

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale

WO 2017/114689 A1

(43) Date de la publication internationale
6 juillet 2017 (06.07.2017)

WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :
H03H 7/46 (2006.01) *G01N 5/02* (2006.01)
G01G 3/16 (2006.01) *G01N 9/00* (2006.01)
G01N 29/02 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2016/081853
- (22) Date de dépôt international :
20 décembre 2016 (20.12.2016)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1563388 28 décembre 2015 (28.12.2015) FR
- (71) Déposant : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, 75016 Paris (FR).
- (72) Inventeurs : COLLIN, Eddy; 34, rue du 11 Novembre 1918, 38500 Coublevie (FR). DEFOORT, Martial; 15 rue Lesdiguières, 38000 Grenoble (FR). ARMOUR, Andrew; 70 Trent Road, Nottingham NG7 2RD (GB).
- (74) Mandataires : LOPEZ, Frédérique et al.; Immeuble Visium, 22, avenue Aristide Briand, 94117 ARCUEIL Cedex (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : AMPLIFICATION METHOD USING A MECHANICAL RESONATOR

(54) Titre : PROCÉDÉ D'AMPLIFICATION PAR UN RÉSONATEUR MÉCANIQUE

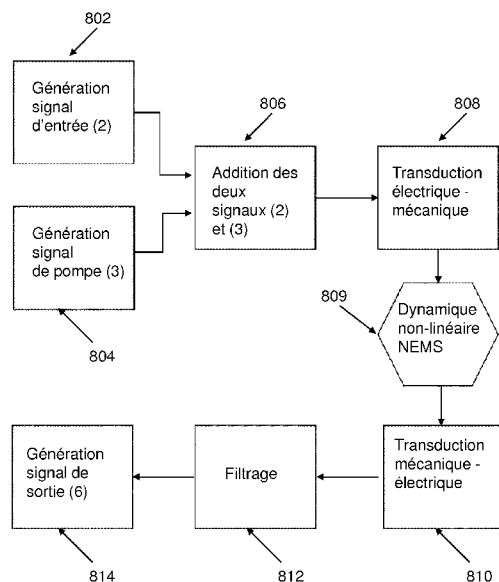


Fig. 8

- 802 Generation of the input signal (2)
804 Generation of the pump signal (3)
806 Addition of the two signals (2) and (3)
808 Electromechanical transduction
809 Dynamic non-linear NEMS
810 Electromechanical transduction
812 Filtering
814 Generation of the output signal (6)

(57) Abstract : The present invention pertains to the field of amplifiers, and relates to an electromechanical amplifying method comprising at least one first transducing step consisting in transducing an electrical signal to a mechanical resonator having a mechanical resonance mode with an angular frequency ω_0 , the electrical signal actuating non-linear oscillations of the resonator; a second transducing step consisting in transducing the non-linear oscillations of the resonator into a transduced electrical signal; and a filtering step consisting in filtering the transduced electrical signal to obtain an output signal. The method is characterized in that the signal transduced to the resonator is obtained by adding a first, input signal of a first amplitude and a first angular frequency ω_s , and a second, pump signal of a second amplitude greater than the first amplitude and of a second angular frequency ω_p that is different from the first angular frequency, the first and second angular frequencies being close to the angular frequency ω_0 of the mechanical resonator, and the second, pump signal being chosen from a range of angular frequencies ω_p and amplitudes in which the resonator is actuated in a non-linear regime; and in that the output signal is amplified, the amplitude of the oscillations measured after the filtering varying linearly with the first, input signal of the angular frequency ω_s , and the resonant mode obtained being that of a linear resonance.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2017/114689 A1



TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

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

La présente invention se situe dans le domaine des amplificateurs, et concerne un procédé d'amplification électromécanique comprenant au moins une première étape de transduction consistant à transduire un signal électrique à un résonateur mécanique ayant un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 , le signal électrique actionnant des oscillations non-linéaires du résonateur; une deuxième étape de transduction consistant à transduire les oscillations non-linéaires du résonateur en un signal électrique transduit, et une étape de filtrage consistant à filtrer le signal électrique transduit pour obtenir un signal de sortie. Le procédé est caractérisé en ce que le signal transduit au résonateur est obtenu en additionnant un premier signal d'entrée de première amplitude et de première pulsation ω_s et un second signal de pompe de seconde amplitude supérieure à la première amplitude et de seconde pulsation ω_p différente de la première pulsation, les première et seconde pulsations étant proches de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique, le second signal de pompe étant choisi dans une plage de pulsations ω_p et d'amplitude où le résonateur est actionné en régime non-linéaire; et en ce que le signal de sortie est amplifié, l'amplitude des oscillations mesurée après le filtrage variant linéairement avec le premier signal d'entrée à la pulsation ω_s , et le mode de résonance obtenu est celui d'une résonance linéaire.

PROCÉDÉ D'AMPLIFICATION PAR UN RÉSONATEUR MÉCANIQUE

Domaine de l'invention

L'invention porte sur un amplificateur électromécanique et un procédé d'amplification électromécanique apte à préserver la linéarité de l'amplification.

Etat de la Technique

5 Les micro et nano-systèmes électromécaniques (respectivement MEMS et NEMS) permettent la détection de composés chimiques ou biologiques jusqu'à des seuils de détection extrêmement bas, par exemple de l'ordre de l'attogramme, lorsqu'ils sont utilisés comme des résonateurs. Lors de l'interaction d'un micro ou nano-système oscillant avec un composé chimique ou biologique, les caractéristiques mécaniques du résonateur peuvent varier : la mesure d'une
10 variation de l'amplitude de l'oscillateur, ou de la variation d'une fréquence d'un mode de l'oscillateur peuvent permettre la détection du ou des composés.

Les résonateurs de type MEMS et NEMS ont un rapport d'aspect plus élevé que des résonateurs macroscopiques. L'augmentation du rapport d'aspect d'un résonateur mécanique favorise l'apparition de phénomènes non-linéaires lors de l'oscillation du résonateur (Postma, H. C., Kozinsky, I., Husain, A., & Roukes, M. L. (2005). Dynamic range of nanotube-and nanowire-based electromechanical systems. Applied Physics Letters, 86(22), 223105). Ainsi, pour une large gamme d'amplitudes, un résonateur aux échelles micro ou nanométriques suit un
15 comportement dit de « Duffing », c'est-à-dire qui suit l'équation suivante :

$$\ddot{x} + \Delta\omega \dot{x} + \omega_0^2 x + \gamma x^3 = \frac{F_L}{m} \quad (1)$$

où x est l'amplitude du signal mesuré, ω_0 la pulsation de résonance, $\Delta\omega$ la
25 dissipation liée au mouvement du résonateur, F_L la force transmise au résonateur, m la masse du résonateur et γ le coefficient non-linéaire, connu comme « coefficient de Duffing ». L'homme du métier retrouve l'équation connue d'un oscillateur

harmonique ayant une résonance qui suit une courbe de Lorentz, quand le coefficient $\gamma=0$.

La non-linéarité dans le comportement d'un oscillateur pose des problèmes dans la mise en œuvre d'une détection : un transducteur électromécanique est typiquement un oscillateur MEMS ou NEMS apte à fonctionner dans un régime linéaire. A défaut, une bi-stabilité mécanique ou une hystérésis lors d'une oscillation peut compromettre la transmission d'un stimulus à détecter. En effet, si l'amplitude d'oscillation n'est pas trop grande, une non-linéarité de type Duffing (qui suit l'équation de Duffing) déforme la résonance, et donne lieu à une forme de résonance connue comme résonance de type Duffing. Si l'amplitude d'oscillation est très grande, le système entre dans un régime bistable qui, dans la plupart des applications, compromet drastiquement la transmission d'un stimulus qui doit être détecté.

Une des solutions pour éviter les non-linéarités des oscillations du résonateur peut consister à exciter le résonateur avec des forces suffisamment faibles pour rester dans un régime linéaire. En pratique, l'amplitude des oscillations mesurées lors d'une résonance est souvent trop faible pour discriminer un signal par rapport au bruit de mesure, ou mesurer des variations de manière quantitative.

Une autre solution consiste à exciter un résonateur avec des forces aptes à induire une amplitude suffisamment grande pour être détectée mais en induisant également un comportement non-linéaire, qui doit être corrigé. Une grille couplée par des polarisations électriques au résonateur est utilisée pour compenser les non-linéarités de la dynamique du résonateur (Kacem, N., Hentz, S., Pinto, D., Reig, B., & Nguyen, V. (2009). Nonlinear dynamics of nanomechanical beam resonators: improving the performance of NEMS-based sensors. *Nanotechnology*, 20(27), 275501). Lors de l'implémentation de cette solution, des simulations numériques coûteuses en calcul et en temps sont nécessaires pour trouver les paramètres expérimentaux adéquats à la compensation des non-linéarités. Aussi, l'implémentation d'une ou plusieurs grilles doit être tolérée par le mode d'utilisation du résonateur.

L'invention vise à remédier aux inconvénients précités de l'art antérieur, et plus particulièrement vise à actionner le résonateur dans une plage de fréquences donnée, proche de sa fréquence de résonance, proportionnellement à une force d'excitation, dans la gamme d'amplitude la plus large possible et

particulièrement dans une gamme d'amplitude dans laquelle le résonateur oscille habituellement suivant l'équation dite de Duffing explicitée précédemment, tout en préservant sa linéarité, afin que sa résonance mécanique, dans cette plage de fréquence, suive une courbe de Lorentz et que le signal détecté soit proportionnel
5 au signal injecté.

Résumé de l'invention

Un objet de l'invention permettant d'atteindre ce but est un procédé d'amplification électromécanique comprenant au moins :

10 - une première étape de transduction consistant à transduire un signal électrique à un résonateur mécanique ayant un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 , ledit signal électrique actionnant des oscillations non-linéaires du résonateur ;

- une deuxième étape de transduction consistant à transduire lesdites
15 oscillations non-linéaires du résonateur en un signal électrique transduit; et

- une étape de filtrage consistant à filtrer ledit signal électrique transduit pour obtenir un signal de sortie ;

le procédé est caractérisé en ce que :

- le signal transduit au résonateur est obtenu en additionnant un premier
20 signal d'entrée de première amplitude et de première pulsation ω_s et un second signal de pompe de seconde amplitude supérieure à la première amplitude et de seconde pulsation ω_p différente de la première pulsation, les première et seconde pulsations étant proches de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique, le second signal de pompe étant choisi dans une plage de pulsations ω_p et d'amplitude où le
25 résonateur est actionné en régime non-linéaire ; et en ce que

- le signal de sortie est amplifié, l'amplitude des oscillations mesurée après le filtrage variant linéairement avec le premier signal d'entrée à la pulsation ω_s , et le mode de résonance obtenu est celui d'une résonance linéaire.

un dispositif d'amplification électromécanique qui comporte au moins un résonateur mécanique ayant un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 , et qui comprend de plus :

- 5 - un additionneur de signaux électriques, apte à additionner un premier signal d'entrée de première amplitude et de première pulsation ω_s et un second signal de pompe de seconde amplitude supérieure à la première amplitude et de seconde pulsation ω_p différente de la première pulsation, les première et seconde pulsations étant proches de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique, le second signal de pompe étant choisi dans une plage de pulsations ω_p et
10 d'amplitude où le résonateur est actionné en régime non-linéaire ;
- un premier transducteur électromécanique relié d'une part électriquement à la sortie dudit additionneur (5) et d'autre part mécaniquement audit résonateur mécanique (1), le premier transducteur étant adapté à transduire le signal électrique en sortie de l'additionneur au résonateur mécanique pour actionner
15 des oscillations non-linéaires du résonateur ;
- un second transducteur électromécanique connecté d'une part mécaniquement audit résonateur mécanique (1) et d'autre part électriquement à un filtre (4), le second transducteur étant adapté à transduire lesdites oscillations non-linéaires du résonateur en un signal électrique transduit ; et
- 20 - un filtre (4) de signaux électriques apte à filtrer ledit signal électrique transduit pour obtenir un signal de sortie (6), ledit signal de sortie étant amplifié, l'amplitude des oscillations mesurée à la sortie du filtre variant linéairement avec le premier signal d'entrée à la pulsation ω_s , et le mode de résonance obtenu est celui d'une résonance linéaire.

25

Avantageusement, le résonateur mécanique est choisi au moins parmi un microsystème et un nanosystème, et ladite bande passante dudit filtre est choisie de telle sorte que le signal en sortie dudit filtre présente une amplitude qui dépend linéairement dudit signal d'entrée.

30

Avantageusement, ladite bande passante dudit filtre de l'amplificateur électromécanique est centrée sur une pulsation sensiblement proche de ω_s .

Avantageusement, ledit régime d'oscillations non-linéaires dudit amplificateur électromécanique est un régime de Duffing.

Avantageusement, au moins deux éléments dudit amplificateur électromécanique choisis parmi ledit additionneur, ledit filtre, ledit premier transducteur mécanique et ledit second transducteur électromécanique sont intégrés de manière monolithique.

Avantageusement, l'amplificateur électromécanique comporte un générateur électrique dudit signal de pompe.

Avantageusement, l'amplificateur électromécanique comprend un générateur de champ magnétique homogène sensiblement perpendiculaire à l'axe principal dudit résonateur mécanique et dans lequel au moins un transducteur choisi parmi ledit premier transducteur et ledit second transducteur sont adaptés à transduire de l'énergie par un travail de forces de Laplace ou de forces de Lorentz.

Avantageusement, l'amplificateur électromécanique comprend au moins un transducteur choisi parmi ledit premier transducteur et ledit second transducteur adaptés à transduire de l'énergie par un effet choisi parmi au moins un effet piézoélectrique et piézorésistif.

Un autre objet de l'invention est un procédé d'actionnement d'un résonateur mécanique présentant au moins un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 , ledit procédé comprenant au moins les étapes consistant à :

- additionner un premier signal, dit d'entrée, de pulsation ω_s proche et différente de ω_0 , et un second signal, dit de pompe, de pulsation ω_p proche et différente de ω_0 et différente de ω_s ;
- transduire le signal résultant de la première étape du procédé audit résonateur mécanique avec une amplitude suffisante pour actionner ledit résonateur en régime non-linéaire dans une première plage de pulsations proches de ω_0 ;

moyennant quoi l'amplitude des oscillations dudit résonateur mécanique varie linéairement avec ledit signal d'entrée dans une seconde plage de pulsations proches de ω_s .

5

Avantageusement, la différence δ_s définie par $\omega_s - \omega_p$ dans le procédé est au moins cinquante fois inférieure à ω_0 , la différence δ_p définie par $\omega_p - \omega_0$ est au moins cinquante fois inférieure à ω_0 et ω_p est différent de ω_s .

10

Un autre objet de l'invention est un procédé d'amplification d'un premier signal, dit d'entrée, de pulsation ω_s proche et différente de ω_0 par un résonateur mécanique présentant au moins un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 , ledit procédé comportant au moins les étapes consistant à :

15

- additionner ledit signal d'entrée à un second signal, dit de pompe, de pulsation ω_p proche et différente de ω_0 et différente de ω_s ;

- transduire le signal résultant de la première étape du procédé audit résonateur mécanique avec une amplitude suffisante pour actionner ledit résonateur en régime non-linéaire dans une première plage de pulsations proches de ω_0 ;

20

- mesurer au moins une amplitude de l'oscillation, dite amplitude de sortie, dudit résonateur mécanique dans une seconde plage de pulsations proches de ω_p ;

25

moyennant quoi l'amplitude des oscillations dudit résonateur mécanique varie linéairement avec ledit signal d'entrée dans une seconde plage de pulsations proches de ω_p .

30

Avantageusement, ledit régime non-linéaire de la seconde étape dudit procédé est un régime de Duffing.

Avantageusement, on mesure une pluralité de dites amplitudes de l'oscillation dans la troisième étape du procédé, et l'allure des dites amplitudes

d'oscillation en fonction desdites pulsations de ladite seconde plage est Lorentzienne.

Avantageusement, la différence δ_s définie par $\omega_s - \omega_p$ est au moins cinquante fois inférieure à ω_0 , la différence δ_p définie par $\omega_p - \omega_0$ est au moins cinquante fois inférieure à ω_0 et ω_p est différent de ω_s .

Avantageusement, on mesure, dans le procédé, ladite amplitude de sortie dudit transducteur mécanique sensiblement à la pulsation $\omega_p + \delta_s$.

10

Avantageusement, le procédé est mis en œuvre par un dit amplificateur électromécanique.

Avantageusement, la transduction dudit signal résultant de la première étape du procédé audit résonateur mécanique est adaptée à induire des oscillations dudit résonateur mécanique suivant une équation différentielle non-linéaire.

Avantageusement, la transduction dudit signal résultant de la première étape du procédé audit résonateur mécanique est adaptée à induire des oscillations dudit résonateur mécanique suivant une équation différentielle non linéaire dont le coefficient de Duffing est non nul.

Avantageusement, ladite pulsation ω_p dudit signal de pompe est strictement supérieure à ladite pulsation ω_0 .

25

Avantageusement, ladite pulsation ω_s dudit signal d'entrée est strictement supérieure à ladite pulsation ω_p dudit signal de pompe.

Avantageusement, le procédé comporte une étape consistant à filtrer le signal de ladite amplitude de sortie avec un dit filtre passe-bande et de haut facteur de qualité dont la bande passante est centrée sur une pulsation proche de ω_0 , et préférentiellement centrée sur une pulsation sensiblement de $\omega_p + \delta_s$.

30

Description des figures

La description suivante présente plusieurs exemples de réalisation du dispositif de l'invention : ces exemples sont non limitatifs de la portée de l'invention.

5 Ces exemples de réalisation présentent à la fois les caractéristiques essentielles de l'invention ainsi que des caractéristiques additionnelles liées aux modes de réalisation considérés. Par souci de clarté, les mêmes éléments porteront les mêmes repères dans les différentes figures.

10 L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages, détails et caractéristiques de celle-ci apparaîtront au cours de la description explicative qui suit, faite à titre d'exemple en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 illustre un amplificateur électromécanique linéaire selon un mode de
15 réalisation de l'invention ;

- la figure 2 est un ensemble de photographies obtenues au moyen d'un microscope électronique illustrant des résonateurs selon plusieurs modes de
20 réalisation de l'invention ;

- la figure 3 illustre schématiquement la déformée d'un résonateur doublement encastré, en vue de coupe, lors d'un mouvement entraîné par deux forces d'excitation appliquées à deux fréquences de modes distincts ;

25 - la figure 4 illustre schématiquement des résonances proches de la pulsation propre d'un mode mécanique du résonateur ;

- la figure 5 illustre des amplitudes d'un résonateur mesurées en fonction de la fréquence d'oscillation, dans le cas de l'excitation du résonateur par le signal de
30 pompe seul et dans le cas de l'excitation par le signal d'entrée seul ;

- la figure 6 illustre l'amplitude d'un résonateur en fonction de la fréquence d'oscillation, le résonateur étant actionné selon un mode de réalisation de l'invention ;

35

- la figure 7 illustre une amplification linéaire selon un mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 8 illustre les étapes du procédé d'amplification électromécanique de l'invention selon un mode de réalisation.

Description détaillée de l'invention

La figure 1 illustre un amplificateur électromécanique selon un mode de réalisation de l'invention. L'amplificateur comporte un résonateur mécanique 1, comprenant au moins un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 . L'amplificateur comporte un additionneur 5 apte à additionner deux signaux électriques. Un premier signal 2, dit d'entrée est caractérisé par une pulsation ω_s , proche de ω_0 . Un second signal 3, dit de pompe, est caractérisé par une pulsation ω_p , proche de ω_0 et différente de ω_s ($\frac{\omega_p^2 - \omega_0^2}{2\omega_p} \approx \delta_p$, $\frac{\omega_s^2 - \omega_0^2}{2\omega_s} \approx \delta_s$, $\frac{\beta}{\omega_p} \approx \frac{\beta}{\omega_s} \approx \frac{\beta}{\omega_0}$ avec $\beta = \frac{3\gamma}{8\omega_0}$).

L'amplificateur comporte également un filtre 4 adapté à filtrer des signaux électriques avec un haut facteur de qualité. Dans un mode de réalisation de l'invention, on utilise un filtre passe-bande. La bande passante du filtre 4 est centrée sur une fréquence proche de ω_0 . Dans un mode de réalisation de l'invention, le filtre passe-bande permet de transmettre sélectivement les signaux dans une plage de pulsation centrée sur ω_s sans transmettre les signaux dans une plage de pulsations centrée sur ω_0 et/ou ω_p . Dans des modes de réalisation de l'invention, le facteur de qualité du filtre est préférentiellement supérieur ou égal à $\omega_0/(\omega_p - \omega_s)$. Dans un mode de réalisation de l'invention, le filtre passe-bande utilisé est une détection synchrone. La bande passante du filtre 4 est choisie de telle sorte que le signal en sortie du filtre 4 présente une amplitude qui dépend linéairement dudit signal d'entrée 2. Cette caractéristique est expliquée dans la suite de la description.

L'amplificateur comporte également un premier système de transduction électromécanique (7) relié d'une part électriquement à la sortie de l'additionneur 5 et

d'autre part mécaniquement au résonateur mécanique 1. Il comporte également un second système de transduction (8) connecté d'une part mécaniquement au résonateur 1 et d'autre part au filtre 4. Le premier et le second système de transduction sont typiquement implémentés dans les MEMS ou NEMS. Dans des modes de réalisations, ils peuvent être réalisés par des systèmes piézoélectriques, piézorésistifs, capacitifs et/ou magnétomoteurs.

La figure 2 est un ensemble de photographies obtenues au moyen d'un microscope électronique illustrant des résonateurs 1 selon plusieurs modes de réalisation de l'invention. Dans des modes de réalisations particuliers de l'invention, le résonateur peut être un microsystème et/ou un nano-système. Par microsystème, on entend un système dont la plus petite dimension caractéristique est comprise dans une plage allant de 1 μm à 1000 μm inclus. Par nano-système, on entend un système dont la plus petite dimension caractéristique est comprise dans une plage allant de 1 nm à 1000 nm inclus.

Le panneau A de la figure 2 est une photographie d'un résonateur de type NEMS en forme de portique ou d'arceau. La partie centrale mesure 7 μm de long, ses parties latérales mesurent 3 μm de long. Il comporte une couche de silicium de 150 nm d'épaisseur sur laquelle est déposée une couche d'aluminium de 30 nm d'épaisseur. Le panneau B de la figure 2 est une photographie d'un résonateur de type NEMS en forme de poutre doublement encastrée. Le résonateur mesure 15 μm de longueur. Il comporte une couche de nitrure de silicium de 100 nm d'épaisseur sur laquelle est déposée une couche d'aluminium de 30 nm d'épaisseur. Dans un mode de réalisation de l'invention, non représenté, le résonateur mécanique 1 choisi peut être une membrane.

Dans un mode de réalisation préférentiel de l'invention, plusieurs éléments choisis parmi le résonateur 1, le filtre 4, le premier transducteur, le second transducteur et l'additionneur sont monolithiques ou intégrés, c'est-à-dire fabriqués à partir d'un même substrat, par exemple un substrat de silicium.

Dans un mode de réalisation de l'invention, le résonateur est placé dans une enceinte refroidie à très basse température. On peut remplir une première

enceinte avec de l'azote liquide. Une deuxième enceinte, agencée à l'intérieur de la première enceinte, peut contenir de l'hélium liquide et conditionner la température du résonateur à 4.2 Kelvin.

5 Le vide peut aussi être fait à l'intérieur d'une cellule comprenant le résonateur 1. On peut créer un vide partiel au moyen d'une pompe pour atteindre une pression de 10^{-4} mbar. En refroidissant la cellule tel que décrit précédemment, le gaz restant dans la cellule peut-être adsorbé aux parois et permettre un vide plus poussé (par cryo-pompage) : la pression de l'enceinte peut être de 10^{-6} mbar.

10

Dans un mode de réalisation de l'invention, l'amplificateur électromécanique comporte un générateur électrique adapté à générer un signal de pompe 3. Le générateur utilisé dans un mode de réalisation de l'invention est le Tektronix AFG 3252 et peut atteindre une fréquence de 240 MHz.

15

Dans un mode de réalisation de l'invention, l'amplificateur comprend un générateur de champ magnétique homogène. Ce générateur peut être une bobine, entourant l'une des enceintes décrites précédemment. La bobine peut être réalisée par l'enroulement d'un ou plusieurs fils d'un alliage de niobium-titane
20 supraconducteur et permet d'imposer au résonateur 1 un champ magnétique pouvant atteindre une densité du flux magnétique de 1 Tesla typiquement. En reliant électriquement le signal électrique en sortie de l'additionneur 5 au résonateur, des forces de Laplace sont induites sur les éléments de poutre ou de portique, selon une mise en œuvre décrite dans Cleland, A. N., & Roukes, M. L. (1999), External
25 control of dissipation in a nanometer-scale radiofrequency mechanical resonator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 72(3), 256-261. Le premier transducteur est adapté à transduire de l'énergie électromagnétique en énergie mécanique par un travail des forces de Laplace ou de Lorentz. Dans d'autres modes de réalisation de l'invention, on peut utiliser des transducteurs piézoélectriques, capacitifs,
30 électrostatiques et/ou thermoélectriques.

La figure 3 illustre schématiquement la déformée d'un résonateur 1 doublement encastré, en vue de coupe, lors d'un mouvement entraîné par deux forces d'excitation appliquées à des fréquences très différentes, chacune

correspondant à un mode différent. Un résonateur 1 peut être excité simultanément à ces différents modes. Ces modes sont indépendants lors d'une oscillation dans un régime linéaire, et sont couplés lors d'une oscillation dans un régime non-linéaire. D'après la forme canonique de la non-linéarité de Duffing (équation 1) il est possible de les coupler dans le même résonateur de manière dispersive (Westra, H. J. R., Poot, M., Van der Zant, H. S. J., & Venstra, W. J. (2010). Nonlinear modal interactions in clamped-clamped mechanical resonators. *Physical Review Letters*, 105(11), 117205.).

10 L'excitation d'un résonateur idéal à sa fréquence de résonance entraîne des oscillations à une amplitude donnée. Pour de fortes amplitudes, ces oscillations exercent des contraintes sur le matériau du résonateur. Quand l'amplitude d'excitation augmente, le pic de résonance varie en fréquence et modifie l'allure de la courbe décrivant l'amplitude en fonction de la fréquence, d'une allure
15 Lorentzienne en régime linéaire, à une allure dite de Duffing pour de plus hautes amplitudes. Cette propriété existe pour tous les modes d'un résonateur, chaque mode ayant un coefficient de Duffing (non-linéaire) γ_n , n étant l'ordre du mode.

Si deux modes sont excités à des amplitudes assez élevées, un
20 comportement similaire est observé. La contrainte générée par l'amplitude de l'oscillation d'un mode affecte les propriétés mécaniques de l'ensemble du résonateur. L'autre mode est alors affecté, et *vice versa*.

Dans la figure 3, le résonateur est excité au mode fondamental à la
25 fréquence f_0 d'amplitude x_0 et au second harmonique à la fréquence f_2 d'amplitude x_2 . La forme dynamique du résonateur est définie par les deux excitations, couplées par les termes de tension δT_0 (proportionnel à x_0^2) et δT_2 (proportionnel à x_2^2).

On peut résoudre l'équation 1 sous la forme suivante, dans le cas où
30 une seule force d'excitation est appliquée :

$$x = \frac{F_L}{2m\omega_0} \frac{1}{(\omega_0 + \beta x^2 - \omega) + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (2)$$

avec $\beta = \frac{3\gamma}{8\omega_0}$ et γ le coefficient de Duffing. On utilise la notation $\gamma = \gamma_n$ lorsqu'un seul mode n est concerné.

5 Le couplage entre modes est dérivé théoriquement de la théorie des poutres (Lulla, K. J., Cousins, R. B., Venkatesan, A., Patton, M. J., Armour, A. D., Mellor, C. J., & Owers-Bradley, J. R. (2012), *Nonlinear modal coupling in a high-stress doubly-clamped nanomechanical resonator*, New Journal of Physics, 14(11), 113040) par les inventeurs. On peut en déduire le couplage dispersif suivant entre
10 les deux modes :

$$\omega_n = \omega_{0,n} + \beta_n x_n^2 + \beta_{n,m} x_m^2 \quad (3)$$

où ω_n est la pulsation de résonance du mode n lors d'une résonance d'allure de
15 Duffing, $\omega_{0,n}$ la pulsation de résonance du mode n en l'absence de couplage, et comprenant le terme de Duffing $\beta_n x_n^2$, où $\beta_n = \frac{3\gamma_n}{8\omega_{0,n}}$ et x_n l'amplitude du mode n . Le couplage avec le mode m est lié au terme quadratique $\beta_{n,m} x_m^2$ (avec x_m l'amplitude du mode m). Le coefficient non-linéaire $\beta_{n,m}$ est donné par :

$$\beta_{n,m} = \frac{1}{4\pi} \frac{E}{l^3 \sqrt{\rho_{ew}}} \times \left(\frac{\int_l \Psi_n'^2(z) dz \int_l \Psi_m'^2(z) dz}{2} + \left(\int_l \Psi_n'(z) \Psi_m'(z) dz \right)^2 \right) \quad (4)$$

20

avec Ψ_n' la dérivée spatiale de la déformée du résonateur pour le mode n .

L'origine du couplage est visible dans le terme γx^3 de l'équation 1, et
25 aucun des deux modes ne doit être nécessairement dans un régime non-linéaire.

L'équation 3 ne fait pas d'hypothèse sur le couple (n,m) , et théoriquement, n peut être égal à m . On peut donc théoriquement coupler un mode

avec lui-même, ce qui définit la technique d'auto-couplage. Cette technique est précisément utilisée dans l'ensemble des modes de réalisation de l'invention. Cet effet est différent des effets précédemment décrits : dans l'auto-couplage, au moins deux signaux d'excitation harmoniques excitent un seul mode n , alors que l'on décrit, par exemple en formule 1 un effet dans lequel un signal d'excitation harmonique excite un mode n .

On utilise dans l'ensemble des modes de réalisation de l'invention deux signaux, le signal d'entrée 2 et le signal de pompe 3, adaptés à exciter le *même mode* après addition et transduction électromécanique, à des pulsations proches mais différentes. L'équation 1 permet d'écrire :

$$\ddot{x} + \Delta\omega \dot{x} + \omega_0 x + \gamma x^3 = f_{L,p} \cos(\omega_p t) + f_{L,s} \cos(\omega_s t + \delta\phi) \quad (5)$$

où $f_{L,p}$ et $f_{L,s}$ sont respectivement la force de signal d'entrée correspondant à la transduction de la composante du signal d'entrée 2, et la force de pompe correspondant à la transduction de la composante du signal de pompe 3 (normalisées à la masse du mode), entraînant le résonateur 1 respectivement aux pulsations ω_s et ω_p , avec ω_s différent de ω_p et avec $\delta\phi$ la différence de phase entre les deux signaux. Le signal électrique provenant de l'additionneur 5 est transduit en un signal mécanique, dont $f_{L,s}$ et $f_{L,p}$ sont deux composantes. L'additionneur 5 peut être réalisé par une combinaison de résistances et de capacités et/ou d'un amplificateur opérationnel, qui peuvent être intégrés à une puce de manière monolithique. On peut définir pour la clarté des notations :

25

$$\omega_p = \omega_0 + \delta_p \quad (6)$$

$$\omega_s = \omega_p + \delta_s \quad (7)$$

où δ_s et δ_p sont les paramètres de balayage relatifs à ω_0 . Par construction, δ_p et δ_s sont différents de 0.

Une solution générale x_0 de l'équation 5 peut s'écrire sous la forme :

$$x_0 = \frac{X_0 e^{i\omega_p t} + X_0^* e^{-i\omega_p t}}{2} \quad (8)$$

En remplaçant $\beta = \frac{3\gamma}{8\omega_0}$ dans l'équation 5 on obtient :

5

$$\dot{X}_0 = -\left(\frac{\Delta\omega}{2} + i\delta_p\right) X_0 + i\beta X_0^2 X_0^* + \frac{1}{2i\omega_0} \left(f_{L,p} + f_{L,s} e^{i\delta_s t + \delta\phi}\right) \quad (9)$$

où X_0 est une variable lente ($\dot{X}_0 \ll \omega_0 X_0$), l'hypothèse de haut facteur de qualité est valide ($\Delta\omega \ll \omega_0$) et où l'on travaille dans une plage de fréquences proche de la
10 fréquence de résonance ($\frac{\omega_p^2 - \omega_0^2}{2\omega_p} \approx \delta_p, \frac{\beta}{\omega_p} \approx \frac{\beta}{\omega_0}$). Au premier ordre, on peut résoudre l'équation 9 avec la forme suivante de X_0 :

$$X_0 = a_p + a_s e^{i\delta_s t} + a_i e^{-i\delta_s t} \quad (10)$$

15 avec a_p , a_s et a_i les amplitudes complexes des différentes composantes du mouvement, caractéristiques de la résonance mécanique du mode, respectivement aux fréquences ω_p , $\omega_p + \delta_s$, et $\omega_p - \delta_s$, où a_p est le terme principal gouverné principalement par $f_{L,p}$ (la force de pompe, résonant à $\omega_0 + \delta_{p,\max}$), a_s principalement gouverné par $f_{L,s}$ (la force de signal d'entrée, résonant à $\omega_p + \delta_{s,\max}$) et a_i , l'image de
20 a_s symétriquement à a_p (le signal complémentaire, résonant à $\omega_p + \delta_{i,\max}$).

La figure 4 illustre schématiquement des résonances proches de la pulsation $\delta_{p,\max}$ (pulsation de bifurcation réduite) translatée de ω_0 . En introduisant les termes de l'équation 10 dans l'équation 9 et en utilisant une approximation d'onde
25 rotative, on obtient le système d'équations suivant pour les différentes composantes des pulsations relatives à ω_p :

$$e^{i0} : a_p = \frac{f_{L,p}}{2\omega_0 \beta |a_p|^2 - \delta_p + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (11)$$

$$e^{i\delta_s} : a_s = \frac{\frac{f_{L,s} e^{i\delta\phi}}{2\omega_0} - \beta a_p^2 a_i^*}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p - \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (12)$$

$$e^{-i\delta_s} : a_i = \frac{-\beta a_p^2 a_s^*}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p + \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (13)$$

5

En isolant chacune des variables et en les exprimant comme des fonctions de a_p , on obtient finalement :

$$a_p = \frac{f_{L,p}}{2\omega_0} \frac{1}{\beta |a_p|^2 - \delta_p + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (14)$$

10

$$a_s = \frac{f_{L,s} e^{i\delta\phi}}{2\omega_0} \frac{1}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p - \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2} - \frac{\beta^2 |a_p|^4}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p + \delta_s - i \frac{\Delta\omega}{2}}} \quad (15)$$

$$a_i = \frac{f_{L,s} e^{-i\delta\phi}}{2\omega_0} \frac{1}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p + \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2} - \frac{\beta^2 |a_p|^4}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p - \delta_s - i \frac{\Delta\omega}{2}}} \times \frac{\beta a_p^2}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p - \delta_s - i \frac{\Delta\omega}{2}}. \quad (16)$$

15

On observe alors que l'équation 14 est similaire à l'équation 2 avec $\delta_p = \omega_p - \omega_0$ étant le paramètre de balayage pour la composante a_p . La résonance à la pulsation ω_p est une résonance de Duffing. On remarque que l'équation 14 est non-linéaire par rapport à a_p , alors que l'équation 15 est linéaire par rapport à a_s et que l'équation 16 est linéaire par rapport à a_i . Selon un mode de réalisation de l'invention, on peut actionner le résonateur 1 en additionnant le signal d'entrée 2 et le signal de pompe 3, par exemple au moyen de l'additionneur 5, et transduire le signal électrique résultant au résonateur 1 sous forme de signal mécanique, comportant les composantes $f_{L,s}$ et $f_{L,p}$. Au moins une des amplitudes des signaux

20

en entrée de l'additionneur 5 (signal d'entrée 2 et/ou signal de pompe 3) présente une amplitude suffisante pour actionner ledit résonateur 1 en régime non-linéaire, et plus particulièrement en régime de Duffing, au moins dans une première plage de pulsations proches de ω_0 . Typiquement, c'est le signal de pompe 3 qui présente
5 cette amplitude. Dans l'ensemble des modes de réalisation de l'invention, l'amplitude des oscillations du résonateur est linéaire dans une seconde plage de pulsations proches de ω_p , dans une plage comprenant la résonance du signal a_s et/ou a_i . En particulier, l'allure de l'amplitude des oscillations en fonction de la seconde plage de pulsations peut être Lorentzienne.

10

Préférentiellement, la différence δ_s définie par $\omega_s - \omega_p$ est au moins cinquante fois inférieure à ω_0 , la différence δ_p définie par $\omega_p - \omega_0$ est au moins cinquante fois inférieure à ω_0 , et ω_p est différent de ω_s .

15

Selon un mode de réalisation de l'invention, on mesure l'amplitude de l'oscillation du résonateur 1 dans une seconde plage de fréquence proche de ω_p , par exemple dans une plage comprenant la résonance du signal a_s .

La norme des différentes composantes a_p , a_s et a_i est illustrée dans la
20 figure 4 en fonction d'une pulsation relative à $\delta_{p,max}$, respectivement par les courbes (b), (c) et (d). Le terme principal correspondant à $|a_p|$ est centré en pulsation sur $\delta_{p,max}$, un terme correspondant à $|a_s|$ est centré sur $\delta_p + \delta_{s,max}$ et un troisième terme correspondant à $|a_i|$ est centré sur $\delta_p + \delta_{i,max}$. Dans un mode préférentiel de réalisation de l'invention, l'actionnement du résonateur 1 entraîne une amplitude des
25 oscillations du résonateur 1 variant linéairement avec le signal d'entrée 2 sensiblement à la pulsation $\omega_p + \delta_s$. Dans un mode préférentiel de réalisation de l'invention, on mesure une amplitude de l'oscillation, dite amplitude de sortie, du résonateur mécanique 1 sensiblement à la pulsation $\omega_p + \delta_s$. Dans différents modes de réalisation de l'invention, on peut mesurer l'amplitude du résonateur par mesure
30 d'une variation capacitive et/ou par mesure d'une déviation d'un signal optique. Dans une mode de réalisation de l'invention, on peut mesurer une pluralité d'amplitudes du résonateur, dans une plage de pulsations proches de $\omega_p + \delta_s$. On peut utiliser préférentiellement un filtre 4 passe-bande de haut facteur de qualité

dont la bande passante est centrée sur une pulsation proche de ω_0 et préférentiellement sensiblement de $\omega_p + \delta_s$. Dans des modes de réalisation particuliers de l'invention, un tel filtre peut être fabriqué de manière intégrée sur une puce. Un filtre 4 passe-bande peut être réalisé par une combinaison connue de
 5 l'homme du métier de résistances et de capacités, et/ou de composants actifs, comme par exemple des amplificateurs opérationnels et/ou une détection synchrone.

La figure 5 illustre des amplitudes du résonateur 1 mesurées dans le cas
 10 de l'excitation du résonateur 1 par le signal de pompe 3 seul (panneau A) et dans le cas de l'excitation par le signal d'entrée 2 seul (panneau B). Dans les panneaux A et B de la figure 5, on a $f_{L,s} \ll f_{L,p}$ et plus particulièrement $m f_{L,p} = 100 m f_{L,s} = 6,4 pN$ (m étant la masse du mode). La force d'entraînement liée au signal de pompe 3 excite le résonateur 1 avec une dynamique non-linéaire, illustrée dans le panneau
 15 A, alors que la force d'entraînement liée au signal d'entrée 2 excite le résonateur 1 de manière linéaire. Le rapport des amplitudes entre l'amplitude maximum mesurée dans le panneau A et dans le panneau B n'est pas exactement de 100 en raison d'effets non-linéaires dans la composante dissipative $\Delta\omega$ propre au matériau du résonateur 1.

20

Dans le cas où les forces $f_{L,s}$ et $f_{L,p}$ illustrées en figure 5 sont générées simultanément et auto-couplées par le résonateur 1, on peut réécrire l'équation 15 sans négliger les termes non-linéaires en a_p tout en négligeant les termes non-linéaires en a_s . En redistribuant le terme du quatrième ordre au dénominateur, on
 25 obtient l'équation suivante :

$$a_s = \frac{f_{L,s} e^{i\delta\phi}}{2\omega_0} \times \frac{1}{2\beta |a_p|^2 (1 - |A_0|^2) - \delta_p (1 - |A_0|^2) - \delta_s (1 + |A_0|^2) + i \frac{\Delta\omega}{2} (1 - |A_0|^2)} \quad (17)$$

avec :

30

$$A_0 = \frac{\beta |a_p|^2}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p + \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (18)$$

ce qui permet d'obtenir :

$$a_s = \frac{f_{L,s} e^{i\delta\phi}}{2\omega_0} \frac{1}{1 - |A_0|^2} \frac{1}{2\beta |a_p|^2 - \delta_p - \delta_s \left(\frac{1 + |A_0|^2}{1 - |A_0|^2} \right) + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (19)$$

5

L'équation 19 est équivalente à l'équation 15 pour $A_0 \approx 0$. L'amplitude de pompe a_p peut-être contrôlée lors des réalisations de l'invention par deux paramètres : la force réduite $f_{L,p}$ et la pulsation d'excitation ω_p (ou en unité réduites δ_p). Pour une force d'excitation liée au signal de pompe 3 donnée, l'amplitude a_p peut être maximisée en approchant δ_p le plus près possible du maximum en amplitude de la résonance de Duffing, en choisissant toujours la branche d'amplitude maximum lors d'une résonance bistable du résonateur 1.

Deux caractéristiques émergent de l'équation 19. D'une part, pour trouver la fréquence de résonance de a_s , on doit annuler la partie réelle du dénominateur de l'équation 19. Le paramètre de balayage pour a_s étant δ_s , cette condition est valide pour :

$$\begin{aligned} & \delta_s^3 + \delta_s^2 (2\beta |a_p|^2 - \delta_p) - \delta_s \left[(3\beta |a_p|^2 - \delta_p) (\beta |a_p|^2 - \delta_p) - \left(\frac{\Delta\omega}{2} \right)^2 \right] \\ & - (2\beta |a_p|^2 - \delta_p) \left[(3\beta |a_p|^2 - \delta_p) (\beta |a_p|^2 - \delta_p) + \left(\frac{\Delta\omega}{2} \right)^2 \right] = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

20

où $|A_0|^2$ est développé selon l'équation 18. En résolvant le polynôme du troisième ordre en δ_s , on trouve une seule solution valide correspondant à $\delta_{s,max}$.

D'autre part, le préfacteur de l'équation 17 implique que l'amplitude de $|a_s|$ est modifiée par $|a_p|$. L'effet du couplage entre les excitations entraînées par le signal d'entrée 2 et le signal de pompe 3 n'est pas seulement un décalage de la fréquence

mais aussi une amplification. On peut écrire le facteur de gain G associé en comparant l'amplitude de $|a_s|$ en résonance avec et sans la composante additionnelle $f_{L,p}$ (cas d'un signal d'entrée 2 seul, dit standard, au numérateur de l'équation 21, et cas d'un signal d'entrée 2 additionné à un signal de pompe 3, dit pompé, ou *pumped* en anglais, au dénominateur de l'équation 21) :

$$G = \frac{|a_{s, standard}|}{|a_{s, pumped}|} = \frac{1}{1 - |A_0|^2} \quad (21)$$

Dans ce mode de réalisation, on utilise l'auto-couplage pour amplifier le signal d'entrée 2 par un signal de pompe 3, d'amplitude supérieure : c'est ce qui définit la technique d'auto-pompage. Le signal de sortie du résonateur 1 est un signal d'entrée 2 amplifié, et de fréquence de résonance sensiblement différente, décalé et sans non-linéarité.

La figure 6 illustre l'amplitude du résonateur en fonction de la fréquence d'oscillation, le résonateur étant actionné selon un mode de réalisation de l'invention. Le signal d'entrée 2 de pulsation ω_s proche de ω_0 est additionné au signal de pompe 3 de pulsation ω_s proche de ω_0 et différent de ω_p . Le signal résultant de l'addition du signal d'entrée 2 et du signal de pompe 3 est transduit au résonateur mécanique. Dans ce mode de réalisation, on mesure l'amplitude de l'oscillation de sortie, c'est-à-dire du résonateur 1. Cette mesure peut être réalisée de manière optique, électromagnétique ou électrostatique. La courbe (f) illustre la valeur absolue de a_p . La flèche noire en haut à droite de la figure indique la fréquence ω_p utilisée comme point de travail du signal de pompe 3 pour injecter le signal d'entrée 2 (illustré par la courbe (g), dont la fréquence est décalée pour permettre une comparaison visible dans la figure 6). La courbe (h) illustre la ligne de résonance correspondant à $|a_s|$. Cette ligne de résonance est centrée sur $\omega_p + \delta_{s,max}$. Plus généralement, cette ligne de résonance est centrée sur une pulsation proche de ω_p . Le facteur de gain de l'équation 21 est égal dans ce mode de réalisation à 20, ce qui équivaut à une amplification de 26 dB. L'allure de la courbe (h) est lorentzienne et de largeur (ou dissipation) $\Delta\omega$. Dans ce mode de réalisation de l'invention, la dissipation effective liée à la composante $|a_s|$ est sensiblement

égale à la dissipation effective mesurée quand on actionne le résonateur seulement avec le signal d'entrée 2, et l'amplitude $|a_s|$ est sensiblement plus élevée.

Préférentiellement, on choisit, lors de l'amplification, $\delta_s > 0$ si γ (c'est-à-dire γ_n dans ce cas) est strictement supérieur à 0. En effet, on sort du cadre de l'auto-pompage dans le cas $\delta_s = 0$ ($\omega_s = \omega_p$). Le résonateur est dans ce cas actionné à la fréquence ω_s avec une force égale à $f_{L,s} + f_{L,p}$. Ce cas particulier d'excitation peut entraîner une transition de a_p passant d'amplitudes élevées à des amplitudes faibles. La probabilité d'un tel événement de relaxation augmente en se rapprochant de la pulsation de bifurcation réduite $\delta_{p,max}$ de a_p et entraîne une limitation pratique du gain maximum atteignable par ce procédé, si l'ensemble des autres paramètres est gardé constant. Cette limitation du gain peut par exemple être compensée par une augmentation de l'amplitude du signal de pompe 3.

La figure 7 illustre une amplification linéaire selon un mode de réalisation de l'invention. Dans les modes de réalisation décrit précédemment, le signal a_s est considéré comme linéaire car l'excitation $f_{L,s}$ est très petite. Dans un mode de réalisation particulier de l'invention, l'augmentation de l'amplitude de a_s par amplification peut correspondre à des amplitudes pour lesquelles le résonateur oscille, hors du cadre de l'auto-pompage, de manière non-linéaire et particulièrement selon une équation de Duffing. On peut exprimer analytiquement les expressions de a_p , a_s et a_i en dérivant le terme non-linéaire de plus bas ordre dans les équations 11, 12 et 13 par rapport à a_s , en introduisant l'expression standard de Duffing. On obtient :

25

$$e^{i0} : a_p = \frac{f_{L,p}}{2\omega_0 \beta (|a_p|^2 + 2|a_s|^2 + 2|a_i|^2 + 2a_s a_i e^{i\phi_p}) - \delta_p + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (22)$$

$$e^{i\delta_s} : a_s = \frac{\frac{f_{L,s} e^{i\delta\phi}}{2\omega_0} - \beta a_p^2 a_i^*}{\beta (2|a_p|^2 + |a_s|^2 + 2|a_i|^2) - \delta_p - \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (23)$$

$$e^{-i\delta_s} : a_i = \frac{-\beta a_p^2 a_s^*}{\beta (2|a_p|^2 + 2|a_s|^2 + |a_i|^2) - \delta_p + \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (24)$$

où ϕ_p est défini par $a_p^* = a_p e^{i\phi_p}$. Les équations 22, 23 et 24 sont dans ce cas couplées entre elles. Avec les notations employées précédemment, on a :

$$a_p = \frac{f_{L,p}}{2\omega_0} \frac{1}{\beta [|a_p|^2 + 2 |a_s|^2 (1 + |A|^2 - A)] - \delta_p + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (25)$$

5

$$a_s = \frac{f_{L,s} e^{i\delta\phi}}{2\omega_0} \frac{1}{1 - |A|^2} \times \frac{1}{\frac{1+|A|^2}{1-|A|^2} (\beta |a_s|^2 (1 - |A|^2) - \delta) + 2\beta |a_p|^2 - \delta_p + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (26)$$

$$a_i = -A e^{-i\phi_p} a_s^* \quad (27)$$

avec :

$$A = \frac{\beta |a_p|^2}{\beta [2 |a_p|^2 + |a_s|^2 (2 + |A|^2)] - \delta_p + \delta_s + i \frac{\Delta\omega}{2}} \quad (28)$$

10

Les inventeurs ont découvert que dans ces conditions, la dépendance non-linéaire des variables en fonction d'autres variables s'atténue, voir s'annule expérimentalement, en particulier concernant les dépendances non-linéaires de a_s . La figure 7 illustre une amplification linéaire dans ces conditions. La courbe (e) de la figure 7 correspond à la ligne de résonance de $|a_s|$, dans des conditions de pompage de grande amplitude, et ayant pour conséquence une grande amplitude de $|a_p|$. Dans ce mode de réalisation, $|a_p|$ peut être inférieure ou égale à 90 nm et/ou supérieure ou égale à l'épaisseur des couches du résonateur 1.

Les inventeurs ont également découvert que le comportement de $|a_s|$ est linéaire. A titre de comparaison, la courbe (d) de la figure 7 (dont la fréquence est décalée pour la clarté de la figure) illustre une excitation simple du résonateur 1, dont la force est adaptée à atteindre la même amplitude que $|a_s|$: la ligne de résonance de la courbe (d) correspond à un comportement d'un oscillateur en régime de Duffing. Dans ce mode de réalisation, la dynamique linéaire du système est amplifiée par un facteur 5.

15

20

25

Ces résultats illustrent la capacité de ce mode de réalisation, en régime d'auto-pompage, à amplifier l'amplitude du signal tout en augmentant la gamme dynamique linéaire du système. L'augmentation de cette gamme dynamique peut être directement appliquée à des systèmes de détection par exemple.

Les modes de réalisation d'actionnement linéaire et/ou d'amplification linéaire décrits présentent l'avantage de ne pas recourir à un ajustement électromécanique effectué par une grille capacitive permettant de compenser les non-linéarités tel que décrit dans l'art antérieur. Ces modes de réalisations sont compatibles avec un ajustement simultané de la fréquence de résonance induite par une grille polarisée. En particulier, dans un mode de réalisation de l'invention, on peut ajuster la fréquence du mode par la polarisation d'une électrode couplée au résonateur 1.

La figure 8 illustre les étapes du procédé d'amplification électromécanique de l'invention dans un mode de réalisation appliqué à un résonateur mécanique 1 de pulsation ω_0 . D'une manière générale le procédé consiste à générer (802) un premier signal d'entrée 2 de première amplitude et de première pulsation ω_s et générer (804) un second signal de pompe 3 de seconde amplitude supérieure à la première amplitude et de seconde pulsation ω_p différente de la première pulsation. Dans un mode de réalisation préférentielle, les pulsations des deux signaux d'entrée et de pompe sont proches de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique. De manière avantageuse, le signal de pompe 3 est choisi dans une plage de pulsations ω_p et d'amplitude où le résonateur est actionné en régime non-linéaire.

Dans un mode de réalisation, la différence δ_s entre la première et la seconde pulsation, définie par « $\omega_s - \omega_p$ » est au moins cinquante fois inférieure à la pulsation ω_0 du résonateur, et la différence δ_p entre la seconde pulsation et la pulsation ω_0 du résonateur, définie par « $\omega_p - \omega_0$ » est au moins cinquante fois inférieure à la pulsation ω_0 du résonateur.

Les deux signaux d'entrée et de pompe sont ensuite additionnés (étape 806). Le signal électrique résultant est dans une étape suivante (808)

transduit au résonateur mécanique (1), ce qui actionne (809) des oscillations non-linéaires du résonateur.

Dans un mode de réalisation, les oscillations non-linéaires du résonateur suivent une équation différentielle non-linéaire de Duffing, et le
5 coefficient de Duffing est non nul.

Dans une étape suivante (810), le procédé permet que les oscillations non-linéaires du résonateur soient transduites en un signal électrique, qui est filtré (812) pour obtenir un signal de sortie (6). Avantageusement, l'amplitude des oscillations après le filtrage est mesurée sensiblement à la pulsation « $\omega_p + \delta_s$ ».

10 De manière préférentielle, l'étape de filtrage est effectuée avec un filtre passe-bande dont la bande passante est centrée sur une pulsation proche de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique. Dans une variante, la bande passante du filtre est centrée sur une pulsation sensiblement de $\omega_p + \delta_s$.

La mise en œuvre du procédé permet de générer un signal de sortie
15 6 qui est amplifié, l'amplitude des oscillations mesurée après l'étape de filtrage variant linéairement avec le premier signal d'entrée 2 à la pulsation ω_s , et le mode de résonance obtenu est celui d'une résonance linéaire.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'amplification électromécanique comprenant au moins :

- 5 - une première étape de transduction consistant à transduire un signal électrique à un résonateur mécanique (1) ayant un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 , ledit signal électrique actionnant des oscillations non-linéaires du résonateur ;
- une deuxième étape de transduction consistant à transduire lesdites oscillations non-linéaires du résonateur en un signal électrique transduit; et
- 10 - une étape de filtrage consistant à filtrer ledit signal électrique transduit pour obtenir un signal de sortie (6) ;

le procédé étant caractérisé en ce que :

- 15 - le signal transduit au résonateur est obtenu en additionnant un premier signal d'entrée (2) de première amplitude et de première pulsation ω_s et un second signal de pompe (3) de seconde amplitude supérieure à la première amplitude et de seconde pulsation ω_p différente de la première pulsation, les première et seconde pulsations étant proches de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique,
- 20 le second signal de pompe (3) étant choisi dans une plage de pulsations ω_p et d'amplitude où le résonateur est actionné en régime non-linéaire ; et en ce que
- le signal de sortie (6) est amplifié, l'amplitude des oscillations mesurée après le filtrage variant linéairement avec le premier signal d'entrée à la pulsation ω_s , et le mode de résonance obtenu est celui d'une résonance linéaire.

25

2. Le procédé selon la revendication 1 dans lequel le signal électrique transduit au résonateur actionne des oscillations non-linéaires du résonateur suivant une équation différentielle non-linéaire.

30 3. Le procédé selon la revendication 2 dans lequel l'équation différentielle non-linéaire est une équation de Duffing.

4. Le procédé selon la revendication 3 dans lequel le coefficient de Duffing est non nul.
5. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 dans lequel la différence δ_s entre la première et la seconde pulsation, définie par « $\omega_s - \omega_p$ » est au moins cinquante fois inférieure à la pulsation ω_0 du résonateur, et la différence δ_p entre la seconde pulsation et la pulsation ω_0 du résonateur, définie par « $\omega_p - \omega_0$ » est au moins cinquante fois inférieure à la pulsation ω_0 du résonateur.
6. Le procédé selon la revendication 5 dans lequel l'amplitude des oscillations après le filtrage est mesurée sensiblement à la pulsation « $\omega_p + \delta_s$ ».
7. Le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel l'étape de filtrage est effectuée avec un filtre passe-bande dont la bande passante est centrée sur une pulsation proche de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique.
8. Le procédé selon la revendication 7 dans lequel la bande passante du filtre est centrée sur une pulsation sensiblement de $\omega_p + \delta_s$.
9. Un dispositif d'amplification électromécanique comportant au moins un résonateur mécanique (1) ayant un mode de résonance mécanique de pulsation ω_0 , le dispositif comprenant de plus :
- un additionneur (5) de signaux électriques, apte à additionner un premier signal d'entrée (2) de première amplitude et de première pulsation ω_s et un second signal de pompe (3) de seconde amplitude supérieure à la première amplitude et de seconde pulsation ω_p différente de la première pulsation, les première et seconde pulsations étant proches de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique, le second signal de pompe (3) étant choisi dans une plage de pulsations ω_p et d'amplitude où le résonateur est actionné en régime non-linéaire ;

5 - un premier transducteur électromécanique relié d'une part électriquement à la sortie dudit additionneur (5) et d'autre part mécaniquement audit résonateur mécanique (1), le premier transducteur étant adapté à transduire le signal électrique en sortie de l'additionneur au résonateur mécanique pour actionner des oscillations non-linéaires du résonateur ;

10 - un second transducteur électromécanique connecté d'une part mécaniquement audit résonateur mécanique (1) et d'autre part électriquement à un filtre (4), le second transducteur étant adapté à transduire lesdites oscillations non-linéaires du résonateur en un signal électrique transduit ; et

15 - un filtre (4) de signaux électriques apte à filtrer ledit signal électrique transduit pour obtenir un signal de sortie (6), ledit signal de sortie étant amplifié, l'amplitude des oscillations mesurée à la sortie du filtre variant linéairement avec le premier signal d'entrée à la pulsation ω_s , et le mode de résonance obtenu est celui d'une résonance linéaire.

20 10. Le dispositif selon la revendication 9 dans lequel ledit résonateur mécanique (1) est choisi au moins parmi un microsystème et un nanosystème.

11. Le dispositif selon la revendication 9 ou 10 dans lequel ladite bande passante dudit filtre (4) est centrée sur une pulsation proche de la pulsation ω_0 du résonateur mécanique.

25 12. Le dispositif selon l'une quelconque des revendications 9 à 11 dans lequel au moins deux éléments choisis parmi ledit additionneur (5), ledit filtre (4), ledit premier transducteur mécanique et ledit second transducteur électromécanique sont intégrés de manière monolithique.

30 13. Le dispositif selon l'une quelconque des revendications 9 à 12 comprenant de plus un générateur électrique pour générer ledit signal de pompe (3).

14. Le dispositif selon la revendication 13 dans lequel au moins un transducteur choisi parmi ledit premier transducteur et ledit second transducteur

sont adaptés à transduire de l'énergie par un travail de forces de Laplace ou de forces de Lorentz.

- 5 15. Le dispositif selon l'une quelconque des revendications 9 à 14 dans lequel au moins un transducteur choisi parmi ledit premier transducteur et ledit second transducteur sont adaptés à transduire de l'énergie par un effet choisi parmi au moins un effet piézoélectrique et piézorésistif.

1/5

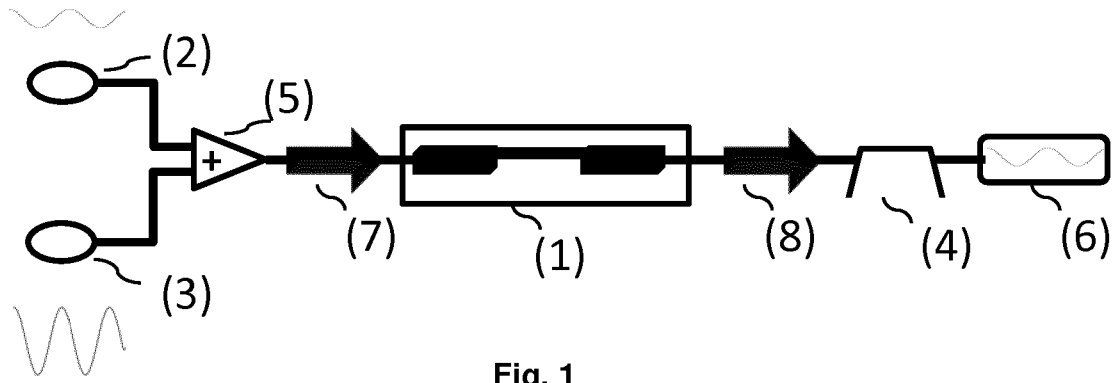
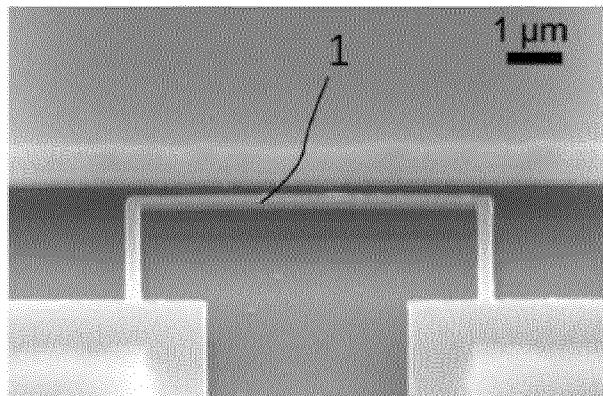


Fig. 1

A



B

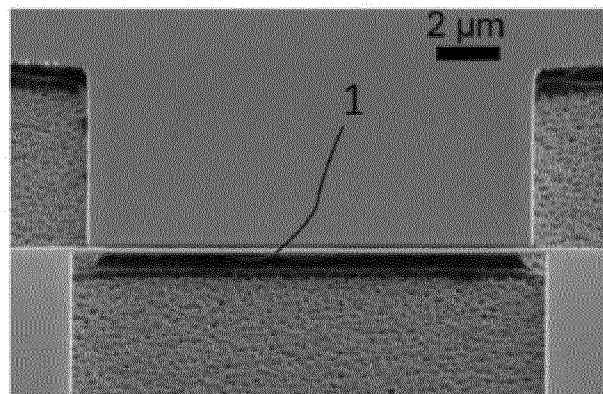


Fig. 2



Fig. 3

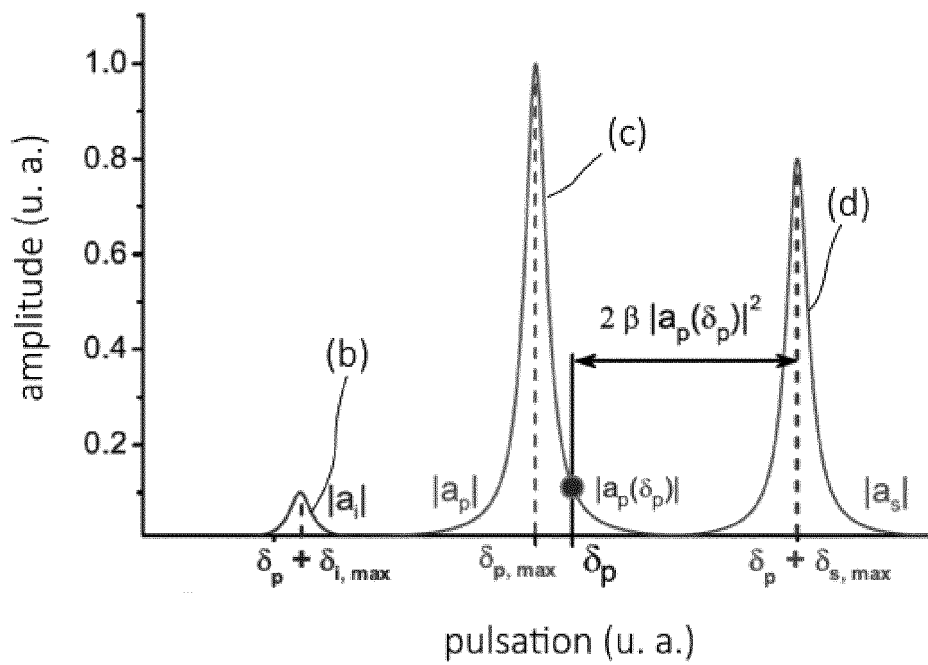


Fig. 4

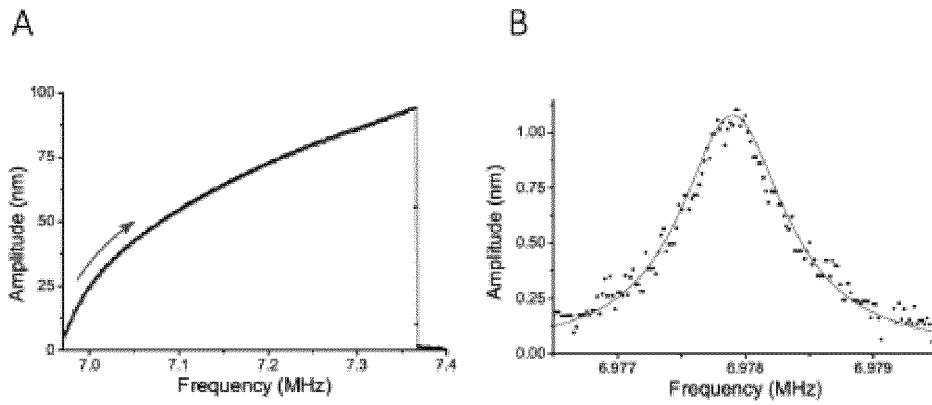


Fig. 5

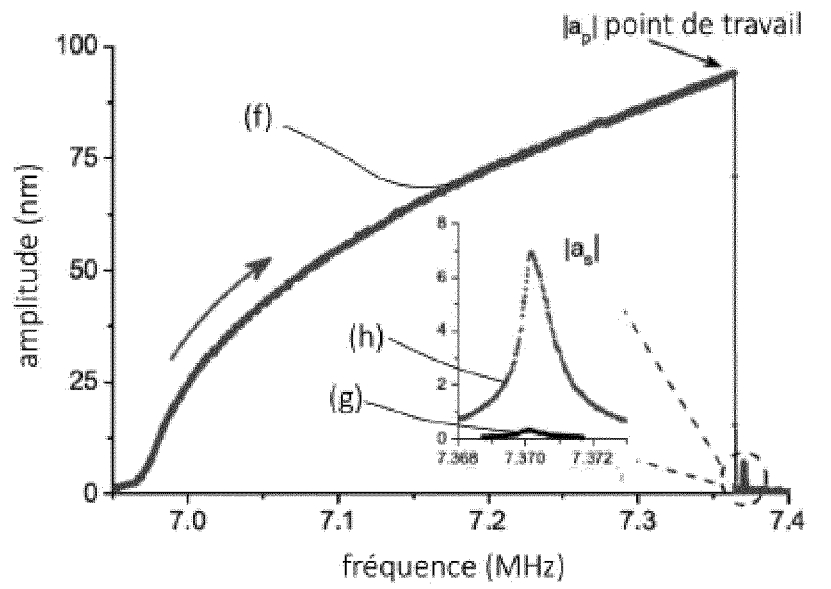


Fig. 6

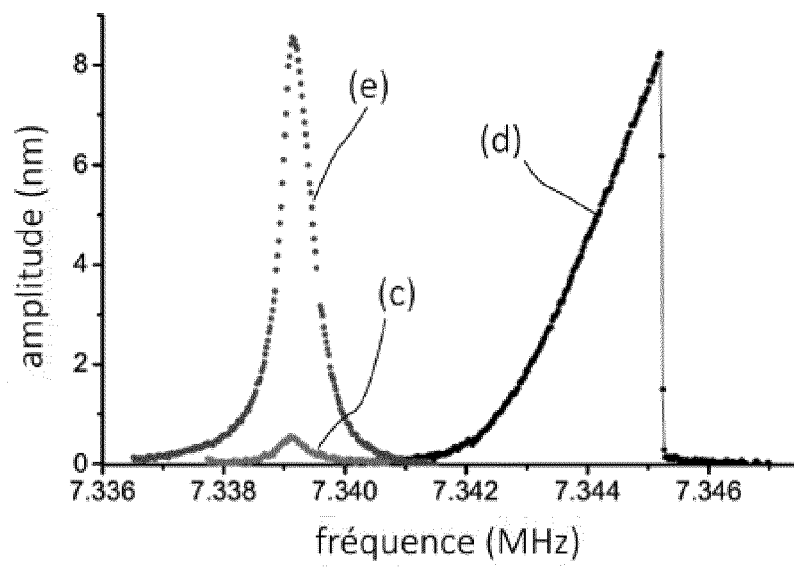


Fig. 7

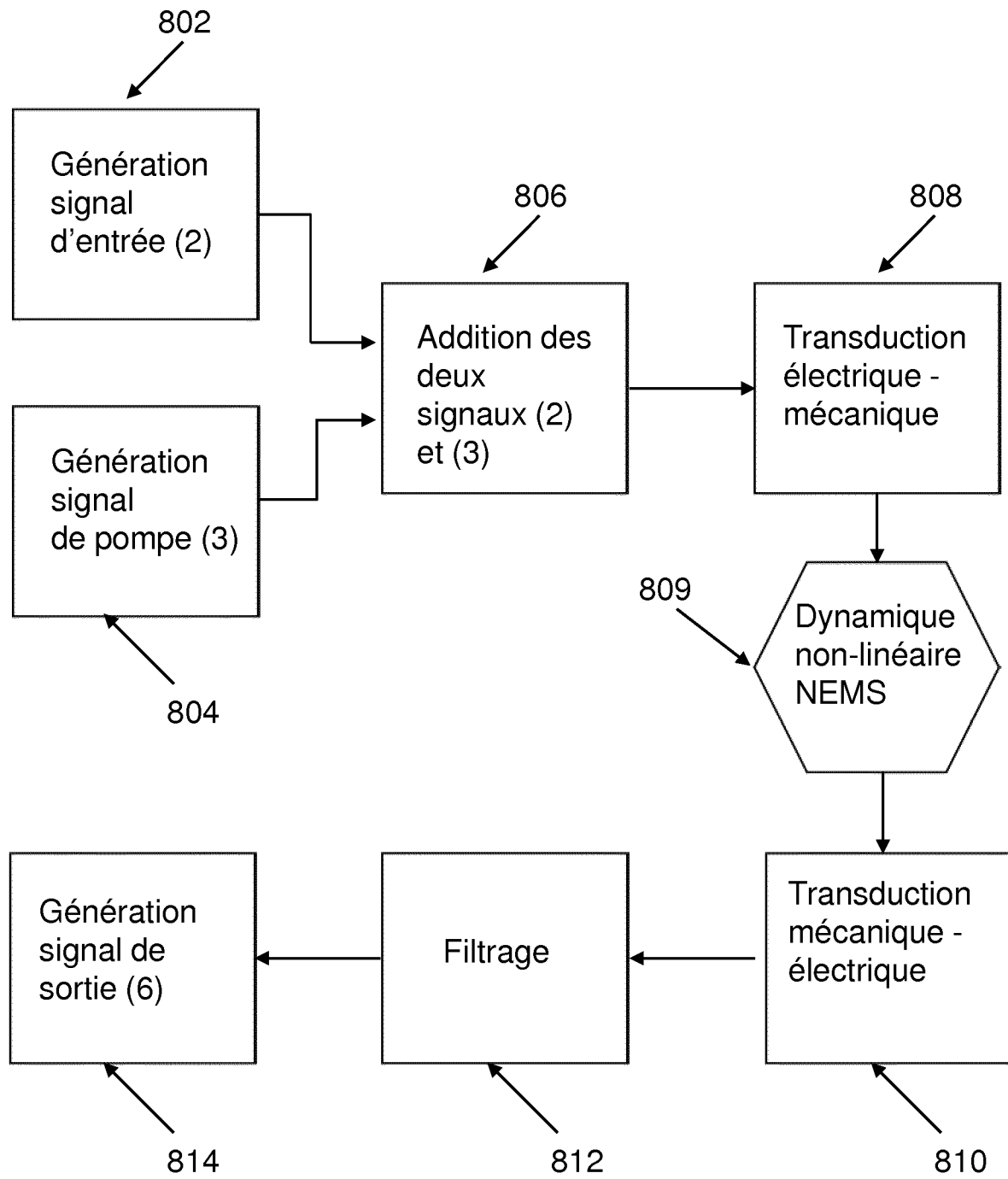


Fig. 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No PCT/EP2016/081853

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. H03H7/46 G01G3/16 G01N29/02 G01N5/02 G01N9/00
 ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 H03H G01G G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
 EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC, IBM-TDB

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	M Defoort ET AL: "Modal "self-coupling" as a sensitive probe for nanomechanical detection", 23 November 2015 (2015-11-23), XP055302662, DOI: 10.1063/1.4812718 Retrieved from the Internet: URL:https://arxiv.org/pdf/1511.07273.pdf [retrieved on 2016-09-15] figure 1 ----- -/--	1-15

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search 9 March 2017	Date of mailing of the international search report 16/03/2017
---	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Radomirescu, B-M
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/081853

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	LULLA K J ET AL: "Nonlinear modal coupling in a high-stress doubly-clamped nanomechanical resonator", NEW JOURNAL OF PHYSICS, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 14, no. 11, 28 November 2012 (2012-11-28), page 113040, XP020231699, ISSN: 1367-2630, DOI: 10.1088/1367-2630/14/11/113040 figure 1	1-15
X	----- US 2014/312980 A1 (VILLARD PATRICK [FR] ET AL) 23 October 2014 (2014-10-23) figures 3,4 paragraphs [0011] - [0013], [0034] - [0039]	1-15
A	----- M. DEFOORT ET AL: "Scaling laws for the bifurcation escape rate in a nanomechanical resonator", PHYSICAL REVIEW E (STATISTICAL, NONLINEAR, AND SOFT MATTER PHYSICS), vol. 92, no. 5, 23 November 2015 (2015-11-23), page 70, XP055302673, US ISSN: 1539-3755, DOI: 10.1103/PhysRevE.92.050903 figure 1	1-15
A	----- COLLIN E ET AL: "In-situ comprehensive calibration of a tri-port nano-electro-mechanical device", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP, MELVILLE, NY, US, vol. 83, no. 4, 1 April 2012 (2012-04-01), pages 45005-45005, XP012162246, ISSN: 0034-6748, DOI: 10.1063/1.4705992 [retrieved on 2012-04-30] figure 1	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/081853

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2014312980	A1	23-10-2014	
		EP 2793399 A1	22-10-2014
		FR 3004874 A1	24-10-2014
		US 2014312980 A1	23-10-2014

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2016/081853

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H03H7/46 G01G3/16 G01N29/02 G01N5/02 G01N9/00 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) H03H G01G G01N		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC, IBM-TDB		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	M Defoort ET AL: "Modal "self-coupling" as a sensitive probe for nanomechanical detection", 23 novembre 2015 (2015-11-23), XP055302662, DOI: 10.1063/1.4812718 Extrait de l'Internet: URL:https://arxiv.org/pdf/1511.07273.pdf [extrait le 2016-09-15] figure 1 ----- -/--	1-15
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents		<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée		"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 9 mars 2017		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 16/03/2017
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Radomirescu, B-M

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	<p>LULLA K J ET AL: "Nonlinear modal coupling in a high-stress doubly-clamped nanomechanical resonator", NEW JOURNAL OF PHYSICS, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 14, no. 11, 28 novembre 2012 (2012-11-28), page 113040, XP020231699, ISSN: 1367-2630, DOI: 10.1088/1367-2630/14/11/113040 figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
X	<p>US 2014/312980 A1 (VILLARD PATRICK [FR] ET AL) 23 octobre 2014 (2014-10-23) figures 3,4 alinéas [0011] - [0013], [0034] - [0039]</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>M. DEFOORT ET AL: "Scaling laws for the bifurcation escape rate in a nanomechanical resonator", PHYSICAL REVIEW E (STATISTICAL, NONLINEAR, AND SOFT MATTER PHYSICS), vol. 92, no. 5, 23 novembre 2015 (2015-11-23), page 70, XP055302673, US ISSN: 1539-3755, DOI: 10.1103/PhysRevE.92.050903 figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>COLLIN E ET AL: "In-situ comprehensive calibration of a tri-port nano-electro-mechanical device", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP, MELVILLE, NY, US, vol. 83, no. 4, 1 avril 2012 (2012-04-01), pages 45005-45005, XP012162246, ISSN: 0034-6748, DOI: 10.1063/1.4705992 [extrait le 2012-04-30] figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2016/081853

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2014312980 A1	23-10-2014	EP 2793399 A1	22-10-2014
		FR 3004874 A1	24-10-2014
		US 2014312980 A1	23-10-2014
