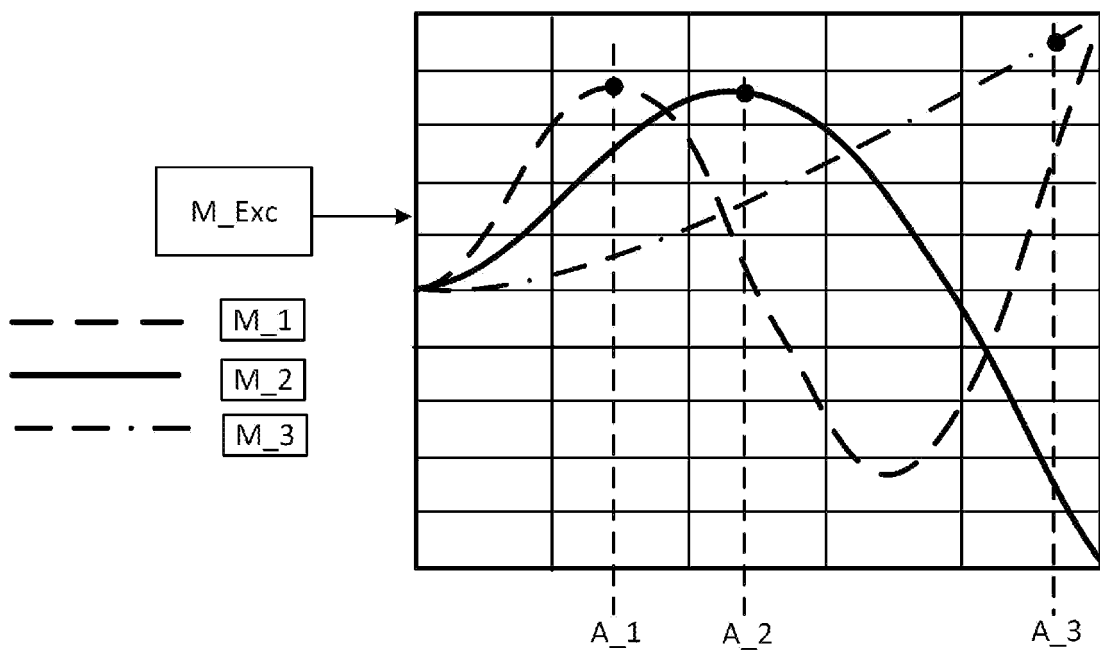
[Fig. 1A]

Fig. 1A

[Fig. 1B]

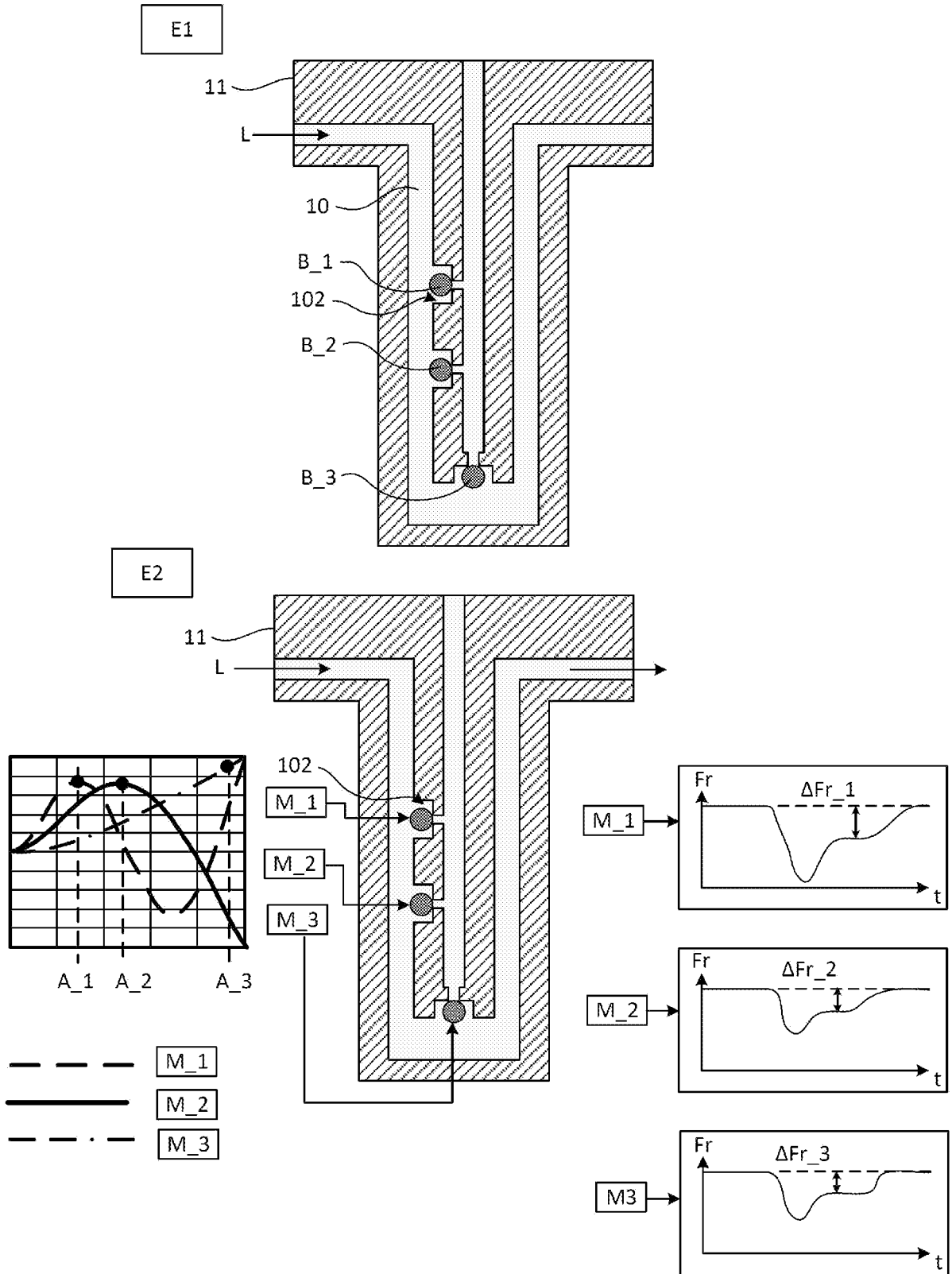
Fig. 1B

[Fig. 2]

Fig. 2

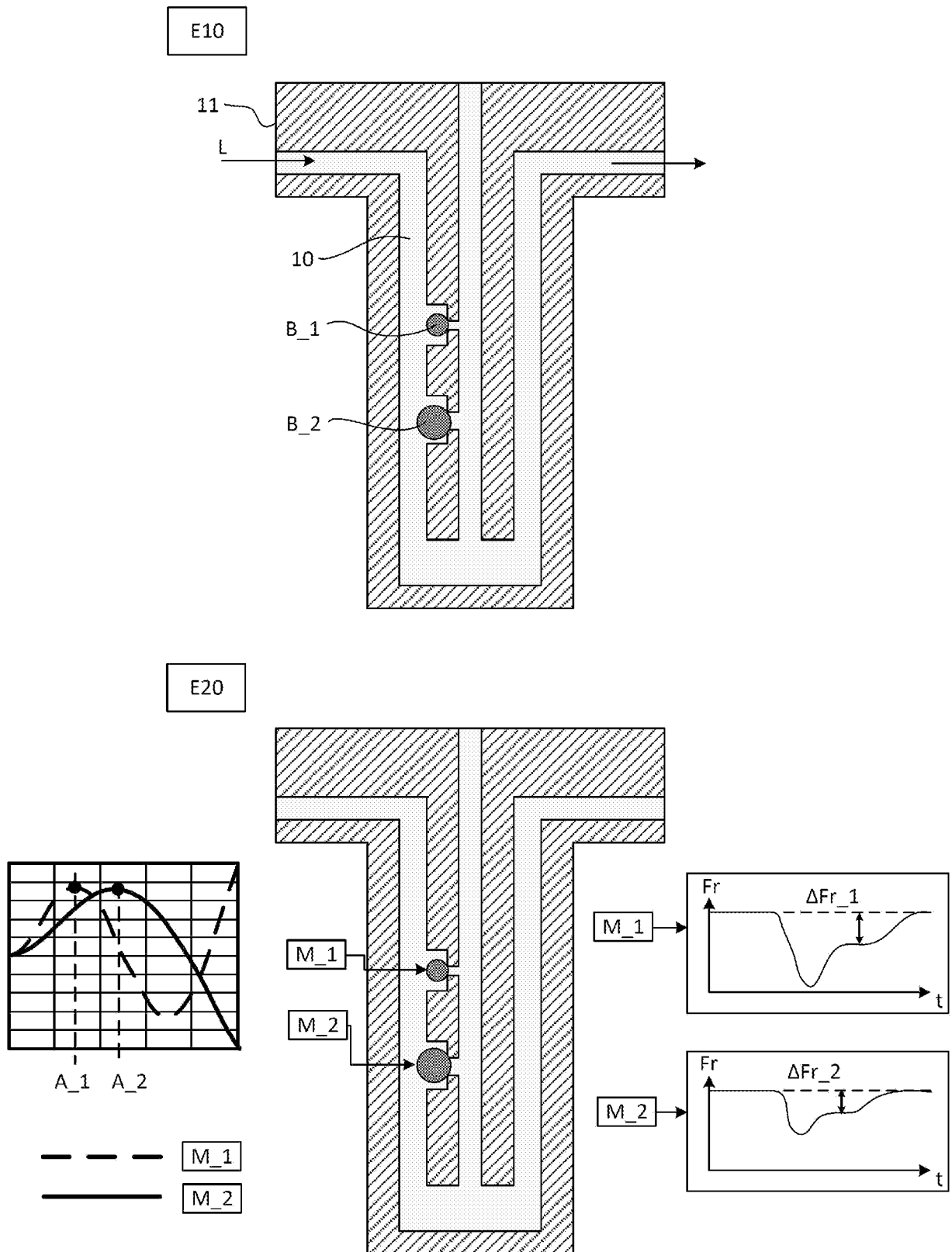
[Fig. 3]

Fig. 3

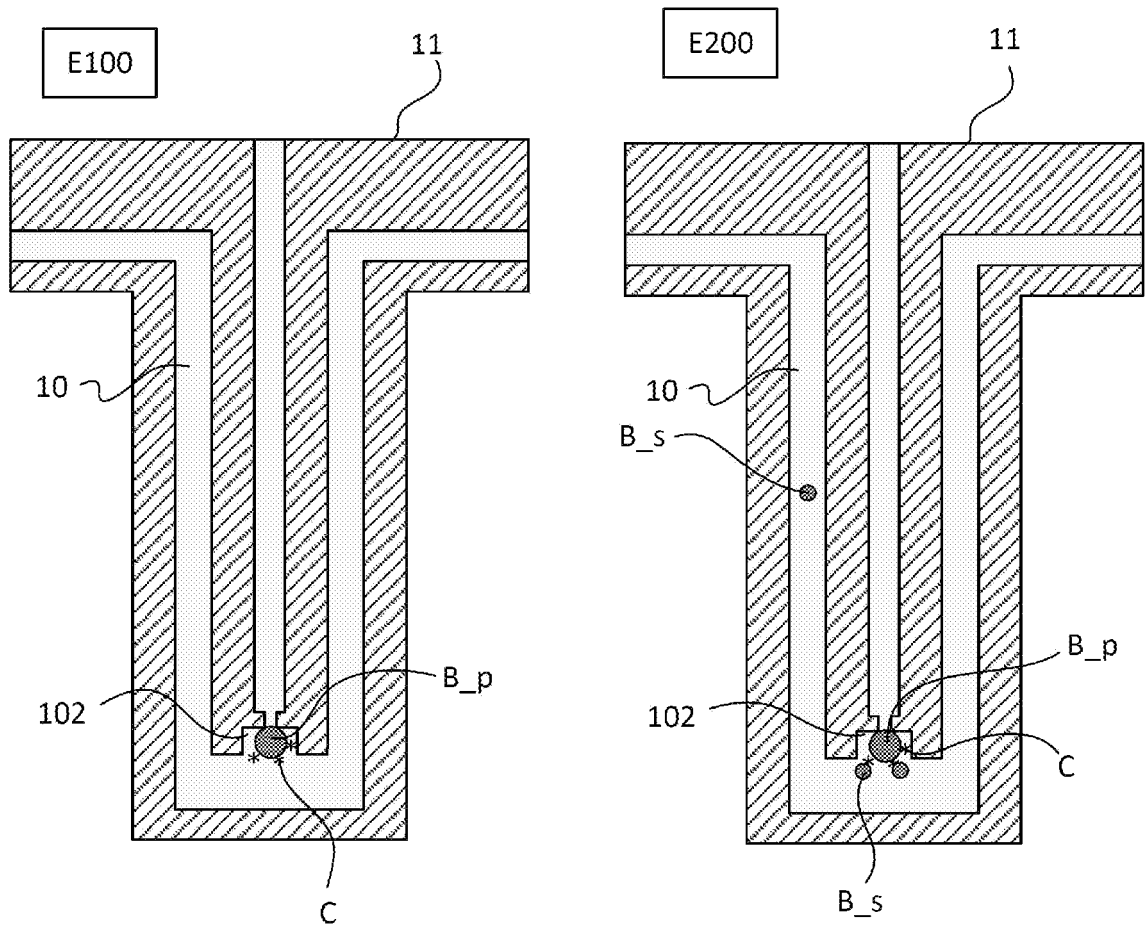


[Fig. 4]

Fig. 4



[Fig. 5]

Fig. 5

[Fig. 6]

Fig. 6

Oscillateurs	Longueur	épaisseur	Largeur	hauteur canal enterré (μm)	Largeur canal enterré (μm)	Résolution (ag) brut thermomécanique	Résolution expérimentale (ag) (bruit théorique x10)	Féquence d'utilisation (MHz)	Sensibilité (variation de fréquence/variation de masse) en mHz/ag
SNR1	25	2	3	0.7	0.7	0.137	1.37	4.583	28.928
SMR2	60	4	8	2	2	0.965	9.65	1.601	0.835
SMR3	172.5	9	23	7	7	10.178	101.78	0.413	0.014
SMR4	285	14	38	12	12	31.407	314.07	0.222	0.002
SMR5	397.5	19	53	17	17	65.802	658.02	0.149	0.00047
SMR6	510	24	68	22	22	113.991	1139.91	0.111	0.00017

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 914425
FR 2212917

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, D	EP 2 574 885 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 3 avril 2013 (2013-04-03)	7-9	G01N15/10 G01N9/32
A	* alinéas [0069], [0072]; figures 3, 4B *	1-6, 10, 11	
A	----- LEE JUNGCHUL ET AL: "High precision particle mass sensing using microchannel resonators in the second vibration mode", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747, [Online] vol. 82, no. 2, 17 février 2011 (2011-02-17), pages 23704-23704, XP012146161, ISSN: 0034-6748, DOI: 10.1063/1.3534825 National Library of Medicine Extrait de l'Internet: URL:https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3055905/> [extrait le 2023-06-20] * page 82; figures 1, 3 *	1-11	
A	----- OLCUM SELIM ET AL: "High-speed multiple-mode mass-sensing resolves dynamic nanoscale mass distributions", NATURE COMMUNICATIONS, [Online] vol. 6, no. 1, 12 mai 2015 (2015-05-12), XP093001718, DOI: 10.1038/ncomms8070 Nature communications Extrait de l'Internet: URL:http://www.nature.com/articles/ncomms8070> [extrait le 2023-06-21] * figure 2 *	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G01N B01L G01G G01H
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 juin 2023		Kramer, Joanne	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet 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	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2212917 FA 914425**

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 **21-06-2023**
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
EP 2574885	A1	EP 2574885 A1	03-04-2013
		FR 2980572 A1	29-03-2013
		JP 2013072876 A	22-04-2013
		US 2013074586 A1	28-03-2013
