



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
04.12.2024 Bulletin 2024/49

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G04D 7/06^(2006.01) G04D 7/10^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **23176076.0**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G04D 7/06; G04D 7/10; G04B 15/08; G04B 17/066

(22) Date de dépôt: **30.05.2023**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **Jan, Yannick**
25300 Pontarlier (FR)
• **Soobbarayen, Kevin**
25560 La Rivière Drugeon (FR)

(74) Mandataire: **Novagraaf International SA**
Chemin de l'Echo 3
1213 Onex, Geneva (CH)

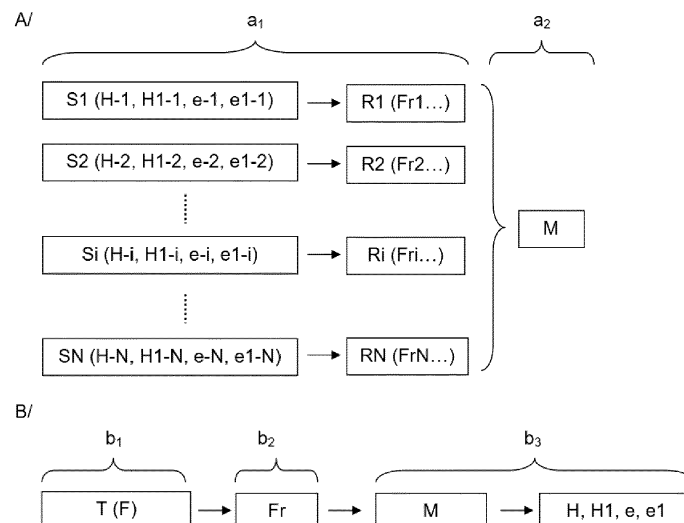
(71) Demandeur: **Richemont International S.A.**
1752 Villars-sur-Glâne (CH)

(54) **PROCEDE DE MESURE OU DE DETECTION DE DEFAUT APPLIQUE A UNE PIECE HORLOGERE**

(57) Procédé de mesure d'une dimension d'une pièce horlogère flexible, comprenant :
A/ une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire, comprenant les étapes consistant à :
-a₁ : conduire une série de simulations itératives (S1, ..., Si, ..., SN) pour une réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) de la pièce horlogère flexible,
-a₂ : construire un modèle de prédiction (M) de réponse vibratoire,

B/ une phase de contrôle de production, comprenant les étapes consistant à :
-b₁ : appliquer à une pièce horlogère flexible fabriquée une excitation vibratoire,
-b₂ : identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance,
-b₃ : soumettre au modèle de prédiction (M) la caractéristique de fréquence de résonance et donner en retour une valeur mesurée de la dimension (H, H1, e, e1).

[Fig. 8]



Description

nant :

Domaine technique de l'invention

A/ une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire, comprenant les étapes consistant à :

[0001] La présente invention concerne de manière générale les procédés de mesure de dimensions et/ou les procédés de détection de défauts appliqués à des pièces de l'industrie horlogère. En particulier, l'invention concerne de tels procédés appliqués à des pièces horlogères flexibles, comme par exemple des ressorts, en particulier des ressorts spiraux. Cependant, l'invention peut concerner dans une plus large mesure des procédés de mesure ou de détection de défauts pour des pièces qui peuvent se déformer si on leur applique une excitation vibratoire, même si leur utilisation finale ne fait pas intervenir cette propriété. Autrement dit, l'invention concerne les procédés de mesure de dimensions et/ou les procédés de détection de défauts appliqués à des pièces de l'industrie horlogère qui présentent au moins une portion flexible et/ou une portion qui peut entrer en vibration si une excitation vibratoire est imposée à ces pièces.

- a_1 : conduire une série de simulations itératives en faisant varier de manière itérative au moins une dimension d'une pièce horlogère flexible modélisée pour prédire pour chaque configuration simulée, une réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps,
- a_2 : construire un modèle de prédiction de réponse vibratoire en se basant sur la réponse vibratoire prédite de la pièce horlogère flexible modélisée pour chaque configuration simulée,

État de la technique

B/ une phase de contrôle de production, comprenant les étapes consistant à :

[0002] Il est connu dans l'art antérieur des procédés de contrôle, de pouvoir imposer une excitation vibratoire pour déterminer une raideur d'un ressort spiral horloger à l'aide d'un modèle de prédiction, comme le divulgue le document WO2022152857A1. Cependant, la méthode divulguée requiert une phase d'apprentissage qui nécessite des essais physiques qui peuvent être longs et fastidieux. En effet, afin de garantir une bonne précision ultérieure, de tels fabrications et essais préliminaires doivent être conduits avec rigueur et avec des machines ou des mesures très précises. Dans le cadre de fabrications avec plusieurs géométries de pièces (par exemple des ressorts spiraux de raideurs différentes), il faut prévoir de réitérer les essais physiques de la phase d'apprentissage pour chaque géométrie produite, ce qui constitue encore un frein à la méthode divulguée dans le document susmentionné.

- b_1 : appliquer à une pièce horlogère flexible fabriquée une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- b_2 : identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible fabriquée, telle qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée,
- b_3 : soumettre au modèle de prédiction construit pendant la phase préliminaire A/ la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 - et donner en retour une valeur mesurée de la dimension à mesurer de la pièce horlogère flexible fabriquée.

Exposé de l'invention

[0005] En résumé, le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire et une phase de contrôle avec une étape d'excitation vibratoire, pour donner en retour une mesure d'une dimension, sans faire de mesure optique ou mécanique directe sur la partie à mesurer. La valeur mesurée retournée (une dimension géométrique) est donnée par la machine de prédiction qui ne reçoit en entrée que des valeurs de fréquences de résonance, et qui n'a été entraînée ou construite qu'à partir de données de valeurs de fréquences de résonance, elles-mêmes simulées.

[0003] Un but de la présente invention est de répondre aux inconvénients de l'art antérieur mentionnés ci-dessus et en particulier, tout d'abord, de proposer un procédé de mesure ou un procédé de détection de défaut, applicable à une pièce horlogère flexible fabriquée, simple et aisé à mettre en oeuvre, en particulier un procédé de mesure ou un procédé de détection de défaut qui ne requiert pas d'essais préliminaires physiques ou de recalage avec des mesures ou des essais à effectuer sur des pièces de référence.

[0006] Plus en détail, le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une phase préliminaire de prédiction qui permet de constituer un volume de données préliminaires suffisant pour construire un modèle de prédiction. En particulier, ces données préliminaires sont générées à l'aide de simulations itératives qui ne requièrent pas de fabrications de prototypes ni de tests sur des pièces réelles et permettent de constituer un volume de données préliminaires suffisant pour ensuite

[0004] Pour cela un premier aspect de l'invention concerne un procédé de mesure d'une dimension d'une pièce horlogère flexible, le procédé de mesure compre-

construire un modèle de prédiction. En particulier, il est possible de faire varier l'épaisseur et/ou la hauteur d'une portion flexible d'une pièce horlogère selon des incréments très faibles pour bien simuler à chaque fois le comportement vibratoire. On peut envisager de faire varier l'épaisseur et/ou la hauteur d'une portion flexible d'une pièce selon des incréments de quelques millièmes, et/ou quelques centièmes, et/ou quelques dixièmes de millimètres, si bien que l'on peut simuler de multiples cas de figures pour constituer une base de données fiable et complète.

[0007] En alternative ou en complément, il est possible de faire varier une ou plusieurs caractéristiques matière d'une pièce horlogère, et/ou la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut sur une pièce horlogère.

[0008] En plus de ne pas requérir de pièces prototypes et/ou de tests physiques, cette méthode présente aussi l'avantage de réaliser des essais sur la pièce horlogère flexible seule, c'est-à-dire qu'on peut tester les pièces horlogères flexibles de manière unitaire, sans les accoupler à d'autres pièces du mécanisme horloger auquel les pièces sont destinées. On comprend que l'on peut tester les pièces horlogères flexibles dès leur fabrication unitaire, très en amont dans le processus de fabrication, et sans ajouter de variabilité qui serait due à d'autres pièces ou à des pollutions / endommagement apportés lors de manipulations ou assemblages. Autrement dit :

- les simulations de la phase préliminaire sont effectuées sur la pièce horlogère flexible modélisée seule, avec une portion de base dont les déplacements sont bloqués et avec une portion libre qui peut librement se déplacer, la pièce horlogère flexible comprenant au moins une portion flexible ou déformable agencée entre la portion de base et la portion libre, et/ou
- les essais vibratoires de la phase de contrôle sont effectués sur la pièce horlogère flexible fabriquée seule, avec une portion de base dont les déplacements sont bloqués (par exemple par un outillage) et avec une portion libre qui peut librement se déplacer, la pièce horlogère flexible fabriquée comprenant au moins une portion flexible ou déformable agencée entre la portion de base et la portion libre.

[0009] Selon un mode de réalisation, l'étape a₂ comprend une étape consistant à identifier dans la réponse vibratoire de chaque pièce horlogère flexible modélisée, au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible modélisée, telle qu'un pic de résonance.

[0010] Selon un mode de réalisation, l'étape a₂ comprend une étape consistant à construire une base de données en enregistrant dans ladite base de données, pour chaque configuration simulée, au moins une partie de la réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible modélisée, et/ou au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère

flexible modélisée, telle qu'un pic de résonance.

[0011] Selon un mode de réalisation, la pièce horlogère flexible fabriquée comprend une âme flexible recouverte par une couche de revêtement, et l'étape a₁ comprend une étape consistant à faire varier au moins une épaisseur de l'âme et/ou une épaisseur de la couche de revêtement de la pièce horlogère flexible modélisée. Cette mise en oeuvre est typiquement impossible ou très difficile à mettre en oeuvre avec des pièces réelles. Typiquement, si la pièce est en silicium, on a une âme en silicium, et une couche d'oxyde de silicium, et on peut par exemple aisément simuler une même âme avec des épaisseurs d'oxyde variables, alors que s'il fallait fabriquer ces pièces, plusieurs lots devraient être prévus, avec des délais de fabrication assez longs.

[0012] Selon un mode de réalisation, l'excitation vibratoire est appliquée à la pièce horlogère flexible fabriquée ayant une extrémité libre (par exemple typiquement la virole centrale dans le cadre d'un ressort spiral) et une autre extrémité fixée à un outillage ou à une plaquette de substrat (dans le cas d'une pièce en silicium par exemple). D'un point de vue mécanique, on peut considérer schématiquement que l'excitation vibratoire est appliquée à une masse suspendue reliée à un référentiel (une pince de préhension pour une pièce horlogère flexible fabriquée seule, ou le reste d'un substrat ou d'une plaque pour une pièce horlogère flexible fabriquée par exemple en silicium et pas détachée) par un ressort (la partie élastique du spiral). L'excitation vibratoire met en mouvement la masse suspendue.

[0013] Bien entendu, la plage fréquentielle du spectre obtenu ne dépend pas que de la source d'excitation vibratoire mais aussi du capteur de l'instrument de mesure utilisé. Ainsi, la plage fréquentielle est liée à la fois à la plage fréquentielle d'excitation et à la plage fréquentielle sur laquelle l'instrument de mesure de l'amplitude d'oscillation (vibromètre ou autre) est sensible. Cependant, la plage fréquentielle d'excitation sera choisie de sorte à inclure au moins une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible fabriquée.

[0014] Dans le procédé ci-dessus, la caractéristique d'une fréquence de résonance est une caractéristique de la réponse oscillatoire mesurée sur une plage fréquentielle prédéterminée, comprenant au moins une fréquence de résonance. Une telle caractéristique est typiquement identifiée après traitement d'un signal brut de mesure (par exemple mesure des amplitudes ou vitesses ou accélérations de déplacement de certains points de la pièce horlogère flexible fabriquée), le traitement pouvant inclure par exemple une transformée de Fourier pour identifier des pics de résonance et donc des fréquences de résonance.

[0015] Selon un mode de réalisation, à l'étape b₁, l'excitation vibratoire est appliquée simultanément à une pluralité de pièces horlogères flexibles horlogères fabriquées. La rapidité est améliorée, car on peut typiquement imposer l'excitation vibratoire à une plaquette en silicium supportant plusieurs centaines de pièces

horlogères flexibles horlogères fabriquées, qui seraient par exemple encore attachées à la plaquette.

[0016] Selon un mode de réalisation, la plage fréquentielle est prédéterminée pour englober au moins une plage de fréquences :

- centrée sur une fréquence de résonance prédéterminée, et
- d'une étendue d'au moins 30% de la fréquence de résonance prédéterminée, c'est-à-dire $\pm 15\%$ de la fréquence de résonance prédéterminée. Par exemple, si la fréquence de résonance prédéterminée est de 1 kHz, alors la plage fréquentielle ira de 850 Hz à 1150 Hz.

[0017] Selon un mode de réalisation, la pièce horlogère flexible fabriquée présente au moins deux fréquences de résonance prédéterminées, et la plage fréquentielle est prédéterminée pour couvrir au moins les deux fréquences de résonance prédéterminées. En couvrant ou balayant une large plage de fréquences, on peut mesurer plusieurs pics de résonance (ou fréquences de résonance), ce qui peut apporter une meilleure précision. En particulier, prendre en compte plusieurs pics de résonance (ou fréquences de résonance) peut permettre d'améliorer la qualité du procédé de mesure, en éliminant une potentielle variabilité due à la matière de la pièce horlogère flexible fabriquée. Également, prendre en compte plusieurs pics peut permettre d'augmenter la sensibilité de la mesure vis-à-vis des grandeurs recherchées (raideur ou dimension). En résumé, plus on va mesurer de pics, plus la machine de prédiction sera précise.

[0018] Selon un mode de réalisation, l'étape b_1 comprend l'utilisation d'une source, telle qu'une source piézo-électrique, permettant d'induire ou imposer une excitation acoustique sur une tranche d'une plaquette supportant la pièce horlogère flexible fabriquée ou son ébauche, ou de manière préférée sur, ou encore sous la pièce horlogère flexible fabriquée à exciter spécifiquement.

[0019] Selon un mode de réalisation, la source acoustique peut être accouplée à un cône d'excitation choisi pour exciter au moins une pièce horlogère flexible fabriquée. Préférentiellement, si une plaquette supporte plusieurs pièces horlogères flexibles horlogères fabriquées, alors la source acoustique peut être accouplée à un cône d'excitation choisi pour exciter au moins une partie et de préférence la totalité des pièces horlogères flexibles horlogères fabriquées.

[0020] Selon un mode de réalisation, la source acoustique peut être choisie et/ou réglée pour générer l'excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir la plage fréquentielle prédéterminée :

- avec une amplitude suffisante pour générer des vibrations de la pièce horlogère flexible fabriquée d'amplitude suffisante pour être détectées par le

moyen de mesure d'amplitude ou de vitesse ou d'accélération de déplacement d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée et/ou

- pendant une durée suffisante pour en déduire des spectres vibratoires de la pièce horlogère flexible fabriquée.

[0021] Selon un mode de réalisation, l'étape b_2 comprend l'utilisation d'un moyen de mesure optique, tel qu'un vibromètre laser par effet Doppler.

[0022] Selon un mode de réalisation, l'étape b_2 est basée sur une mesure au cours du temps d'une amplitude ou d'une vitesse, ou encore d'une accélération de déplacement d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée, effectuée de préférence au moins partiellement pendant l'étape b_1 .

[0023] Selon un mode de réalisation, l'étape b_2 comprend :

- une étape d'identification d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible fabriquée en fonction d'une déformée opérationnelle ou modale d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée. Une déformée opérationnelle ou modale est typiquement définie par une amplitude ou vitesse de déplacement ou encore d'une accélération et une direction d'oscillation (hors ou dans un plan particulier) en fonction de la fréquence d'excitation. Bien entendu, on peut prendre en compte des accélérations et/ou des amplitudes, et/ou des vitesses, et/ou des directions d'oscillations dans plusieurs plans particuliers, pour tenir compte de possibles couplages.

[0024] Selon un mode de réalisation, la pièce horlogère flexible fabriquée est contenue dans un plan de base, et l'étape b_2 comprend :

- une étape b_2' de mesure d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée selon une direction normale au plan de base, et/ou
- une étape b_2'' de mesure d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée selon une direction contenue dans le plan de base.

[0025] Les mesures de déplacements ou de vitesses selon plusieurs directions permettent de mieux identifier les pics et fréquences de résonance.

[0026] Selon un mode de réalisation :

- pour une première fréquence de résonance prédéterminée, seule l'étape b_2' de mesure d'un déplacement ou d'une vitesse d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée selon une direction nor-

male au plan de base est effectuée,
et/ou

- pour une deuxième fréquence de résonance prédéterminée, seule l'étape b_2 de mesure d'un déplacement ou d'une vitesse d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée selon une direction contenue dans le plan de base est effectuée.

[0027] Selon la fréquence de résonance, on peut choisir de mesurer dans une direction et/ou dans une autre, pour mesurer les plus grands déplacements ou vitesses possibles, de sorte à minimiser l'erreur de mesure, et/ou de sorte à capter les fréquences les plus sensibles aux grandeurs recherchées (raideur, dimensions). En effet, en fonction de la géométrie de la pièce horlogère flexible fabriquée, le mode de vibration (typiquement la direction de vibration) en réponse à l'excitation vibratoire peut varier.

[0028] Selon un mode de réalisation, l'étape b_2 comprend une étape de traitement du signal de mesure avec par exemple une transformée de Fourier, pour identifier des pics de résonance d'amplitude de déplacement ou de vitesse ou d'accélération, et/ou de phase, en fonction de la fréquence d'excitation.

[0029] Selon un mode de réalisation, l'étape b_2 comprend :

- une étape d'identification d'un pic de résonance de la pièce horlogère flexible fabriquée en fonction d'une amplitude ou d'une vitesse de déplacement d'au moins un point de la pièce horlogère flexible fabriquée.

[0030] Selon un mode de réalisation, la fréquence de résonance est identifiée sur la base de la largeur du pic de résonance ou d'amplitude, à mi-hauteur de la valeur maximale du pic de résonance d'amplitude. Cette méthode de traitement permet de limiter les erreurs de calcul qui pourraient être effectuées en se basant uniquement sur l'identification de la position fréquentielle du pic défini par sa valeur maximale.

[0031] Selon un mode de réalisation, l'étape b_3 comprend les étapes consistant à :

- choisir une configuration simulée à l'étape a_1 avec une réponse vibratoire simulée ayant une caractéristique de fréquence de résonance la plus proche possible de la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 ,
- effectuer une opération de recalage de la simulation en partant de la configuration simulée choisie et en modifiant au moins une dimension de la pièce horlogère flexible modélisée pour obtenir une réponse vibratoire simulée ayant la même caractéristique de fréquence de résonance que la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 ,
- donner en retour la valeur modifiée de la dimension de la pièce horlogère flexible modélisée en tant que

valeur mesurée.

[0032] Selon un mode de réalisation, l'étape b_3 comprend les étapes consistant à :

- choisir deux configurations simulées à l'étape a_1 avec deux réponses vibratoires simulées ayant chacune une caractéristique de fréquence de résonance la plus proche possible de la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 et de sorte à encadrer la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 ,
- effectuer une opération de pondération en partant des deux configurations simulées choisies pour trouver une dimension pondérée de la pièce horlogère flexible modélisée,
- donner en retour la valeur pondérée de la dimension de la pièce horlogère flexible modélisée en tant que valeur mesurée.

[0033] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction met en oeuvre à l'étape b_3 une classification effectuée par exemple par un réseau de neurones pour donner en retour la valeur mesurée.

[0034] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction met en oeuvre à l'étape b_3 une classification basée sur un partitionnement en k-moyennes ou en k-médianes pour donner en retour la valeur mesurée.

[0035] Selon un mode de réalisation, l'étape b_1 est précédée par une étape de bridage de la pièce horlogère flexible fabriquée dans un outillage de mise en référence, l'outillage de mise en référence étant prévu pour laisser libre au moins une portion flexible, et de préférence une portion flexible reliée à une portion à mettre en vibration, de la pièce horlogère flexible fabriquée. On peut prévoir une étape d'exposition de la pièce horlogère flexible fabriquée à une source d'ondes sonores, comme des ondes ultra son par exemple.

[0036] Selon un mode de réalisation, l'étape b_1 est précédée par une étape de mise en regard d'une source sonore et/ou d'un capteur de mesure de position ou de déplacement avec la portion flexible et/ou la portion à mettre en vibration, de préférence avec l'outillage de mise en référence.

[0037] Un deuxième aspect de l'invention peut concerner un procédé de détection d'un défaut d'une pièce horlogère flexible, le procédé de détection comprenant :

X/ une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire, comprenant les étapes consistant à :

- x_1 : conduire au moins une simulation sur une pièce horlogère flexible de référence modélisée, exempte de défaut, pour prédire une réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible de référence modélisée, à une excitation vibratoire variable au cours du temps,

- x_2 : conduire une série de simulations itératives en faisant varier de manière itérative la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut sur une pièce horlogère flexible défaillante modélisée, pour prédire pour chaque configuration simulée une réponse vibratoire de la pièce défaillante modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps,
- x_s : construire un modèle de prédiction de réponse vibratoire en se basant sur la réponse vibratoire prédite pour la pièce horlogère flexible de référence modélisée et/ou sur la réponse vibratoire prédite pour chaque configuration de pièce horlogère flexible défaillante modélisée,

Y/ une phase de contrôle de production, comprenant les étapes consistant à :

- y_1 : appliquer à une pièce horlogère flexible fabriquée une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- y_2 : identifier au moins une caractéristique distinctive d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible fabriquée, telle qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée,
- y_3 : soumettre au modèle de prédiction construit pendant la phase préliminaire X/ la caractéristique distinctive de fréquence de résonance identifiée à l'étape y_2 - et donner en retour une indication sur la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut de la pièce horlogère flexible fabriquée.

[0038] En résumé, le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire et une phase de contrôle avec une étape d'excitation vibratoire, pour donner en retour si la pièce horlogère flexible fabriquée présente un défaut de fabrication, sans faire de mesure physique (optique ou mécanique ou encore par radiographie) directe sur la partie à mesurer. La présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut retournée est donnée par la machine de prédiction qui ne reçoit en entrée que des valeurs de fréquences de résonance, et qui n'a été entraînée ou construite qu'à partir de données de valeurs de fréquences de résonance, simulées.

[0039] Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une phase préliminaire de prédiction qui permet de constituer un volume de données préliminaires suffisant pour construire un modèle de prédiction. En particulier, ces données préliminaires sont générées à l'aide de simulations itératives qui ne requièrent pas de fabrications de prototypes ni de tests sur des pièces réelles et permettent de constituer un volume de données

préliminaires suffisant pour ensuite construire un modèle de prédiction. En particulier, il est possible de faire varier la nature d'un défaut et/ou sa position dans une pièce selon des incréments très faibles pour bien simuler à chaque fois le comportement vibratoire.

[0040] En plus de ne pas requérir de pièces prototypes et/ou de tests physiques, cette méthode présente aussi l'avantage de réaliser des essais sur la pièce horlogère flexible seule, c'est-à-dire qu'on peut tester les pièces horlogères flexibles de manière unitaire, sans les accoupler à d'autres pièces du mécanisme horloger auquel les pièces sont destinées. On comprend que l'on peut tester les pièces horlogères flexibles dès leur fabrication unitaire, très en amont dans le processus de fabrication, et sans ajouter de variabilité qui serait due à d'autres pièces ou à des pollutions / endommagement apportés lors de manipulations ou assemblages. Autrement dit :

- les simulations de la phase préliminaire sont effectuées sur la pièce horlogère flexible modélisée seule, avec une portion de base dont les déplacements sont bloqués et avec une portion libre qui peut librement se déplacer, la pièce horlogère flexible comprenant au moins une portion flexible ou déformable agencée entre la portion de base et la portion libre, et/ou
- les essais vibratoires de la phase de contrôle sont effectués sur la pièce horlogère flexible fabriquée seule, avec une portion de base dont les déplacements sont bloqués (par exemple par un outillage) et avec une portion libre qui peut librement se déplacer, la pièce horlogère flexible fabriquée comprenant au moins une portion flexible ou déformable agencée entre la portion de base et la portion libre.

[0041] Selon un mode de réalisation, l'étape x_3 comprend une étape consistant à identifier dans la réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible de référence modélisée, et/ou dans la réponse vibratoire de chaque pièce horlogère flexible défaillante modélisée au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible modélisée, telle qu'un pic de résonance.

[0042] Selon un mode de réalisation, l'étape x_3 comprend une étape consistant à construire une base de données en enregistrant dans ladite base de données, pour chaque configuration simulée, au moins une partie de la réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible de référence modélisée, et/ou au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible de référence modélisée, telle qu'un pic de résonance, et/ou au moins une partie de la réponse vibratoire de chaque pièce horlogère flexible défaillante modélisée, et/ou au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible défaillante modélisée, et/ou au moins une différence entre la réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible de référence modélisée et la réponse vibra-

toire de chaque pièce horlogère flexible défaillante modélisée.

[0043] Selon un mode de réalisation, le défaut est :

- un défaut de collage ou de pontage entre deux portions flexibles de la pièce horlogère flexible,
- une porosité, locale ou non, de la matière de la pièce horlogère flexible, et/ou de la matière d'une couche de revêtement de la pièce horlogère flexible,
- un défaut de régularité d'une épaisseur d'une couche de revêtement de la pièce horlogère flexible,
- un défaut ou manque local de matière, comme par exemple un défaut d'infiltration pour une pièce en silicium,
- un surplus de matière, lié par exemple à un défaut de masquage pour une pièce en silicium,
- une hétérogénéité de la matière,
- un défaut géométrique de la pièce horlogère flexible, comme un défaut de planéité (lissage) des tranches latérales d'un barreau de silicium formant un spiral,
- un défaut géométrique de la pièce horlogère flexible, comme un défaut de verticalité des tranches latérales d'un barreau de silicium formant un spiral (une dépouille ou une contre dépouille des faces),
- une portion flexible de la pièce horlogère flexible déformée, ondulée ou décentrée par rapport à une position théorique.

[0044] Selon un mode de réalisation, l'étape y_1 est précédée par une étape de bridage de la pièce horlogère flexible fabriquée dans un outillage de mise en référence, l'outillage de mise en référence étant prévu pour laisser libre au moins une portion flexible, et de préférence une portion flexible reliée à une portion à mettre en vibration, de la pièce horlogère flexible fabriquée.

[0045] Selon un mode de réalisation, l'étape y_1 est précédée par une étape de mise en regard d'une source sonore et/ou d'un capteur de mesure de position ou de déplacement avec la portion flexible et/ou la portion à mettre en vibration, de préférence avec l'outillage de mise en référence.

[0046] Selon un mode de réalisation, la phase préliminaire et/ou la phase de contrôle de production :

- est exempte,
 - de toute étape de recalage du modèle de prédiction et/ou,
 - de toute étape de mesure physique d'une dimension de la pièce horlogère fabriquée,
 et/ou
- consiste à soumettre uniquement une ou plusieurs caractéristiques de fréquence de résonance au modèle de prédiction.

[0047] Selon un mode de réalisation, l'étape b_2 ou

respectivement y_2 comprend l'identification d'au moins une caractéristique de deux fréquences de résonance distinctes, pour soumettre à l'étape b_3 ou respectivement y_3 les deux caractéristiques des deux fréquences de résonance distinctes, de sorte à éliminer une variabilité potentielle de la matière, ou pour permettre d'augmenter une sensibilité de la mesure vis-à-vis des grandeurs recherchées (raideur ou dimension).

[0048] Selon un mode de réalisation, l'étape b_3 ou respectivement y_3 comprend une étape consistant à soumettre à la machine de prédiction une valeur de module d'élasticité de la matière de la pièce horlogère flexible, et/ou une matière de la pièce horlogère flexible, et/ou une forme d'une partie déformable de la pièce horlogère flexible, et/ou un paramètre de fabrication mesuré au cours de la fabrication de la pièce horlogère flexible, comme un temps de mise en étuve d'oxydation.

[0049] Selon un mode de réalisation, la phase de contrôle de production comprend une étape consistant à caractériser un paramètre physique de la matière de la pièce horlogère flexible sur une éprouvette fabriquée simultanément à la pièce horlogère flexible.

[0050] Un troisième aspect de l'invention peut concerner un procédé de fabrication d'une pièce horlogère flexible comprenant :

- la fourniture d'une pièce horlogère flexible fabriquée,
- la procédé de mesure selon le premier aspect, et/ou le procédé de détection selon le deuxième aspect.

[0051] Selon un mode de réalisation, l'étape de fourniture de la pièce horlogère flexible fabriquée comprend :

- une étape consistant à fournir une pièce horlogère flexible en silicium, de préférence recouverte d'une couche d'oxyde de silicium, ou
- une étape consistant à fournir une pièce horlogère flexible métallique électrodéposée, de préférence en nickel ou en alliage de nickel-phosphore, ou
- une étape consistant à fournir une pièce horlogère flexible métallique formée par déformation plastique permanente.

[0052] D'une manière générale, on considère dans la présente demande un procédé pour mesurer une dimension et/ou une caractéristique matière et/ou détecter la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut sur une pièce horlogère. La pièce horlogère est une pièce que l'on peut considérer flexible. D'une manière générale, la pièce horlogère peut comprendre au moins une portion fine, et/ou allongée, et/ou élancée, et/ou flexible par rapport à au moins une autre portion pouvant être adjacente, et/ou plus massive, et/ou moins allongée, et/ou moins fine, et/ou moins élancée, et/ou moins flexible. A tout le moins, la pièce horlogère considérée peut comprendre au moins une portion qui peut être mise en vibration et/ou en oscillation par rapport à une autre partie fixe ou bloquée dans un outillage de bridage. Typique-

ment, toute pièce élastique, comme un ressort, est bien adaptée au procédé selon l'invention. Cependant, on peut envisager de manière non-limitative, de mettre en oeuvre l'invention avec :

- des roues qui auraient une jante ou une couronne reliée à un moyeu par des bras,
- des cliquets, des leviers, des bras qui ont tous par essence une portion allongée qui forme une sorte de poutre qui pourrait être encastrée d'un côté et mise en vibration de l'autre,
- des pièces avec une partie en porte-à-faux,
- des axes ou arbres, s'ils sont assez longs et/ou s'ils présentent un élancement suffisant pour pouvoir être encastrés d'un côté et mis en vibration de l'autre...

Description des figures

[0053] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description détaillée qui suit d'un mode de réalisation de l'invention donné à titre d'exemple nullement limitatif et illustré par les dessins annexés, dans lesquels :

[fig. 1] représente un premier exemple de pièce horlogère flexible pouvant faire l'objet de mesures selon le procédé de mesure selon l'invention ou l'objet d'une recherche de défauts selon le procédé de détection selon l'invention ;

[fig. 2] représente un deuxième exemple de pièce horlogère flexible pouvant faire l'objet de mesures selon le procédé de mesure selon l'invention ou l'objet d'une recherche de défauts selon le procédé de détection selon l'invention ;

[fig. 3] représente une coupe transversale selon la ligne III-III de la figure 1 ou de la figure 2 pour montrer un exemple de structure interne du premier exemple de pièce horlogère flexible ou du deuxième exemple de pièce horlogère flexible ;

[fig. 4] représente schématiquement un appareil et une méthode d'excitation vibratoire de plusieurs pièces horlogères flexibles horlogères fabriquées à partir d'un même substrat, pour identifier des caractéristiques de fréquences de résonance ;

[fig. 5] représente un exemple d'excitation vibratoire au cours du temps imposée par l'appareil de la figure 4 ;

[fig. 6] représente un exemple de mesure des amplitudes de déplacement d'un point d'une pièce horlogère flexible, en réponse à la plage fréquentielle imposée de la figure 5 ;

[fig. 7] représente en détail un pic de résonance identifié à une fréquence particulière sur la figure 6 ;

[fig. 8] représente un diagramme des étapes effectuées pour mettre en oeuvre le procédé de mesure selon l'invention ou le procédé de détection selon l'invention.

Description détaillée de mode(s) de réalisation

[0054] La figure 1 représente une première pièce horlogère flexible 10 pouvant faire l'objet de mesures selon le procédé de mesure selon l'invention ou l'objet d'une recherche de défauts selon le procédé de détection selon l'invention. Dans ce premier exemple, la première pièce horlogère flexible 10 est une ancre suisse d'un système d'échappement pour une pièce d'horlogerie, comprenant notamment une fourchette 11, une baguette 12 et une ancre 13. La figure 1 montre l'ancre suisse sans ses palettes ni le dard, telle qu'elle serait fabriquée par exemple à partir d'une plaquette en silicium, en utilisant un procédé de gravure ionique réactive profonde (Deep Reactive-Ion Etching en langue anglaise). Bien entendu, on peut prévoir d'autres matières et d'autres procédés de fabrication.

[0055] La figure 2 représente une deuxième pièce horlogère flexible 20 pouvant faire l'objet de mesure selon le procédé de mesure selon l'invention ou l'objet d'une recherche de défauts selon le procédé de détection selon l'invention. Dans ce deuxième exemple, la deuxième pièce horlogère flexible 20 est un ressort spiral d'un système oscillant pour une pièce d'horlogerie, comprenant notamment une extrémité de pitonnage 21, un barreau 22 et une virole 23. La figure 2 montre un ressort spiral horloger fabriqué par exemple à partir d'une plaquette en silicium, en utilisant un procédé de gravure ionique réactive profonde (Deep Reactive-Ion Etching en langue anglaise). Bien entendu, on peut prévoir d'autres matières et d'autres procédés de fabrication.

[0056] La figure 3 représente une coupe transversale selon la ligne III-III de la figure 1 ou de la figure 2 pour montrer, un exemple de structure interne de la première pièce horlogère flexible 10 ou de la deuxième pièce horlogère flexible 20, dans le cas où elles seraient réalisées en silicium. La coupe transversale montre une section rectangulaire, avec un coeur (ici en silicium) de hauteur H1 et de largeur e1, recouvert par une couche externe (ici de l'oxyde de silicium) de dimensions externes H et e. bien entendu, on peut prévoir d'autres matière, comme par exemple un coeur en métal, pouvant être optionnellement recouvert par une couche de surface comme un plaquage en métal ou encore synthétique ou une couche de surface autrement réalisée par tout autre traitement de surface.

[0057] On peut noter que la première pièce horlogère flexible 10 ou la deuxième pièce horlogère flexible 20 présentent chacune une portion pouvant être considérée

comme une portion flexible (la baguette 12 de la première pièce horlogère flexible 10 ou le barreau 22 de la deuxième pièce horlogère flexible 20) reliant deux autres portions de la pièce considérée (l'ancre 13 et la fourchette 11 de la première pièce horlogère flexible 10 ou la virole 23 et l'extrémité de pitonnage 21 de la deuxième pièce horlogère flexible 20). En conséquence, on peut imposer une excitation vibratoire à l'une de ces deux autres portions qui est laissée libre, si l'autre de ces deux autres portions est encastrée (par exemple montée sur un touillage de bridage ou encore reliée à un substrat lors de la fabrication). La portion flexible agencée entre la portion laissée libre et la portion encastrée agit comme un ressort et devient un paramètre influent sur la manière dont la portion libre va se déplacer en réponse à l'excitation vibratoire.

[0058] Par exemple, la figure 4 représente de manière schématique une plaquette de silicium 25 sur laquelle sont formées une pluralité de deuxième pièces horlogères flexibles horlogères 20. Une source d'excitation vibratoire 200 est accouplée à la plaquette 25, de sorte à pouvoir imposer une excitation vibratoire. En conséquence, chaque deuxième pièce horlogère flexible 20 va entrer en vibration, et un vibromètre laser 100, ici focalisé sur un point de la deuxième pièce horlogère flexible 20 de droite va pouvoir mesurer au cours du temps les amplitudes de vibration du point de mesure. On peut prévoir de mesurer les déplacements selon une direction normale au plan de la plaquette 25, mais on peut tout aussi bien mesurer les déplacements selon une ou plusieurs directions contenues dans le plan de la plaquette 25.

[0059] Une fois un point particulier étudié, on peut imposer un déplacement relatif entre le vibromètre laser 100 et la plaquette silicium 24, pour passer sur un autre point de mesure de la deuxième pièce horlogère flexible 20, ou passer à une autre deuxième pièce horlogère flexible 20 de la plaquette 25. Selon une méthode préférée, on peut déplacer la deuxième pièce horlogère flexible 20 par rapport au vibromètre laser 100 qui reste fixe.

[0060] On peut aussi envisager d'utiliser une source sonore ou ultra sonore en dessous de la paquette 25 pour exciter en vibration une deuxième pièce horlogère flexible 20 particulière de la plaquette 25. On peut utiliser un cône de diffusion des ondes sonores ou ultra sonores pour imposer une excitation vibratoire efficacement.

[0061] La figure 5 représente un exemple d'excitation vibratoire au cours du temps. Dans l'exemple donné, la fréquence d'excitation peut varier au cours du temps, entre 0 Hz et 50 kHz, et on peut imposer une succession de fronts montants, chacun espacé d'une période de repos sans excitation. Pour chaque point de mesure sur une deuxième pièce horlogère flexible 20, on peut imposer une pluralité de front montants (entre 2 fronts montants et 60 fronts montants), chacun durant entre 0.5 s et 2 s par exemple.

[0062] On peut considérer plusieurs scénarios en fonc-

tion du domaine choisi préalablement pour l'excitation :

a. Mesures dans le domaine fréquentiel

1- variante avec excitation entretenue :

- i. Intégrer temporellement l'amplitude et la phase d'oscillation suffisamment longtemps pour avoir une bonne résolution spectrale à la fréquence d'excitation f_0 ,
- ii. Décaler la fréquence d'oscillation de Δf pour exciter à la fréquence $f_0 + \Delta f$ et répéter l'étape i d'intégration,
- iii. Reconstruire les spectres d'amplitude et de phase d'oscillation en fonction de la fréquence d'excitation (possiblement avec plusieurs pics à plusieurs fréquences).

2- variante avec excitation dont la fréquence varie au cours du temps :

- i. Enregistrer temporellement l'amplitude et la phase d'oscillation au cours du balayage fréquentiel de la plage fréquentielle,
- ii. Répéter l'étape i- au moins une fois, de préférence au moins trois fois,
- iii. Reconstruire les spectres d'amplitude et de phase d'oscillation en fonction de la fréquence d'excitation (possiblement avec plusieurs pics à plusieurs fréquences).

b. Mesures dans le domaine temporel :

- i. Enregistrer le déplacement temporel du point de mesure selon X, Y et Z sur une durée suffisamment longue de manière à obtenir un signal suffisamment représentatif, comme par exemple quelques secondes.
- ii. On peut choisir d'enregistrer le signal pour en faire un signal de référence à comparer avec d'autres signaux mesurés sur d'autres pièces. On peut aussi choisir de faire un traitement du signal de type transformée de Fourier pour identifier des fréquences de résonance dans le signal enregistré.

[0063] En conséquence, on peut identifier au moins un pic de résonance pour chaque pièce horlogère flexible excitée, et il est proposé de déterminer la fréquence de résonance non pas sur la base du sommet du pic de résonance, c'est-à-dire sur l'amplitude maximum, mais plutôt sur une zone de la courbe située entre 25% et 75% de la valeur d'amplitude maximale du pic de résonance, par exemple à partir de sa largeur à mi-hauteur. En effet, cette méthode de traitement qui se focalise sur une partie de la courbe entre 25% et 75% de la valeur d'amplitude maximale du pic de résonance permet de limiter les erreurs dues à la singularité du point d'amplitude maxi-

mum et aux calculs d'approximation pour reconstruire la partie sommitale du pic de résonance. La zone de la courbe située entre 25% et 75% de la valeur d'amplitude maximale du pic de résonance présente une meilleure précision que la partie supérieure à 75% (typiquement le pic), ce qui offre une meilleure précision sur la fréquence exacte de résonance déterminée. On peut prendre par exemple le milieu du segment reliant les deux points à mi-hauteur du pic de résonance pour déterminer la fréquence de résonance associée au pic en question.

[0064] La figure 6 représente un exemple de spectre vibratoire pour un point d'une deuxième pièce horlogère flexible 20 de la figure 4, reconstruit à partir des mesures d'amplitude de déplacement du point de mesure considéré en réponse à l'excitation vibratoire de la figure 5, entre 10 kHz et 15 kHz. On peut noter la présence de trois pics d'amplitude, à environ 11 kHz, 12.3 kHz, et 13.7 kHz. Bien que cela ne soit pas représenté, on peut typiquement identifier entre 10 et 30 pics d'amplitude si l'excitation vibratoire balaye une plage de fréquence comprise entre 0 Hz et 50 kHz. Chaque pic d'amplitude possède une fréquence de résonance, et les amplitudes maximales varient fortement.

[0065] La figure 7 représente en détail le traitement que l'on peut faire sur un pic d'amplitude pour une deuxième pièce horlogère flexible 20, celui à 11 kHz par exemple. Le but est de trouver la fréquence de résonance et de lui donner une valeur aussi précise que possible. Au lieu de baser ce traitement sur la valeur maximale du pic, la demanderesse s'est aperçue qu'une meilleure précision pouvait être atteinte en déterminant la longueur du segment reliant la partie montante et la partie descendante de la courbe, à mi-hauteur du pic. La fréquence de résonance étant typiquement la valeur au milieu de ce segment. Cependant, on peut effectuer une interpolation sur des points au voisinage du pic de résonance pour améliorer la précision, et décaler le point choisi sur le segment, qui ne sera pas le milieu, en particulier si la position réelle du pic de résonance est décalée par exemple en raison de la fréquence d'échantillonnage choisie.

[0066] La figure 8 représente un diagramme des étapes effectuées pour mettre en oeuvre le procédé de mesure selon l'invention ou le procédé de détection selon l'invention. En partant du principe qu'il est possible d'imposer une excitation vibratoire à une pièce horlogère flexible et que la réponse vibratoire (notamment les fréquences de résonance) est conditionnée par la portion flexible, et en particulier par ses dimensions et/ou sa matière et/ou la présence de défauts sur cette portion flexible, il est proposé de construire un modèle de prédiction de réponse vibratoire et d'utiliser ce modèle pour mesurer une dimension d'une pièce horlogère flexible fabriquée, ou de détecter si un défaut affecte la pièce horlogère flexible fabriquée, à partir de mesures vibratoires effectuées sur cette pièce horlogère flexible fabriquée.

[0067] La demanderesse s'est également aperçue

qu'il était possible de construire le modèle de prédiction de réponse vibratoire en effectuant des simulations numériques. En particulier et en référence à la figure 8, une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire A/ peut être conduite en effectuant à une étape a₁ des simulations numériques S₁, S₂, ..., S_i, ... S_N qui visent à prédire une réponse vibratoire R₁, R₂, ..., R_i, ..., R_N de la pièce horlogère flexible modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps. Au sein de la réponse vibratoire R₁, R₂, ..., R_i, ..., R_N de la pièce horlogère flexible modélisée, on peut identifier des caractéristiques de fréquences de résonance, comme par exemple des valeurs de fréquence de résonance, ou des pics de résonance.

[0068] Pour constituer une base de données représentative d'une production de pièces horlogères flexibles horlogères, on peut aisément prévoir de conduire plusieurs simulations numériques itératives en faisant varier à chaque fois au moins une dimension ou un paramètre du modèle numérique de la pièce horlogère flexible. On peut par exemple faire varier des dimensions, en particulier des dimensions de la portion flexible, pour prédire à chaque fois quelle est la réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps, et identifier des valeurs de fréquence de résonance particulières, ou des pics de résonance particuliers. Dans le cas de pièces horlogères flexibles ayant une âme revêtue avec une couche externe (une pièce silicium avec une couche d'oxyde par exemple) ou comprenant une structure interne composite, on peut prévoir de faire varier les dimensions de chaque couche, ou de l'âme, ou de la couche de revêtement, pour bien identifier la contribution de chaque élément dans la réponse vibratoire.

[0069] On peut aussi prévoir de faire varier des caractéristiques matière, en particulier des valeurs de module d'élasticité de la matière de la pièce horlogère flexible, et/ou une matière de la pièce horlogère flexible pour prédire à chaque fois quelle est la réponse vibratoire de la pièce horlogère flexible modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps, et identifier des valeurs de fréquence de résonance particulières, ou des pics de résonance particuliers.

[0070] On peut aussi conduire une série de simulations numériques en faisant varier de manière itérative la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut sur une pièce horlogère flexible défectueuse modélisée pour prédire pour chaque configuration simulée une réponse vibratoire de la pièce défectueuse modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps.

[0071] On peut aussi conduire des simulations en combinant une variation d'au moins une dimension, avec une variation d'une caractéristique matière, et/ou avec la présence d'un défaut.

[0072] A ce stade, on peut prévoir une étape qui consiste à comparer les réponses vibratoires obtenues :

- en faisant varier une dimension seulement, ou

- en faisant varier une caractéristique matière seulement, ou
- en faisant varier seulement la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut, ou
- en faisant varier une dimension et une caractéristique matière simultanément, ou
- en faisant varier simultanément une dimension et la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut, ou
- en faisant varier simultanément une caractéristique matière et la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut, ou
- en faisant varier simultanément une dimension et une caractéristique matière et la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut.

[0073] Cela permet d'identifier l'influence des paramètres d'entrée (dimension, caractéristique matière, défaut) sur les valeurs de fréquence de résonance, ou sur les pics de résonance, et de choisir quelles valeurs de fréquence de résonance, ou quels pics de résonance considérer pour donner en retour une dimension ou une caractéristique matière ou une présence/absence de défaut. En d'autres termes, on peut prévoir d'identifier les valeurs de fréquence de résonance, ou sur les pics de résonance particuliers qui sont sensibles (ou pas) si une dimension varie, une caractéristique matière varie, un défaut apparaît, et ces valeurs de fréquence de résonance particulières, ou ces pics de résonance particuliers pourront alors être considérés comme de bons paramètres à prendre en compte ou pas en fonction du résultat demandé. Par exemple, pour prédire une dimension, on pourra prendre en compte les valeurs de fréquence de résonance, ou sur les pics de résonance particuliers qui ne sont sensibles qu'à une variation de dimension, et pas à une variation de caractéristique matière ou à une présence/absence de défaut. De manière avantageuse, on pourra choisir de prendre en compte une pluralité de valeurs de fréquence de résonance, ou de pics de résonance particuliers pour donner en retour une information demandée fiable, qui sera indépendante des variations potentielles des autres paramètres pouvant potentiellement influencer sur la réponse vibratoire.

[0074] Une fois l'étape a_1 effectuée et en référence à la figure 8, on peut utiliser les réponses vibratoires simulées pour, lors d'une étape a_2 , construire un modèle de prédiction de réponse vibratoire M. Typiquement, le modèle de prédiction de réponse vibratoire M :

- peut se baser sur un modèle mathématique (par exemple une loi polynomiale) reliant une ou plusieurs fréquences de résonance à des paramètres intrinsèques comme les dimensions, les caractéristiques matière, la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut,
- peut utiliser un réseau de neurones pour recevoir en entrée des valeurs ou des graphes tirés des spectres

de mesures vibratoires pour donner en sortie les dimensions, les caractéristiques matière, la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut,

- peut mettre en oeuvre un système utilisant de l'intelligence artificielle qui utilise en entrée les simulations $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_N$ et/ou les réponses vibratoires $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_N$ simulées pour donner en sortie les dimensions, les caractéristiques matière, la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut.

[0075] Selon un mode de réalisation, le modèle de prédiction peut mettre en oeuvre une classification effectuée par exemple par un réseau de neurones pour prédire des dimensions, des caractéristiques matière, la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut de la pièce horlogère flexible.

[0076] Au terme de cette phase préliminaire A/, en ayant effectué les simulation itératives à l'étape a_1 et la construction du modèle de prédiction à l'étape a_2 , on peut noter les points suivants :

- aucun essai physique n'a été nécessaire, les simulations numériques donnant une réponse vibratoire fiable,
- des configurations impossibles à réaliser physiquement ont pu être simulées, en particulier des configurations avec des défauts comme des porosités, des brèches, des collages entre parties adjacentes...,
- les configurations simulées ont pu être choisies en faisant varier des dimensions avec des incréments choisis et non pas imposés par des contraintes de fabrication, par exemple on peut prévoir de faire varier des dimensions par incréments de 1 micromètre pour des pièces de faible taille, comme un ressort spiral d'oscillateur d'horlogerie.

[0077] Il ressort que les données utilisées pour construire le modèle de prédiction sont très nombreuses et ont pu être simulées sur des configurations pertinentes en fonction du retour d'expérience de production.

[0078] On peut noter qu'aucune mesure dimensionnelle physique n'est nécessaire à ce stade.

[0079] Une fois le modèle de prédiction construit et en référence à la figure 8, le procédé selon l'invention peut comprendre une phase de contrôle de production B/, avec les étapes suivantes :

- b_1 : faire un test $T(f)$ pour appliquer à une pièce horlogère flexible fabriquée une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- b_2 : identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance F_r de la pièce horlogère flexible fabriquée, telle qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée,

- b_3 : soumettre au modèle de prédiction M précédemment construit la caractéristique de fréquence de résonance Fr et donner en retour une valeur mesurée de la dimension à mesurer (H , $H1$, e , $e1$ dans le cas de la pièce illustrée figure 3) de la pièce horlogère flexible fabriquée.

[0080] En ce qui concerne l'étape d'excitation vibratoire b_1 , on peut prévoir les mises en oeuvre suivantes :

- pour l'ancre suisse 10 de la figure 1, si cette dernière est libre, on peut bloquer la fourchette 11, ou l'ancre 13 dans un outillage de bridage, et on peut mettre une source d'ultra sons en regard de l'autre extrémité (l'ancre 13 ou la fourchette 11 respectivement) pour exciter l'ancre suisse 10, la baguette faisant office de ressort élastique permettant une mise en vibration de la partie excitée,
- pour le ressort spiral 20 de la figure 2, si ce dernier est réalisé en silicium et encore solidaire d'une plaquette de base via l'extrémité de pitonnage 21 comme dans l'exemple de la figure 4, alors on peut mettre une source d'ultra sons en regard de la virole 23, le barreau 22 faisant office de ressort élastique permettant une mise en vibration de la virole 23. Si par contre le ressort spiral 20 de la figure 2 est libre et détaché, alors on peut prévoir de bloquer l'extrémité de pitonnage 21 ou la virole 23 dans un outillage de bridage, et on peut mettre une source d'ultra sons en regard de l'autre extrémité (la virole 23 ou l'extrémité de pitonnage 21 respectivement).

[0081] On peut noter que des pièces de très faibles dimensions comme celles de la figure 1 ou 2, il peut être plus aisé d'imposer une excitation vibratoire sur ces pièces horlogères flexibles horlogères fabriquées et identifier des fréquences de résonance que de faire des mesures dimensionnelles directement sur ces pièces. En effet, le risque de pollution, de casse, les problèmes d'accessibilité des parties à mesurer, les faibles tolérances à considérer rendent ces mesures dimensionnelles compliquées et risquées. Au contraire, le procédé selon l'invention ne requiert que peu de contacts ou manipulations physiques, et en raison de la phase préliminaire A/ qui peut comprendre une grande série de simulations numériques pour alimenter le modèle de prédiction, la mesure dimensionnelle et/ou la caractéristique matière et/ou la présence/absence/nature/position de défaut retournée par le modèle est d'une grande précision.

Application industrielle

[0082] Un procédé de mesure ou un procédé de contrôle selon la présente invention, sont susceptibles d'application industrielle.

[0083] On comprendra que diverses modifications et/ou améliorations évidentes pour l'homme du métier

peuvent être apportées aux différents modes de réalisation de l'invention décrits dans la présente description sans sortir du cadre de l'invention.

Revendications

1. Procédé de mesure d'une dimension (H , $H1$, e , $e1$) d'une pièce horlogère flexible (10 ; 20), le procédé de mesure comprenant :

A/ une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire, comprenant les étapes consistant à :

- a_1 : conduire une série de simulations itératives ($S1$, ..., Si , ..., SN) en faisant varier de manière itérative au moins une dimension (H , $H1$, e , $e1$) d'une pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée pour prédire pour chaque configuration simulée une réponse vibratoire ($R1$, ..., Ri , ..., RN) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps,
- a_2 : construire un modèle de prédiction (M) de réponse vibratoire ($R1$, ..., Ri , ..., RN) en se basant sur la réponse vibratoire ($R1$, ..., Ri , ..., RN) prédite de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée pour chaque configuration simulée,

B/ une phase de contrôle de production, comprenant les étapes consistant à :

- b_1 : appliquer à une pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- b_2 : identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée, telle qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée,
- b_3 : soumettre au modèle de prédiction (M) construit pendant la phase préliminaire A/ la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 - et donner en retour une valeur mesurée de la dimension (H , $H1$, e , $e1$) à mesurer de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée.

2. Procédé de mesure selon la revendication 1, dans lequel l'étape a_2 comprend une étape consistant à identifier dans la réponse vibratoire ($R1$, ..., Ri , ..., RN) de chaque pièce horlogère flexible (10 ; 20)

modélisée au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée, telle qu'un pic de résonance.

3. Procédé de mesure selon la revendication 1 ou 2, dans lequel l'étape a_2 comprend une étape consistant à construire une base de données en enregistrant dans ladite base de données, pour chaque configuration simulée, au moins une partie de la réponse vibratoire ($R_1, \dots, R_i, \dots, R_N$) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée, et/ou au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée, telle qu'un pic de résonance. 5
4. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 3, la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée comprenant une âme flexible recouverte par une couche de revêtement, dans lequel l'étape a_1 comprend une étape consistant à faire varier au moins une épaisseur de l'âme et/ou une épaisseur de la couche de revêtement de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée. 10
5. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel l'étape b_3 comprend les étapes consistant à : 15
 - choisir une configuration simulée à l'étape a_1 avec une réponse vibratoire ($R_1, \dots, R_i, \dots, R_N$) simulée ayant une caractéristique de fréquence de résonance la plus proche possible de la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 -, 20
 - effectuer une opération de recalage de la simulation en partant de la configuration simulée choisie et en modifiant au moins une dimension (H, H_1, e, e_1) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée pour obtenir une réponse vibratoire ($R_1, \dots, R_i, \dots, R_N$) simulée ayant la même caractéristique de fréquence de résonance que la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 -, 25
 - donner en retour la valeur modifiée de la dimension (H, H_1, e, e_1) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée en tant que valeur mesurée. 30
6. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel l'étape b_3 comprend les étapes consistant à : 35
 - choisir deux configurations simulées à l'étape a_1 avec deux réponses vibratoires simulées ayant chacune une caractéristique de fréquence de résonance la plus proche possible de la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 - et de sorte à encadrer la 40

caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b_2 -,

- effectuer une opération de pondération en partant des deux configurations simulées choisies pour trouver une dimension (H, H_1, e, e_1) pondérée de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée,
 - donner en retour la valeur pondérée de la dimension (H, H_1, e, e_1) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée en tant que valeur mesurée.
7. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel l'étape b_1 est précédée par une étape de bridage de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée dans un outillage de mise en référence, l'outillage de mise en référence étant prévu pour laisser libre au moins une portion flexible, et de préférence une portion flexible reliée à une portion à mettre en vibration, de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée.
 8. Procédé de mesure selon la revendication 7, dans lequel l'étape b_1 est précédée par une étape de mise en regard d'une source sonore et/ou d'un capteur de mesure de position ou de déplacement avec la portion flexible et/ou la portion à mettre en vibration, de préférence avec l'outillage de mise en référence.
 9. Procédé de détection d'un défaut d'une pièce horlogère flexible (10 ; 20), le procédé de détection comprenant :
 - X/ une phase préliminaire de prédiction d'un comportement vibratoire, comprenant les étapes consistant à :
 - x_1 : conduire au moins une simulation sur une pièce horlogère flexible (10 ; 20) de référence modélisée, exempte de défaut, pour prédire une réponse vibratoire ($R_1, \dots, R_i, \dots, R_N$) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) de référence modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps
 - x_2 : conduire une série de simulations itératives ($S_1, \dots, S_i, \dots, S_N$) en faisant varier de manière itérative la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut sur une pièce horlogère flexible (10 ; 20) défail- lante modélisée pour prédire pour chaque configuration simulée une réponse vibra- toire ($R_1, \dots, R_i, \dots, R_N$) de la pièce défail- lante modélisée à une excitation vibratoire variable au cours du temps,
 - x_s : construire un modèle de prédiction (M) de réponse vibratoire ($R_1, \dots, R_i, \dots, R_N$) en se basant sur la réponse vibratoire ($R_1, \dots, R_i, \dots, R_N$) prédite pour la pièce horlogère 45

flexible (10 ; 20) de référence modélisée et/ou sur la réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) prédite pour chaque configuration de pièce horlogère flexible (10 ; 20) défailante modélisée,

Y/ une phase de contrôle de production, comprenant les étapes consistant à :

- y₁ : appliquer à une pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- y₂ : identifier au moins une caractéristique distinctive d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée, telle qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée,
- y₃ : soumettre au modèle de prédiction (M) construit pendant la phase préliminaire X/ la caractéristique distinctive de fréquence de résonance identifiée à l'étape y₂ et donner en retour une indication sur la présence et/ou la position et/ou la nature d'un défaut de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée.

10. Procédé de détection selon la revendication 9, dans lequel l'étape x₃ comprend une étape consistant à identifier dans la réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) de référence modélisée, et/ou dans la réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) de chaque pièce horlogère flexible (10 ; 20) défailante modélisée au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) modélisée, telle qu'un pic de résonance.
11. Procédé de détection selon la revendication 9 ou 10, dans lequel l'étape x₃ comprend une étape consistant à construire une base de données en enregistrant dans ladite base de données, pour chaque configuration simulée, au moins une partie de la réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) de référence modélisée, et/ou au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) de référence modélisée, telle qu'un pic de résonance, et/ou au moins une partie de la réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) de chaque pièce horlogère flexible (10 ; 20) défailante modélisée, et/ou au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) défailante modélisée, et/ou au moins une différence entre la réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) de référence modélisée et la réponse vibratoire (R1, ..., Ri, ..., RN) de chaque

pièce horlogère flexible (10 ; 20) défailante modélisée.

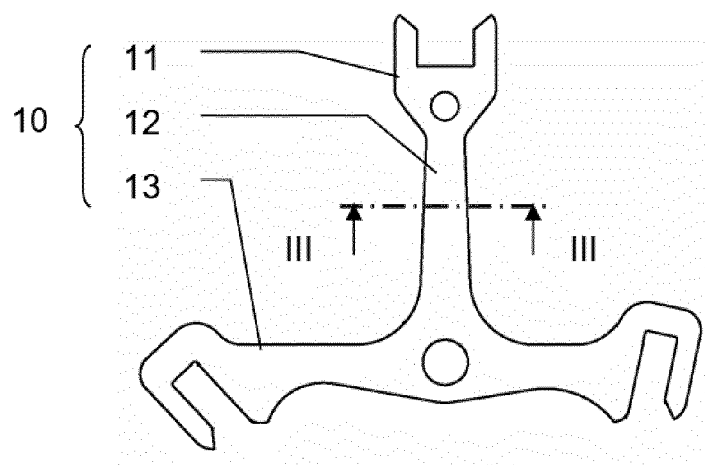
12. Procédé de détection selon l'une des revendications 9 à 11, dans lequel le défaut est :

- un défaut de collage ou de pontage entre deux portions flexibles de la pièce horlogère flexible (10 ; 20),
- une porosité, locale ou non, de la matière de la pièce horlogère flexible (10 ; 20), et/ou de la matière d'une couche de revêtement de la pièce horlogère flexible (10 ; 20),
- un défaut de régularité d'une épaisseur d'une couche de revêtement de la pièce horlogère flexible (10 ; 20),
- un défaut ou manque local de matière, comme par exemple un défaut d'infiltration pour une pièce en silicium,
- un surplus de matière, lié par exemple à un défaut de masquage pour une pièce en silicium,
- une hétérogénéité de la matière,
- un défaut géométrique de la pièce horlogère flexible (10 ; 20), comme un défaut de planéité (lissage) des tranches latérales d'un barreau de silicium formant un spiral,
- un défaut géométrique de la pièce horlogère flexible (10 ; 20), comme un défaut de verticalité des tranches latérales d'un barreau de silicium formant un spiral (une dépouille ou une contre dépouille des faces),
- une portion flexible de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) déformée, ondulée ou décentrée par rapport à une position théorique.

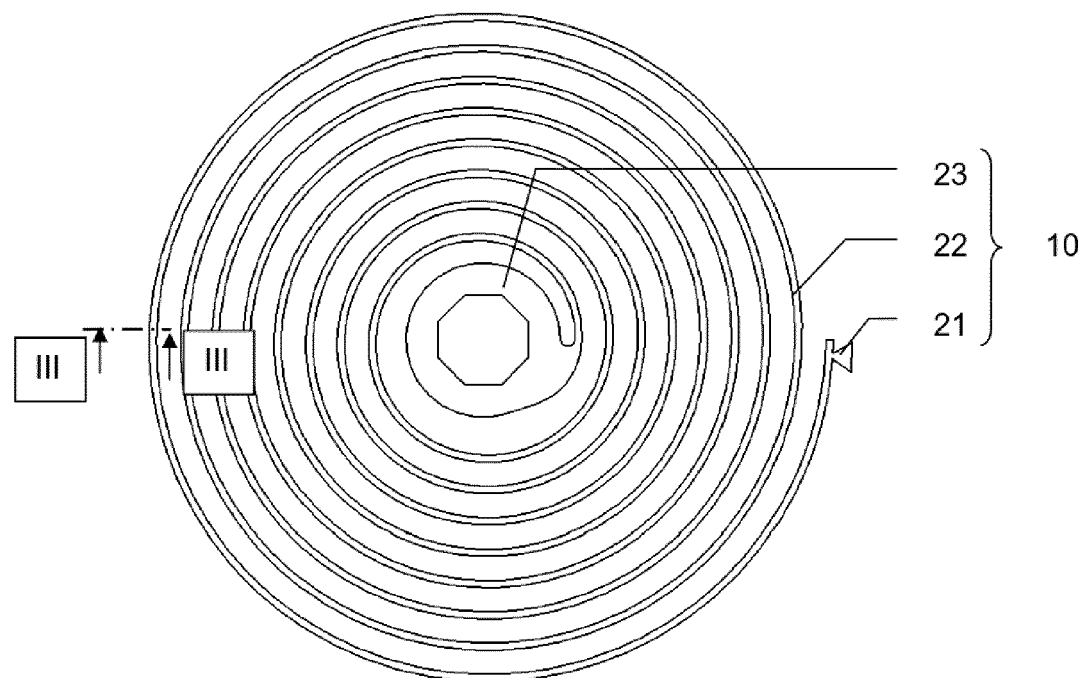
13. Procédé de détection selon l'une des revendications 9 à 12, dans lequel l'étape y₁ est précédée par une étape de bridage de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée dans un outillage de mise en référence, l'outillage de mise en référence étant prévu pour laisser libre au moins une portion flexible, et de préférence une portion flexible reliée à une portion à mettre en vibration, de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée.
14. Procédé de détection selon la revendication 13, dans lequel l'étape y₁ est précédée par une étape de mise en regard d'une source sonore et/ou d'un capteur de mesure de position ou de déplacement avec la portion flexible et/ou la portion à mettre en vibration, de préférence avec l'outillage de mise en référence.
15. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 8, ou procédé de détection selon l'une des revendications 9 à 14, dans lequel la phase préliminaire et/ou la phase de contrôle de production :

- est exempte,
 - de toute étape de recalage du modèle de prédiction (M) et/ou,
 - de toute étape de mesure physique d'une dimension (H, H1, e, e1) de la pièce horlogère fabriquée,
 - et/ou
 - consiste à soumettre uniquement une ou plusieurs caractéristiques de fréquence de résonance au modèle de prédiction (M).
16. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 8, ou procédé de détection selon l'une des revendications 9 à 14, dans lequel l'étape b₂ ou respectivement y₂ comprend l'identification d'au moins une caractéristique de deux fréquences de résonance distinctes, pour soumettre à l'étape b₃ ou respectivement y₃ les deux caractéristiques des deux fréquences de résonance distinctes.
17. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 8, ou procédé de détection selon l'une des revendications 9 à 14, dans lequel l'étape b₃ ou respectivement y₃ comprend une étape consistant à soumettre à la machine de prédiction une valeur de module d'élasticité de la matière de la pièce horlogère flexible (10 ; 20), et/ou une matière de la pièce horlogère flexible (10 ; 20), et/ou une forme d'une partie déformable de la pièce horlogère flexible (10 ; 20), et/ou un paramètre de fabrication mesuré au cours de la fabrication de la pièce horlogère flexible (10 ; 20), comme un temps de mise en étuve d'oxydation.
18. Procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 8, ou procédé de détection selon l'une des revendications 9 à 14, dans lequel la phase de contrôle de production comprend une étape consistant à caractériser un paramètre physique de la matière de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) sur une éprouvette fabriquée simultanément à la pièce horlogère flexible (10 ; 20).
19. Procédé de fabrication d'une pièce horlogère flexible (10 ; 20) comprenant :
- la fourniture d'une pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée,
 - la procédé de mesure selon l'une des revendications 1 à 8 ou selon l'une des revendications 15 à 18, et/ou le procédé de détection selon l'une des revendications 9 à 18.
20. Procédé de fabrication selon la revendication 19, dans lequel l'étape de fourniture de la pièce horlogère flexible (10 ; 20) fabriquée comprend :
- une étape consistant à fournir une pièce horlogère flexible (10 ; 20) en silicium, de préférence recouverte d'une couche d'oxyde de silicium, ou
 - une étape consistant à fournir une pièce horlogère flexible (10 ; 20) métallique électrodéposée, de préférence en nickel ou en alliage de nickel-phosphore, ou
 - une étape consistant à fournir une pièce horlogère flexible (10 ; 20) métallique formée par déformation plastique permanente.

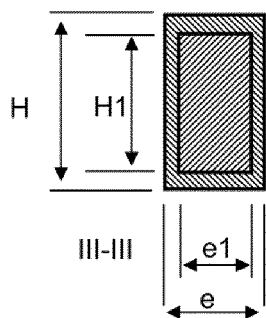
[Fig. 1]



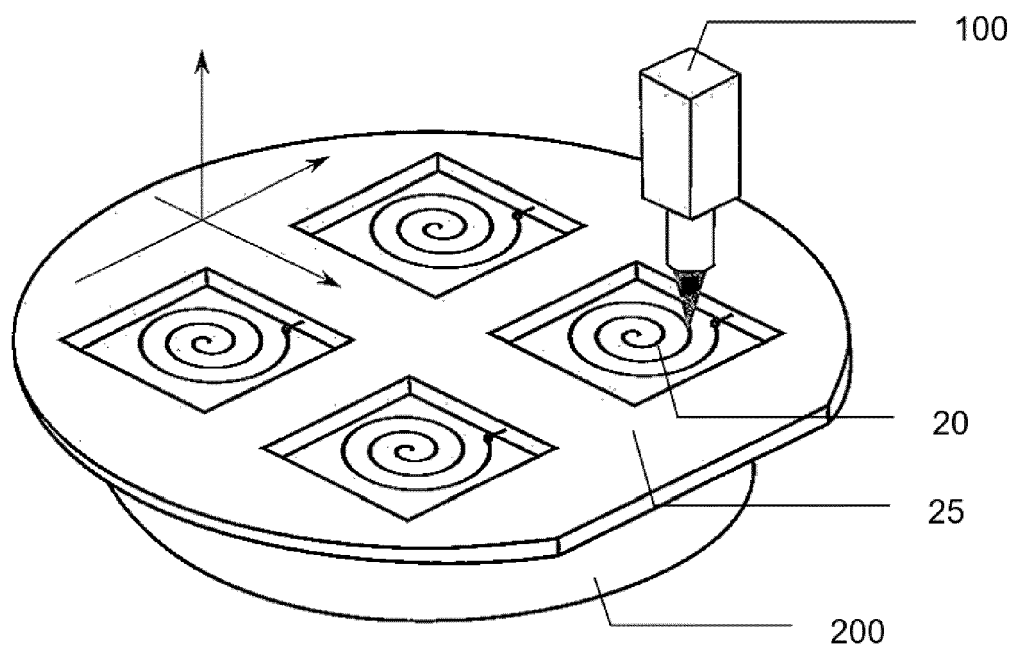
[Fig. 2]



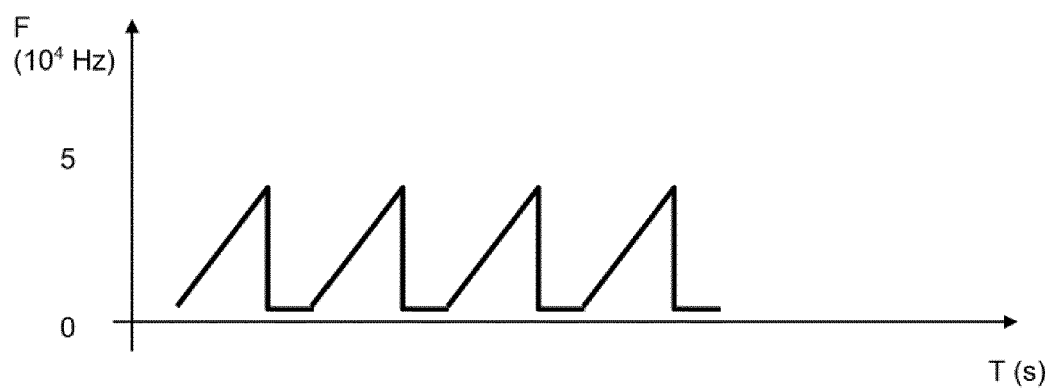
[Fig. 3]



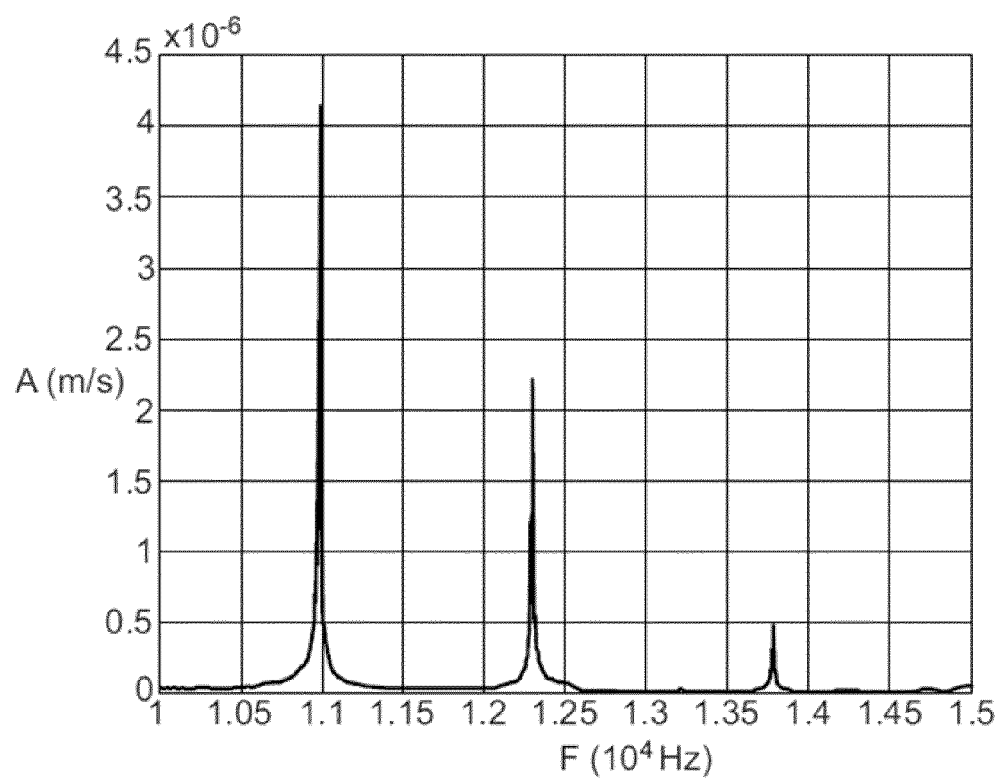
[Fig. 4]



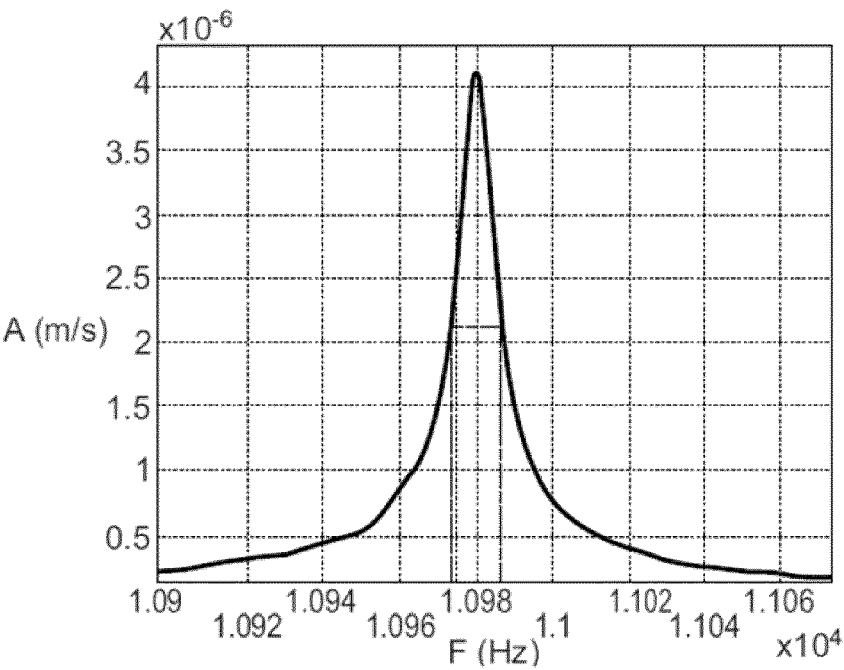
[Fig. 5]



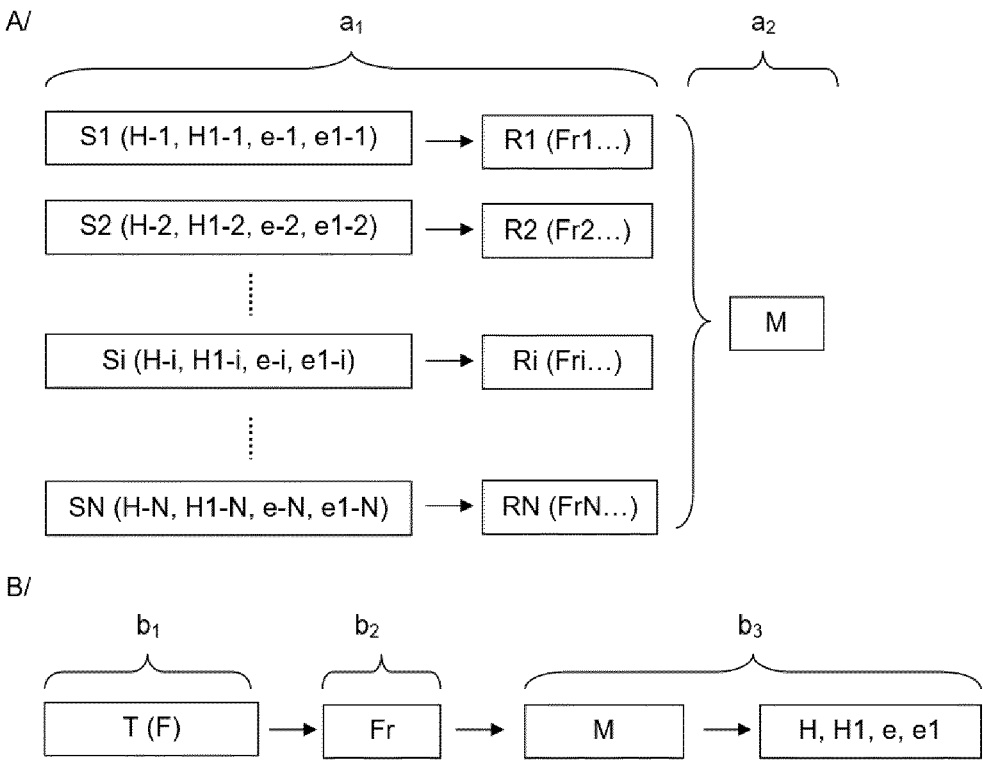
[Fig. 6]



[Fig. 7]



[Fig. 8]





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 17 6076

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	EP 4 030 243 A1 (RICHEMONT INT SA [CH]) 20 juillet 2022 (2022-07-20) * alinéa [0074] – alinéa [0078] * * alinéa [0083] * * alinéa [0093] * * alinéa [0098] * * alinéa [0103] * * alinéa [0106] * * alinéa [0108] * * alinéa [0121] – alinéa [0123] * * alinéa [0001] * -----	1-20	INV. G04D7/06 G04D7/10
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G04D G04B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		31 octobre 2023	Marzocchi, Olaf
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES			
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 antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 23 17 6076

- 5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

31-10-2023

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 4030243 A1	20-07-2022	CN 116783558 A	19-09-2023
		EP 4030243 A1	20-07-2022
		EP 4278234 A1	22-11-2023
		WO 2022152857 A1	21-07-2022

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- WO 2022152857 A1 [0002]