



CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **715 392 A2**

(51) Int. Cl.: **G04C** 11/00 (2006.01)
G04B 17/20 (2006.01)
G04B 17/06 (2006.01)
G04D 7/12 (2006.01)

Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 01183/18

(22) Date de dépôt: 28.09.2018

(43) Demande publiée: 31.03.2020

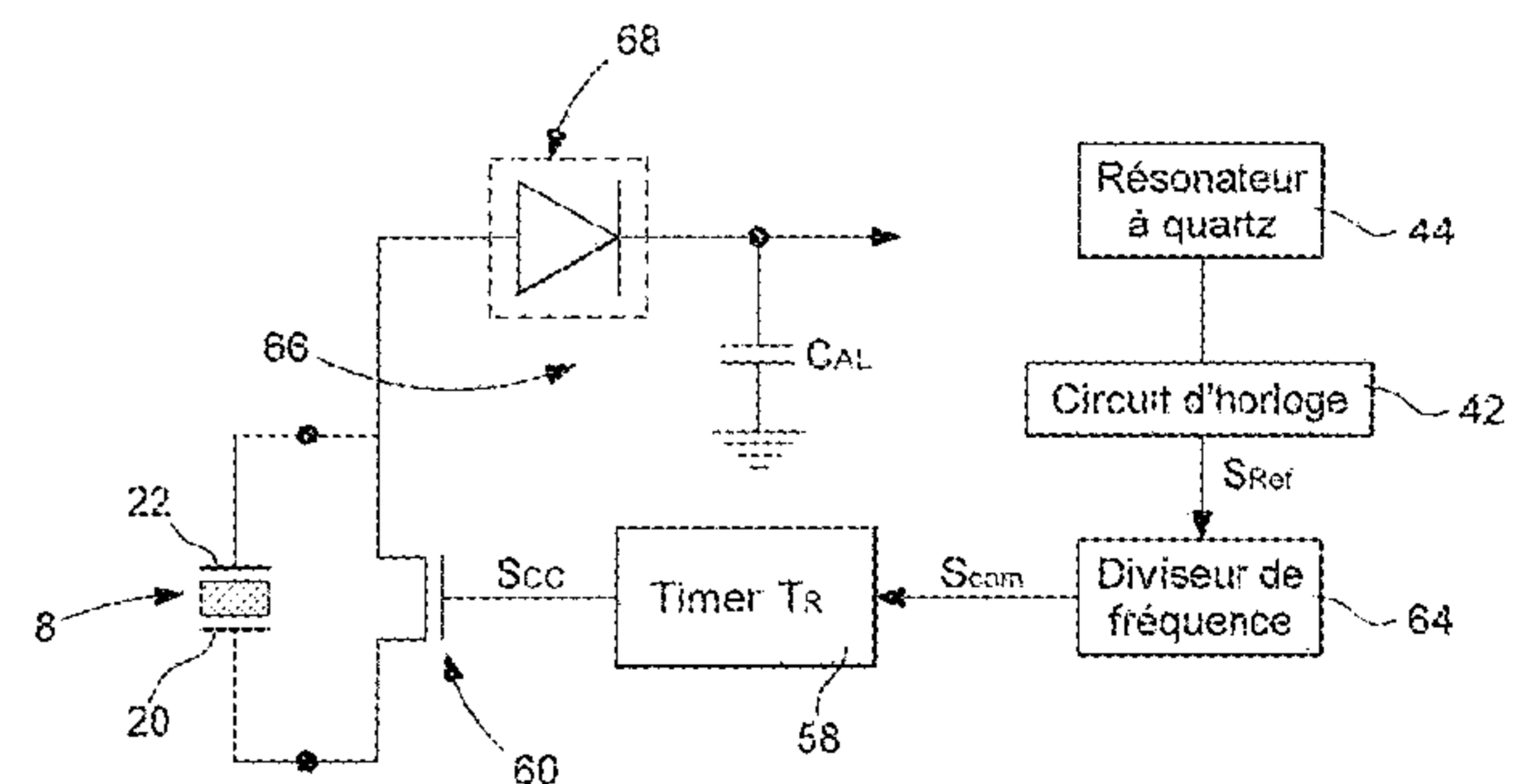
(71) Requéant:
The Swatch Group Research and Development Ltd,
Rue des Sors 3
2074 Marin (CH)

(72) Inventeur(s):
Lionel Tombez, 2022 Bevaix (CH)
Laurent Nagy, 3097 Liebefeld (CH)
Alexandre Haemmerli, 2000 Nauchâtel (CH)

(74) Mandataire:
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA,
Faubourg de l'Hôpital 3
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Pièce d'horlogerie comprenant un mouvement mécanique dont la marche est régulée par un dispositif électronique.**

(57) La pièce d'horlogerie comprend un oscillateur mécanique, formé par un balancier et un spiral piézoélectrique (8), et un dispositif de régulation pour réguler la fréquence de l'oscillateur mécanique. Ce dispositif de régulation est agencé pour pouvoir engendrer des impulsions de régulation (S_{cc}) temporellement séparées et consistant chacune en une diminution momentanée d'une résistance électrique appliquée par le dispositif de régulation entre deux électrodes (20, 22) du spiral piézoélectrique relativement à une résistance électrique nominale. Le dispositif de régulation est agencé pour pouvoir appliquer une pluralité d'impulsions de régulation durant chaque moment d'une succession de moments de correction distincts ou sans interruption sur une plage temporelle continue, de manière à respectivement synchroniser l'oscillateur mécanique sur une fréquence de correction dont la valeur dépend d'une dérive temporelle positive ou négative détectée ou sur une fréquence de consigne pour l'oscillateur mécanique.



Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne une pièce d'horlogerie comprenant un mouvement mécanique, muni d'un oscillateur mécanique qui est formé par un balancier et un spiral, et un dispositif électronique de régulation pour réguler la fréquence de l'oscillateur mécanique qui contrôle la marche du mouvement mécanique.

[0002] En particulier, le dispositif électronique de régulation comprend un oscillateur auxiliaire du type électronique généralement plus précis que l'oscillateur mécanique, en particulier un oscillateur à quartz.

Arrière-plan technologique

[0003] Plusieurs documents concernent la régulation électronique d'un oscillateur mécanique dans une pièce d'horlogerie. En particulier, la demande de brevet US 2013/0 051 191 concerne une pièce d'horlogerie comprenant un balancier-spiral et un circuit électronique de régulation de la fréquence d'oscillation de ce balancier-spiral. Le spiral est constitué d'un matériau piézoélectrique ou comporte deux couches latérales en matériau piézoélectrique sur un noyau en silicium, deux électrodes latérales externes étant agencées sur les surfaces latérales du spiral. Ces deux électrodes sont reliées au circuit électronique de régulation qui comprend une pluralité de capacités commutables agencées en parallèle et reliées aux deux électrodes du spiral.

[0004] A l'aide des fig. 1 à 4, on décrira une pièce d'horlogerie du type décrit dans la demande de brevet américaine mentionnée ci-avant. Pour ne pas charger le dessin, on a représenté à la fig. 1 seulement le résonateur mécanique 2 du mouvement mécanique de la pièce d'horlogerie, ce résonateur comprenant un balancier 4 oscillant autour d'un axe géométrique 6 et un spiral 8 dont la courbe terminale 10 passe classiquement au travers d'un piton 12 solidaire d'un pont de balancier (non représenté) du mouvement mécanique. La fig. 2 montre schématiquement une portion du spiral 8. Ce spiral est formé par un corps central 14 en silicium, deux couches latérales 16, 18 en matériau piézoélectrique, notamment en nitrure d'aluminium (AlN), et deux électrodes métalliques externes 20, 22. Les deux électrodes sont reliées par des fils conducteurs 26, 28 (représentation schématique) à un circuit électronique de régulation 24.

[0005] La fig. 3 (qui reproduit la fig. 1 du document antérieur considéré avec quelques informations supplémentaires provenant des fig. 2 et 7) montre l'agencement général du dispositif de régulation 32 qui est incorporé dans la pièce d'horlogerie en question et en particulier le circuit électronique de régulation 24. Ce circuit 24 comprend une première capacité 34 reliée aux deux électrodes du spiral piézoélectrique et une pluralité de capacités commutables 36a à 36d qui sont agencées en parallèle de la première capacité, de manière à former une capacité variable C_v pour pouvoir varier la valeur de la capacité reliée aux électrodes du spiral et ainsi varier, selon l'enseignement du document, la rigidité du spiral. Le circuit 24 comprend en outre un comparateur 38 dont les deux entrées sont reliées respectivement aux deux électrodes du spiral 8, ce comparateur étant prévu pour fournir un signal logique permettant de déterminer grâce aux changements successifs de l'état logique de ce signal logique les passages par zéro de la tension induite entre les deux électrodes du spiral. Le signal logique est fourni à un circuit logique 40 qui reçoit également un signal de référence d'un circuit d'horloge 42 associé à un résonateur à quartz 44. Sur la base d'une comparaison entre le signal de référence et le signal logique fourni par le comparateur 38, le circuit logique 40 commande les interrupteurs des capacités commutables 36a à 36d.

[0006] De plus, il est prévu à la suite du circuit de capacités commutables un circuit redresseur double alternance 46, formé classiquement d'un pont à quatre diodes, qui fournit une tension continue V_{DC} et charge une capacité de stockage 48. Cette énergie électrique fournie par le spiral piézoélectrique permet une alimentation du dispositif 32. On a donc un système électrique autonome car il est autoalimenté en ce sens que l'énergie électrique provient de l'énergie mécanique fournie au résonateur mécanique 2 dont le spiral piézoélectrique 8, lorsque le résonateur mécanique oscille, forme un transducteur électromécanique (un générateur de courant électrique).

[0007] Comme indiqué dans le document US 2015/0 051 191 à son paragraphe 0052, le circuit électronique de régulation 24 ne peut que réduire la fréquence d'oscillation du résonateur mécanique 2 en augmentant la valeur de la capacité variable C_v . Cette constatation est confirmée par le graphe de la fig. 4 qui montre la courbe 50 donnant l'écart de marche en fonction de la valeur de la capacité variable C_v . On observe en effet que l'écart de marche obtenu est toujours inférieur à zéro et augmente en valeur absolue lorsque la valeur de la capacité variable augmente. Ainsi, le système de régulation demande que la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique (fréquence en l'absence de régulation) soit supérieure à la fréquence nominale (fréquence de consigne) de cet oscillateur mécanique. En d'autres termes, il est prévu de régler l'oscillateur mécanique de manière à ce que sa fréquence naturelle corresponde à une fréquence supérieure à la fréquence de consigne, le circuit de régulation ayant pour fonction de faire diminuer plus ou moins cette fréquence naturelle pour que la marche corresponde à la fréquence de consigne. Ainsi, un grand désavantage d'un tel système réside dans le fait que la marche du mouvement mécanique n'est pas optimale en l'absence de régulation électronique. Pour un mouvement horloger mécanique de haute précision, on doit en effet dégrader ses propres caractéristiques mécaniques par un réglage non optimal. On peut conclure qu'un tel système de régulation électronique n'a de sens que pour des mouvements mécaniques de qualité moyenne, voire de mauvaise qualité, la précision de ces mouvements mécaniques dépendant du système de régulation électronique.

Résumé de l'invention

[0008] La présente invention a pour but de proposer une pièce d'horlogerie, munie d'un résonateur mécanique comprenant un spiral formé au moins partiellement d'un matériau piézoélectrique et d'un système de régulation électronique, associé au spiral piézoélectrique, qui ne présente pas les inconvénients de la pièce d'horlogerie de l'art antérieur précédemment décrite, en particulier qui puisse être associé à un mouvement mécanique dont la marche est réglée initialement de manière optimale, c'est-à-dire au mieux de ses possibilités. Ainsi, l'invention a pour objectif de fournir un système de régulation électronique qui soit, grâce à l'utilisation d'un spiral piézoélectrique, discret et autonome et qui soit réellement complémentaire au mouvement mécanique en permettant d'augmenter sa précision sans dégrader par ailleurs un réglage initial optimal de ce mouvement mécanique.

[0009] A cet effet, l'invention a pour objet une pièce d'horlogerie comprenant un dispositif de régulation agencé pour pouvoir réguler la fréquence moyenne d'un oscillateur mécanique, formé par un balancier et un spiral, qui cadence la marche de la pièce d'horlogerie, ce dispositif de régulation comprenant une base de temps auxiliaire, formée par un oscillateur électronique auxiliaire, qui fournit un signal de fréquence de référence pour la régulation. Le spiral est formé au moins partiellement par un matériau piézoélectrique et par au moins deux électrodes agencées de manière à présenter entre elles une tension induite par le matériau piézoélectrique subissant une contrainte mécanique et reliées électriquement au dispositif de régulation qui est agencé pour pouvoir varier l'impédance du système de régulation formé par le matériau piézoélectrique, les au moins deux électrodes et le dispositif de régulation. Le dispositif de régulation est agencé de manière à pouvoir varier momentanément la résistance électrique engendrée par ce dispositif de régulation entre les au moins deux électrodes, pour pouvoir engendrer au moins par moments des impulsions de régulation qui sont distinctes et ont chacune une certaine durée T_p , chaque impulsion de régulation consistant en une diminution momentanée de ladite résistance électrique relativement à une résistance électrique nominale qui est engendrée par le dispositif de régulation entre les deux électrodes en dehors des impulsions de régulation distinctes. Le dispositif de régulation est agencé pour pouvoir appliquer une pluralité d'impulsions de régulation durant chacun desdits moments, de manière que deux impulsions de régulation successives quelconques parmi chaque pluralité d'impulsions de régulation présentent entre leurs débuts une distance temporelle D_T égale à un nombre N multiplié par la moitié d'une période de régulation T_{reg} déterminée pour chacun desdits moments, soit une relation mathématique $D_T = N \cdot T_{reg}/2$, N étant un nombre entier positif supérieur à zéro. La période de régulation T_{reg} et le nombre N sont sélectionnés de manière à permettre une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de régulation $F_{reg} = 1/T_{reg}$ au cours de chacun desdits moments. Le dispositif de régulation est agencé pour déterminer au moyen de la base de temps de référence le début de chacune des impulsions de régulation, de manière à satisfaire la relation mathématique susmentionnée entre la distance temporelle et la période de régulation, et pour ainsi déterminer la fréquence de régulation.

[0010] Selon une variante avantageuse, la distance temporelle D_T est égale à un nombre impair $2M - 1$ multiplié par la moitié d'une période de régulation T_{reg} déterminée pour chacun desdits moments, soit une relation mathématique $D_T = (2M - 1) \cdot T_{reg}/2$, M étant un nombre entier positif supérieur à zéro. La période de régulation T_{reg} et le nombre M sont sélectionnés de manière à permettre une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de régulation $F_{reg} = 1/T_{reg}$ au cours de chacun desdits moments.

[0011] Selon un premier mode de réalisation principal, lesdits moments sont contigus et forment ensemble une plage temporelle continue. Le dispositif de régulation est agencé pour appliquer durant la plage temporelle continue les impulsions de régulation de manière que deux impulsions de régulation successives quelconques intervenant dans cette plage temporelle continue présentent entre leurs débuts la distance temporelle D_T avec la période de régulation T_{reg} égale à une période de consigne T_{0c} , laquelle est l'inverse de la fréquence de consigne F_{0c} , de manière à pouvoir synchroniser continûment, après une éventuelle phase transitoire initiale, la fréquence de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de consigne F_{0c} durant la plage temporelle continue.

[0012] Dans une variante particulière, le dispositif de régulation est agencé pour appliquer, durant la plage temporelle continue, périodiquement les impulsions de régulation avec une fréquence de déclenchement $F_D(N) = 2 \cdot F_{0c}/N$ dans le cadre de la variante générale exposée précédemment, respectivement $F_D(M) = 2 \cdot F_{0c}/(2M - 1)$ dans le cadre de la variante avantageuse aussi mentionnée précédemment. Dans une variante préférée, le nombre N , respectivement M est constant et prédéfini pour la plage temporelle continue.

[0013] Selon un deuxième mode de réalisation principal, la pièce d'horlogerie comprend en outre un dispositif de mesure d'une dérive temporelle dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique relativement à sa fréquence de consigne F_{0c} , et le dispositif de régulation est agencé pour sélectionner, avant chacun desdits moments, pour la période de régulation T_{reg} , selon qu'au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée, respectivement une première période de correction T_{cor1} qui est supérieure à une période de consigne T_{0c} , égale à l'inverse de la fréquence de consigne, ou une deuxième période de correction T_{cor2} qui est inférieure à la période de consigne. Chacun desdits moments est prévu avec une durée suffisante à l'établissement d'une phase synchrone dans laquelle la fréquence de l'oscillateur mécanique est synchronisée soit sur une première fréquence de correction $F_{cor1} = 1/T_{cor1}$ lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive est détectée avant le moment considéré, soit sur une deuxième fréquence de correction $F_{cor2} = 1/T_{cor2}$ lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle négative est détectée avant le moment considéré.

[0014] Selon une variante préférée, lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée, le dispositif de régulation est agencé pour appliquer périodiquement, durant le moment suivant parmi lesdits moments, la pluralité d'impulsions de régulation correspondante avec respectivement une première fréquence F_{INF} , selon la variante mentionnée précédemment $F_{INF} = 2 \cdot F_{cor1}/N$ ou $F_{INF} = 2 \cdot F_{cor1}/(2M - 1)$, ou avec une deuxième fréquence F_{SUP} , selon la variante mentionnée précédemment $F_{SUP} = 2 \cdot F_{cor2}/N$ ou $F_{SUP} = 2 \cdot F_{cor2}/(2M - 1)$. En particulier, le nombre N , respectivement M est constant au cours de chacun desdits moments et il est soit prédéterminé, soit déterminé avant le moment suivant considéré.

[0015] Grâce aux caractéristiques de la pièce d'horlogerie selon l'invention, il est possible de corriger aussi bien une avance qu'un retard dans la marche naturelle d'un mouvement mécanique en agissant par des impulsions de régulation, ayant chacune une durée limitée, qui varient la résistance entre les au moins deux électrodes du spiral qui est formé au moins partiellement d'un matériau piézoélectrique.

[0016] Dans le premier mode de réalisation principal, les impulsions de régulation distinctes sont appliquées sans interruption et les instants de leur déclenchement sont déterminés de manière que la fréquence de l'oscillateur mécanique soit synchronisée en permanence sur une fréquence de consigne, de sorte qu'aucune dérive temporelle n'intervient après une phase initiale permettant d'obtenir la synchronisation voulue. Ce premier mode de réalisation est très avantageux par la simplicité de son circuit électronique.

[0017] Dans le deuxième mode de réalisation principal, on tire parti du fait que le système de régulation engendre une tension induite entre les deux électrodes du spiral, ce qui permet de compter aisément les alternances ou les périodes de l'oscillateur mécanique et de pouvoir ainsi détecter une dérive temporelle dans la marche de la pièce d'horlogerie. Dans ce cas, il est prévu d'appliquer des impulsions de régulation que par moments séparés et seulement lorsque qu'une certaine dérive temporelle est détectée, de manière différenciée selon que cette dérive temporelle est positive ou négative, pour corriger la dérive temporelle.

Brève description des figures

[0018] L'invention sera décrite ci-après de manière plus détaillée à l'aide des dessins annexés, donnés à titre d'exemples nullement limitatifs, dans lesquels:

- la fig. 1, déjà décrite, montre une pièce d'horlogerie de l'art antérieur comprenant un résonateur mécanique, formé d'un balancier et d'un spiral piézoélectrique, et un circuit électronique de régulation qui est relié aux deux électrodes du spiral piézoélectrique;
- la fig. 2 est un agrandissement d'une portion du spiral piézoélectrique de la fig. 1;
- la fig. 3 montre partiellement le schéma électrique du dispositif de régulation de la pièce d'horlogerie de la fig. 1;
- la fig. 4 donne l'écart de marche pour la pièce d'horlogerie des figures précédentes en fonction d'une capacité variable appliquée entre les deux électrodes du spiral piézoélectrique;
- la fig. 5 montre l'évolution de la fréquence d'oscillation du résonateur mécanique lors d'une application périodique d'impulsions de régulation pour diverses fréquences de déclenchement de ces impulsions de régulation autour d'une fréquence égale au double d'une fréquence de consigne pour l'oscillateur mécanique de la pièce d'horlogerie;
- la fig. 6 montre le schéma électrique d'un dispositif de régulation incorporé dans une variante d'un premier mode de réalisation principal d'une pièce d'horlogerie selon l'invention;
- la fig. 7 montre le schéma électrique d'un dispositif de régulation incorporé dans une variante préférée du premier mode de réalisation principal;
- la fig. 8 montre le schéma électrique d'un dispositif de régulation incorporé dans une variante d'un deuxième mode de réalisation principal d'une pièce d'horlogerie selon l'invention;
- la fig. 9 montre le graphe de la tension induite entre les deux électrodes du spiral piézoélectrique en fonction de la position angulaire du résonateur mécanique, ainsi qu'un signal fourni par un comparateur à hystérèse pour pouvoir compter les périodes d'oscillation du résonateur mécanique; et
- la fig. 10 est une coupe transversale d'un mode de réalisation préféré d'un spiral piézoélectrique formant le résonateur mécanique d'une pièce d'horlogerie selon l'invention.

Description détaillée de l'invention

[0019] La pièce d'horlogerie selon l'invention comprend, comme la pièce d'horlogerie de l'art antérieur décrite précédemment, un mouvement horloger mécanique muni d'un oscillateur mécanique, formé par un balancier et un spiral piézo-électrique, par exemple tel que représenté aux fig. 1 et 2, et agencé pour cadencer la marche du mouvement horloger, cet oscillateur mécanique ayant une fréquence de consigne F_{0c} prédéfinie. Le spiral est formé au moins partiellement par un matériau piézoélectrique et il comprend deux électrodes 20, 22 agencées de manière à pouvoir présenter entre elles une tension induite par le matériau piézoélectrique lorsque ce dernier est mis sous contrainte mécanique lors d'une oscillation de l'oscillateur mécanique. La pièce d'horlogerie comprend en outre un dispositif de régulation agencé pour pouvoir réguler la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique et comprenant une base de temps auxiliaire, formée par un oscillateur électronique auxiliaire et fournissant un signal de fréquence de référence. Les deux électrodes du spiral sont reliées électriquement au dispositif de régulation qui est agencé pour pouvoir varier l'impédance du système de régulation qui est formé par le matériau piézoélectrique, les deux électrodes et le dispositif de régulation.

[0020] Selon l'invention, le dispositif de régulation est agencé de manière à pouvoir varier momentanément la résistance électrique engendrée par ce dispositif de régulation entre les deux électrodes du spiral, pour pouvoir engendrer au moins par moments des impulsions de régulation qui sont distinctes et ont chacune une certaine durée T_P , chaque impulsion de régulation consistant en une diminution momentanée de la résistance électrique du système de régulation, à savoir la résistance électrique susmentionnée relativement à une résistance électrique nominale qui est engendrée par le dispositif de régulation entre les deux électrodes en dehors des impulsions de régulation distinctes. De manière générale, le dispositif de régulation est agencé pour pouvoir appliquer au moins par moments une pluralité d'impulsions de régulation durant chacun de ces moments, de manière que deux impulsions de régulation successives quelconques parmi chaque pluralité d'impulsions de régulation présentent entre leurs débuts une distance temporelle D_T égale à un nombre N multiplié par la moitié d'une période de régulation T_{reg} déterminée pour chacun desdits moments, soit une relation mathématique $D_T = N \cdot T_{reg}/2$, N étant un nombre entier positif supérieur à zéro. La période de régulation T_{reg} et le nombre N sont sélectionnés de manière à permettre une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de régulation $F_{reg} = 1/T_{reg}$ au cours de chacun desdits moments, comme ceci sera exposé plus en détails par la suite. Le dispositif de régulation est agencé pour déterminer au moyen de la base de temps de référence le début de chacune desdites impulsions de régulation, de manière à satisfaire la relation mathématique susmentionnée entre la distance temporelle D_T et la période de régulation T_{reg} , et pour ainsi déterminer la fréquence de régulation.

[0021] Dans une variante avantageuse, la distance temporelle D_T est égale à un nombre impair $2M - 1$ multiplié par la moitié d'une période de régulation T_{reg} déterminée pour chacun desdits moments, soit une relation mathématique $D_T = (2M - 1) \cdot T_{reg}/2$, M étant un nombre entier positif supérieur à zéro. Cette variante, qui sélectionne les nombres impairs parmi les valeurs possibles pour le nombre N susmentionné dans la variante générale exposée ci-avant, est avantageuse car, selon les observations effectuées par les inventeurs, la sélection d'un nombre impair résulte en une plus grande efficacité de régulation relativement au cas d'un nombre pair pour le nombre N .

[0022] De préférence, au cours de chaque moment où intervient une pluralité d'impulsions de régulation, le dispositif de régulation est agencé pour appliquer périodiquement les impulsions de régulation avec une fréquence de déclenchement $F_D(N) = 2 \cdot F_{reg}/N$ pour la variante générale, et $F_D(M) = 2 \cdot F_{reg}/(2M - 1)$ pour la variante avantageuse susmentionnée.

[0023] Dans le cadre du développement ayant conduit à la présente invention, les inventeurs ont mis en lumière un phénomène physique tout-à-fait remarquable en relation avec un oscillateur mécanique formé par un balancier et un spiral piézoélectrique, ce phénomène physique permettant d'effectuer selon l'invention une régulation de la fréquence moyenne d'un oscillateur mécanique incorporé dans un mouvement mécanique au moyen d'un dispositif de régulation électronique, comme exposé ci-avant. Ensuite, les inventeurs ont définis deux types de régulation basés sur ce phénomène physique qui sont respectivement implémentés dans deux modes de réalisation principaux qui seront décrits en détails par la suite. Pour exposer ce phénomène physique, la fig. 5 montre le comportement d'un oscillateur mécanique équipé d'un spiral piézo-électrique, du type décrit précédemment, auquel on applique de manière périodique des impulsions de court-circuit de courte durée, par exemple moins d'un dixième d'une période de consigne T_{0c} (dans le cas représenté, la durée des impulsions de court-circuit est de 10 ms, soit un vingtième de la période de consigne $T_{0c} = 200$ ms), l'oscillateur mécanique et le mouvement mécanique qui l'incorpore étant conçus pour fonctionner naturellement sensiblement à une fréquence de consigne F_{0c} égale par définition à l'inverse de la période de consigne.

[0024] Dans l'exemple représenté à la fig. 5, la fréquence naturelle F_0 de l'oscillateur mécanique est précisément égal à sa fréquence de consigne $F_{0c} = 5$ Hz et des impulsions de court-circuit, formant des impulsions de régulation selon l'invention, sont appliquées ici avec une fréquence de déclenchement F_D proche du double de la fréquence de consigne mais différente, soit $F_D \approx 2 \cdot F_{0c}$, en plus du cas spécifique d'une fréquence de déclenchement F_D exactement égale au double de la fréquence naturelle et donc au double de la fréquence de consigne. Diverses courbes montrent l'évolution temporelle de la fréquence de l'oscillateur mécanique pour diverses fréquences de déclenchement (pour $N = M = 1$ dans la formule de la fréquence de déclenchement $F_D(N)$, respectivement $F_D(M)$ mentionnées précédemment) au cours de moments durant lesquels on applique une pluralité d'impulsions de court-circuit périodiques. On obtient les résultats suivant:

- La courbe C_{F_0} correspond à une fréquence de déclenchement des impulsions de court-circuit $F_{D0} = 10,00$ Hz, et on observe que la fréquence d'oscillation se stabilise à la fréquence de consigne $F_{S0} = F_{0c} = 5,00$ Hz;

- Les courbes C_{F1} et C_{F2} correspondent à des fréquences de déclenchement des impulsions de court-circuit qui sont supérieures à F_{D0} , soit respectivement $F_{D1} = 10,03$ Hz et $F_{D2} = 10,08$ Hz, et on observe que la fréquence d'oscillation se synchronise respectivement sur les fréquences de synchronisation $F_{S1} = 5,015$ Hz et $F_{S2} = 5,04$ Hz après une phase transitoire intervenant au début de chaque moment d'application d'impulsions de court-circuit; et
- Les courbes C_{F3} , C_{F4} et C_{F5} correspondent à des fréquences de déclenchement des impulsions de court-circuit qui sont inférieures à F_{D0} , soit respectivement $F_{D3} = 9,96$ Hz, $F_{D4} = 9,94$ Hz et $F_{D5} = 9,88$ Hz, et on observe que la fréquence d'oscillation se synchronise respectivement sur les fréquences de synchronisation $F_{S3} = 4,98$ Hz, $F_{S4} = 4,97$ Hz et $F_{S5} = 4,94$ Hz après une phase transitoire intervenant au début de chaque moment d'application d'impulsions de court-circuit.

[0025] De manière remarquable, les mêmes fréquences de synchronisation ont été obtenues pour des fréquences de déclenchement des impulsions de court-circuit respectivement égales aux fréquences de déclenchement F_{DX} , $X = 1$ à 5, mentionnées ci-avant, divisées par un nombre impair $2M - 1$, M étant un nombre entier positif supérieur à zéro, dans la mesure où le rapport entre la fréquence de synchronisation et la fréquence naturelle de l'oscillateur mécanique/la fréquence de consigne est comprise entre $(K-1)/K$ et $(K + 1)/K$ avec $K > 40 \cdot (2M - 1)$. Des résultats similaires peuvent être obtenus avec une division par un nombre pair $2M$ et une condition semblable entre K et M , mais a priori il semble que dans ce dernier cas la synchronisation ne s'établisse pas de manière aussi efficace que pour un nombre impair, l'effet des impulsions de court-circuit étant moindre.

[0026] Des observations et considérations précédentes, on déduit qu'il est possible de synchroniser un oscillateur mécanique, ayant un spiral piézoélectrique tel que décrit précédemment, en appliquant périodiquement des impulsions de court-circuit entre les deux électrodes de ce spiral, sur une fréquence proche de sa fréquence naturelle mais différente de cette dernière.

[0027] Ainsi, si la fréquence naturelle s'écarte de la fréquence de consigne de manière usuelle, soit d'une seconde à environ une quinzaine de secondes par jour, on peut aisément synchroniser, par une régulation totalement en boucle ouverte, la fréquence de l'oscillateur mécanique sur la fréquence de consigne en appliquant de manière continue des impulsions de régulation distinctes telles que décrites précédemment avec une fréquence de déclenchement sélectionnée de manière appropriée. Cette application fait l'objet du premier mode de réalisation principal. En utilisant le signal de tension induite entre les électrodes du spiral lorsque le résonateur mécanique oscille, on peut aisément compter les périodes d'oscillation et déterminer une dérive temporelle, en particulier détecter lorsqu'une certaine dérive temporelle positive ou négative est atteinte, et ensuite on peut appliquer durant un certain moment de correction une pluralité d'impulsions de régulation distinctes telles que décrites précédemment avec une fréquence de déclenchement sélectionnée de manière appropriée pour synchroniser l'oscillation de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de correction différente de la fréquence de consigne mais sélectionnée suffisamment proche de cette fréquence de consigne pour permettre une synchronisation, et pour ainsi corriger la dérive temporelle détectée. Cette application, que l'on peut considérer en boucle semi-ouverte ou semi-fermée, fait l'objet du deuxième mode de réalisation principal.

[0028] A la fig. 6 est montré le schéma électronique d'une première variante du premier mode de réalisation principal. Le circuit électronique, qui forme l'entier du dispositif de régulation 52, est très simple. Un résonateur à quartz 44 est excité par un circuit d'horloge 42, ce dernier fournissant un signal de référence S_{Ref} soit à la fréquence du quartz F_Q , de préférence à une fréquence ajustée à 32 768 Hz, soit à une fraction de cette fréquence F_Q , par exemple $F_Q/4$ et de préférence à une fraction de la fréquence ajustée notamment au moyen d'un circuit d'inhibition connu de la personne du métier. Le signal de référence S_{Ref} est fourni à un diviseur de fréquence 64 qui fournit en sortie un signal de commande S_{com} à un minuteur 58 qui, en réponse au signal de commande, fournit un signal de court-circuit Sec à un interrupteur 60 agencé entre les deux électrodes 20, 22 du spiral piézoélectrique 8 (représenté schématiquement à la fig. 6) à la fréquence imposée par le signal de commande. Ce processus a lieu sans interruption dans une plage temporelle continue qui dure tant que le dispositif de régulation est actif, c'est-à-dire tant qu'il est alimenté électriquement.

[0029] Le spiral piézoélectrique 8 est formé au moins partiellement par un matériau piézoélectrique et par au moins deux électrodes 20, 22 (voir fig. 2 et 10) qui sont agencées de manière à pouvoir présenter entre elles une tension induite $U(t)$ par le matériau piézoélectrique lorsque ce dernier est mis sous contrainte mécanique lors d'une oscillation de l'oscillateur mécanique (voir fig. 9).

[0030] Le signal de commande S_{com} est un signal de fréquence ayant, dans une variante générale, une fréquence de déclenchement $F_D(N) = 2 \cdot F_{0c}/N$, le nombre N étant un nombre entier supérieur à zéro qui est sélectionné de manière que, pour un rapport entre une fréquence de dérive maximale dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique et la fréquence de consigne F_{0c} compris entre $(K - 1)/K$ et $(K + 1)/K$, ce nombre N est inférieur à $K/40$, soit $N < K/40$. Dans une variante avantageuse, le signal de commande S_{com} est un signal de fréquence qui présente une fréquence de déclenchement $F_D(M) = 2 \cdot F_{0c}/(2M - 1)$, le nombre M étant un nombre entier supérieur à zéro qui est sélectionné de manière que, pour un rapport entre une fréquence de dérive maximale dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique et la fréquence de consigne compris entre $(K - 1)/K$ et $(K + 1)/K$, on a $2M - 1$ inférieur à $K/40$, soit $2M - 1 < K/40$. De préférence, les nombres N et M sont constants et prédéfinis pour la plage temporelle continue durant laquelle sont appliquées les impulsions de court-circuit qui définissent les impulsions de régulation.

[0031] Le minuteur 58, à chaque impulsion du signal de commande, ferme l'interrupteur 60 (interrupteur passant et donc conducteur) durant un intervalle de temps T_R , de sorte que les impulsions de court-circuit ont chacune une durée T_R , laquelle est prévue de préférence inférieure au quart de la période de consigne T_{0c} . Dans une variante avantageuse, la durée des impulsions de régulation est inférieure ou sensiblement égale à un dixième de la période de consigne T_{0c} . On obtient ainsi durant la plage temporelle continue susmentionnée, après une phase transitoire éventuelle lors de l'activation du dispositif de régulation, une synchronisation continue de la fréquence de l'oscillateur mécanique sur la fréquence de consigne F_{0c} .

[0032] A la fig. 7 est représenté le schéma électronique d'un dispositif de régulation, identique à celui décrit ci-avant, qui est associé à un circuit d'alimentation 66, formé d'un redresseur 68 d'une tension induite $U(t)$ entre les deux électrodes 20, 22 du spiral 8 lorsque le résonateur mécanique oscille et agencé pour alimenter le dispositif de régulation 62, la tension redressée étant emmagasinée dans une capacité de stockage C_{AL} , de sorte que le dispositif de régulation avec le circuit d'alimentation forment une unité autonome. Dans une variante avantageuse, cette unité autonome est supportée par le balancier 4 (voir fig. 1) auquel elle est fixée.

[0033] A la fig. 8 est montré le schéma électronique d'une variante avantageuse du deuxième mode de réalisation principal. La pièce d'horlogerie comprend un dispositif de régulation 62 formé par un circuit électronique de régulation 62a et une base de temps auxiliaire qui comprend un oscillateur auxiliaire et qui fournit un signal de référence S_{Ref} au circuit électronique de régulation. Cette base de temps comprend par exemple un résonateur à quartz 44 et un circuit d'horloge 42 qui fournit le signal de référence S_{Ref} , déjà décrit dans le cadre du premier mode de réalisation principal, à un diviseur présentant au moins deux étages DIV1 et DIV2, ce diviseur étant compris dans le circuit 62a. Le spiral piézoélectrique 8 est semblable à celui décrit dans le premier mode de réalisation principal et ses deux électrodes 20, 22 sont reliées électriquement au circuit électronique de régulation 62a.

[0034] Le circuit électronique de régulation comprend un dispositif de mesure d'une dérive temporelle éventuelle dans la marche du mouvement horloger relativement à une fréquence de consigne pour l'oscillateur mécanique qui est déterminée par la base de temps auxiliaire 42, 44. Le dispositif de mesure est formé par un comparateur à hystérèse 54 dont les deux entrées sont reliées aux deux électrodes 20, 22 du spiral piézoélectrique 8. On remarquera que dans l'exemple donné, l'électrode 20 est reliée électriquement à une entrée du comparateur 54 via la masse du dispositif de régulation. Le comparateur à hystérèse fournit un signal digital «Comp» (voir fig. 9) dont l'état logique change juste après chaque passage de l'oscillateur mécanique par sa position neutre (position angulaire $\theta(t)$ égal à zéro) et donc après chaque passage par zéro du résonateur mécanique formant cet oscillateur mécanique. La tension induite $U(t)$ générée par le spiral piézoélectrique est nulle lors du passage du résonateur mécanique par sa position neutre (position angulaire «zéro»), alors qu'elle est maximale, pour une charge donnée appliquée entre les deux électrodes, lorsque le résonateur mécanique est dans une ou l'autre de ses deux positions extrêmes (définissant l'amplitude de l'oscillateur mécanique respectivement des deux côtés de la position neutre), comme montré à la fig. 9.

[0035] Le signal «Comp» est fourni à une première entrée 'Up' d'un compteur bidirectionnel CB formant le dispositif de mesure. Le compteur bidirectionnel est ainsi incrémenté d'une unité à chaque période d'oscillation de l'oscillateur mécanique (notamment à chaque flanc montant du signal). Il reçoit donc en continu une mesure de la fréquence d'oscillation instantanée de l'oscillateur mécanique. Le compteur bidirectionnel reçoit à sa deuxième entrée 'Down' un signal d'horloge S_{hor} fourni par le diviseur de fréquence DIV1 & DIV2, ce signal d'horloge correspondant à une fréquence de consigne F_{0c} pour l'oscillateur mécanique qui est déterminée par l'oscillateur auxiliaire de la base de temps auxiliaire. Ainsi, le compteur bidirectionnel fournit au circuit logique de commande 56 un signal S_{DT} correspondant à une erreur cumulée au cours du temps entre la fréquence d'oscillation de l'oscillateur mécanique et la fréquence de consigne, cette erreur cumulée définissant la dérive temporelle de l'oscillateur mécanique relativement à l'oscillateur auxiliaire.

[0036] Ensuite, le dispositif de régulation 62 comprend un interrupteur 60 formé par un transistor et agencé entre les deux électrodes 20, 22 du spiral 8, cet interrupteur étant commandé par le circuit logique de commande 56 qui est agencé pour pouvoir fermer, via un minuteur 58, momentanément cet interrupteur de manière à le rendre passant / conducteur durant les impulsions de régulation, lesquelles définissent alors des impulsions de court-circuit. Le circuit de commande fournit sélectivement un signal de commande S_{com} au minuteur 58 qui, en réponse à ce signal de commande, commande la fermeture momentanée du transistor 60 en lui appliquant un signal S_{ec} . Plus précisément, le circuit de commande détermine l'instant du début de chaque impulsion de court-circuit en déclenchant ou réinitialisant le minuteur («Timer») qui rend directement passant/conducteur le transistor 60 (interrupteur fermé), le minuteur déterminant la durée T_R de chaque impulsion de court-circuit. A la fin de chaque impulsion de court-circuit, le minuteur ouvre à nouveau l'interrupteur de sorte que le transistor 60 n'est plus passant, c'est-à-dire qu'il redevient non conducteur. Dans une variante générale, les impulsions de régulation ont chacune une durée inférieure au quart de la période de consigne T_{0c} qui est égale à l'inverse de la fréquence de consigne pour l'oscillateur mécanique. Dans une variante de réalisation préférée, la durée des impulsions de régulation est inférieure ou sensiblement égale à un dixième d'une période de consigne.

[0037] Le circuit électronique 62a comprend en outre un circuit d'alimentation 66 du dispositif de régulation, lequel a déjà été décrit précédemment.

[0038] Le procédé de régulation selon le deuxième mode de réalisation principal, mis en œuvre par le dispositif de régulation 62 et implémenté dans le circuit logique de commande 56, est exposé ci-après. Le circuit logique de commande

est agencé pour pouvoir déterminer si une dérive temporelle mesurée par le dispositif de mesure correspond à au moins une certaine avance ($CB > N1$) ou à au moins un certain retard ($CB < -N2$), $N1$ et $N2$ étant des nombres entiers positifs. Le dispositif de régulation, en particulier son circuit logique de commande, est agencé pour sélectionner, avant chaque moment de correction distinct prévu, pour la période de régulation T_{reg} telle que définie précédemment, selon qu'au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée, respectivement une première période de correction T_{cor1} qui est supérieure à la période de consigne T_{0c} ou une deuxième période de correction T_{cor2} qui est inférieure à la période de consigne, chacun des moments de correction étant prévu avec une durée suffisante à l'établissement d'une phase synchrone dans laquelle la fréquence de l'oscillateur mécanique est synchronisée soit sur une première fréquence de correction $F_{cor1} = 1/T_{cor1}$ lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive est détectée avant le moment considéré, soit sur une deuxième fréquence de correction $F_{cor2} = 1/T_{cor2}$ lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle négative est détectée avant le moment considéré, de sorte à corriger la dérive temporelle détectée.

[0039] Dans une variante avantageuse, le circuit logique de commande 56 est agencé de manière que la distance temporelle D_T entre deux impulsions de court-circuit, dans chaque moment de correction distinct, est égale à un nombre impair $2M - 1$ multiplié par la moitié de la période de régulation T_{reg} déterminée pour chacun des moments de correction, soit une relation mathématique $D_T = (2M - 1) \cdot T_{reg}/2$, M étant un nombre entier positif supérieur à zéro, la période de régulation T_{reg} et le nombre M étant sélectionnés de manière à permettre une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de régulation $F_{reg} = 1/T_{reg}$ au cours de chacun des moments de correction.

[0040] Dans une variante particulière, lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée par le circuit logique de commande 56, le dispositif de régulation 62 est agencé pour appliquer périodiquement, durant le moment de correction suivant, une pluralité d'impulsions de régulation correspondante avec respectivement une première fréquence de déclenchement $F_{INF} = 2 \cdot F_{cor1} / N$ ou une deuxième fréquence de déclenchement $F_{SUP} = 2 \cdot F_{cor2} / N$. Le nombre N est de préférence prévu constant au cours de chaque moment de correction et il est soit prédéterminé, soit déterminé avant le moment de correction suivant considéré.

[0041] De manière à assurer la synchronisation voulue au cours de chacun des moments de correction, il est avantageusement prévu que, pour chacun des moments de correction où intervient la première fréquence de déclenchement F_{INF} , cette dernière est prévue supérieure à une première fréquence limite $F_{L1}(N, K) = [(K - 1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c} / N$ avec $K > 40 \cdot N$, et, pour chacun des moments de correction où intervient la deuxième fréquence de déclenchement F_{SUP} , cette dernière est prévue inférieure à une deuxième fréquence limite $F_{L2}(N, K) = [(K + 1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c} / N$ avec $K > 40 \cdot N$.

[0042] Dans une variante spécifique, le nombre entier N est prévu plus petit dans une phase initiale que dans une phase finale de chacun des moments de correction, de manière à diminuer au mieux la phase transitoire initiale.

[0043] Dans une variante préférée, lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée par le circuit logique de commande 56, le dispositif de régulation 62 est agencé pour appliquer périodiquement, durant le moment de correction suivant, une pluralité d'impulsions de régulation correspondante avec respectivement une première fréquence de déclenchement $F_{INF} = 2 \cdot F_{cor1} / (2M - 1)$ ou une deuxième fréquence de déclenchement $F_{SUP} = 2 \cdot F_{cor2} / (2M - 1)$. En particulier, le nombre M est prévu constant au cours de chaque moment de correction et il est soit prédéterminé, soit déterminé avant le moment de correction suivant considéré.

[0044] De manière à assurer la synchronisation voulue au cours de chacun des moments de correction, il est avantageusement prévu que, pour chacun des moments de correction où intervient la première fréquence de déclenchement F_{INF} , cette dernière est prévue supérieure à une première fréquence limite $F_{L1}(M, K) = [(K - 1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c} / (2M - 1)$ avec $K > 40 \cdot (2M - 1)$, et, pour chacun des moments de correction où intervient la deuxième fréquence de déclenchement F_{SUP} , cette dernière est prévue inférieure à une deuxième fréquence limite $F_{L2}(M, K) = [(K + 1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c} / (2M - 1)$ avec $K > 40 \cdot (2M - 1)$.

[0045] Dans une variante spécifique, de manière à diminuer au mieux la phase transitoire initiale dans chaque moment de correction, il est prévu de déterminer le début d'une première impulsion de régulation, parmi la pluralité d'impulsions de régulation prévue pour le moment de correction considéré, relativement à la position angulaire de l'oscillateur mécanique. A cet effet, le signal «Comp» est aussi fourni au circuit logique de commande 56. Dans cette variante spécifique, la première impulsion de régulation est déclenchée par un flanc montant ou un flanc descendant du signal «Comp».

[0046] A l'aide de la fig. 10, on décrira un mode de réalisation préféré du spiral piézoélectrique 70 de la pièce d'horlogerie selon l'invention. Ce spiral 70, représenté en coupe transversale, comprend un corps central 72 en silicium, une couche d'oxyde de silicium 74 déposée en surface du corps central de manière à compenser thermiquement le spiral, une couche conductrice 76 déposée sur la couche d'oxyde de silicium, et un matériau piézoélectrique déposé sous forme d'une couche piézoélectrique 78 sur la couche conductrice 76. Deux électrodes 20a et 22a sont agencées sur la couche piézoélectrique 78 respectivement des deux côtés latéraux du spiral (les deux électrodes pouvant recouvrir en partie les côtés inférieur et supérieur du spiral sans toutefois se rejoindre).

[0047] Dans la variante particulière représentée à la fig. 10, la première partie 80a et la deuxième partie 80b de la couche piézoélectrique s'étendant respectivement sur les deux côtés latéraux du corps central 72 présentent, de par leur croissance depuis la couche conductrice 76, des structures cristallographiques respectives qui sont symétriques relativement à un plan médian 84 parallèle à ces deux côtés latéraux. Ainsi, dans les deux parties latérales 80a et 80b, la couche

piézoélectrique présente deux mêmes axes piézoélectriques respectifs 82a, 82b qui sont perpendiculaires à la couche piézoélectrique et de sens opposés. On a donc une inversion du signe de la tension induite entre l'électrode interne et chacune des deux électrodes latérales externes pour une même contrainte mécanique. Or, lorsque le spiral se contracte ou se dilate depuis sa position de repos, il y a une inversion de la contrainte mécanique entre les première et deuxième parties 80a et 80b, c'est-à-dire que l'une de ces parties subit une compression alors que l'autre de ces parties subit une traction, et inversement. Au final il résulte de ces considérations que les tensions induites dans les première et deuxième parties présentent, selon un axe perpendiculaire aux deux côtés latéraux, une même polarité de sorte que la couche conductrice 76 peut former une seule et même électrode interne qui s'étend des deux côtés latéraux du corps central 72, cette électrode interne n'ayant pas de liaison électrique propre avec le dispositif de régulation. Dans une variante particulière, la couche piézoélectrique est constituée d'un cristal de nitrure d'aluminium formé par une croissance de ce cristal depuis la couche conductrice 76 (électrode interne) et perpendiculairement à celle-ci.

Revendications

1. Pièce d'horlogerie comprenant un mouvement mécanique qui est muni d'un oscillateur mécanique formé par un balancier (4) et un spiral (8; 70), cet oscillateur mécanique ayant une fréquence de consigne F_{0c} prédéfinie et étant agencé pour cadencer la marche de la pièce d'horlogerie, cette pièce d'horlogerie comprenant en outre un dispositif de régulation (52, 62) agencé pour pouvoir réguler la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique et comprenant une base de temps auxiliaire (42, 44), formée par un oscillateur électronique auxiliaire et fournissant un signal de référence (S_{Ret}), le spiral étant formé au moins partiellement par un matériau piézoélectrique et par au moins deux électrodes (20, 22; 20a, 22a) agencées de manière à pouvoir présenter entre elles une tension induite $U(t)$ par ledit matériau piézoélectrique lorsque ce dernier est mis sous contrainte mécanique lors d'une oscillation de l'oscillateur mécanique, les deux électrodes étant reliées électriquement au dispositif de régulation qui est agencé pour pouvoir varier l'impédance du système de régulation, lequel est formé par ledit matériau piézoélectrique, lesdites au moins deux électrodes et le dispositif de régulation; caractérisée en ce que le dispositif de régulation (62) est agencé de manière à pouvoir varier momentanément la résistance électrique engendrée par ce dispositif de régulation entre lesdites deux électrodes, pour pouvoir engendrer au moins par moments des impulsions de régulation qui sont distinctes et ont chacune une certaine durée (T_P), chaque impulsion de régulation consistant en une diminution momentanée de ladite résistance électrique relativement à une résistance électrique nominale qui est engendrée par le dispositif de régulation entre lesdites deux électrodes en dehors desdites impulsions de régulation distinctes, le dispositif de régulation étant agencé pour pouvoir appliquer une pluralité de dites impulsions de régulation durant chacun desdits moments, de manière que deux impulsions de régulation successives quelconques parmi chaque pluralité d'impulsions de régulation présentent entre leurs débuts une distance temporelle D_T égale à un nombre N multiplié par la moitié d'une période de régulation T_{reg} déterminée pour chacun desdits moments, soit une relation mathématique $D_T = N \cdot T_{reg} / 2$, N étant un nombre entier positif supérieur à zéro, la période de régulation T_{reg} et le nombre N étant sélectionnés de manière à permettre une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de régulation $F_{reg} = 1/T_{reg}$ au cours de chacun desdits moments, le dispositif de régulation étant agencé pour déterminer au moyen de la base de temps de référence le début de chacune desdites impulsions de régulation, de manière à satisfaire ladite relation mathématique entre ladite distance temporelle et la période de régulation, et pour ainsi déterminer la fréquence de régulation.
2. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comprend en outre un dispositif de mesure (54, CB) d'une dérive temporelle dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique relativement à sa fréquence de consigne F_{0c} , et en ce que le dispositif de régulation (62) est agencé pour sélectionner, avant chacun desdits moments, pour ladite période de régulation T_{reg} , selon qu'au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée par le dispositif de régulation, respectivement une première période de correction T_{cor1} qui est supérieure à une période de consigne T_{0c} , égale à l'inverse de la fréquence de consigne, ou une deuxième période de correction T_{cor2} qui est inférieure à la période de consigne, chacun desdits moments étant prévu avec une durée suffisante à l'établissement d'une phase synchrone dans laquelle la fréquence de l'oscillateur mécanique est synchronisée soit sur une première fréquence de correction $F_{cor1} = 1/T_{cor1}$ lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive est détectée avant le moment considéré, soit sur une deuxième fréquence de correction $F_{cor2} = 1/T_{cor2}$ lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle négative est détectée avant le moment considéré.
3. Pièce d'horlogerie selon la revendication 2, caractérisée en ce que la distance temporelle D_T est égale à un nombre impair $2M - 1$ multiplié par la moitié de la période de régulation T_{reg} déterminée pour chacun desdits moments, soit une relation mathématique $D_T = (2M - 1) \cdot T_{reg} / 2$, M étant un nombre entier positif supérieur à zéro, la période de régulation T_{reg} et le nombre M étant sélectionnés de manière à permettre une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur une fréquence de régulation $F_{reg} = 1/T_{reg}$ au cours de chacun desdits moments.
4. Pièce d'horlogerie selon la revendication 2, caractérisée en ce que, lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée, le dispositif de régulation (62) est agencé pour appliquer périodiquement, durant le moment suivant parmi lesdits moments, la pluralité d'impulsions de régulation correspondante avec respectivement une première fréquence de déclenchement $F_{INF} = 2 \cdot F_{cor1} / N$ ou une deuxième fréquence de déclenchement

$F_{SUP} = 2 \cdot F_{cor2}/N$, le nombre N étant prévu constant au cours de chacun desdits moments et il est soit prédéterminé, soit déterminé avant le moment suivant considéré.

5. Pièce d'horlogerie selon la revendication 3, caractérisée en ce que, lorsque ladite au moins une certaine dérive temporelle positive ou négative est détectée, le dispositif de régulation (62) est agencé pour appliquer périodiquement, durant le moment suivant parmi lesdits moments, la pluralité d'impulsions de régulation correspondante avec respectivement une première fréquence de déclenchement $F_{INF} = 2 \cdot F_{cor1}/(2M - 1)$ ou une deuxième fréquence de déclenchement $F_{SUP} = 2 \cdot F_{cor2}/(2M - 1)$, le nombre M étant prévu constant au cours de chacun desdits moments et il est soit prédéterminé, soit déterminé avant le moment suivant considéré.
6. Pièce d'horlogerie selon la revendication 4, caractérisée en ce que, pour chacun desdits moments où intervient la première fréquence de déclenchement F_{INF} , cette dernière est prévue supérieure à une première fréquence limite $F_{L1}(N, K) = [(K-1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c}/N$ avec $K > 40 \cdot N$, et, pour chacun desdits moments où intervient la deuxième fréquence de déclenchement F_{SUP} , cette dernière est prévue inférieure à une deuxième fréquence limite $F_{L2}(N, K) = [(K + 1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c}/N$ avec $K > 40 \cdot N$.
7. Pièce d'horlogerie selon la revendication 5, caractérisée en ce que, pour chacun desdits moments où intervient la première fréquence de déclenchement F_{inf} , cette dernière est prévue supérieure à une première fréquence limite $F_{L1}(M, K) = [(K - 1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c}/(2M - 1)$ avec $K > 40 \cdot (2M - 1)$, et, pour chacun desdits moments où intervient la deuxième fréquence de déclenchement F_{SUP} , cette dernière est prévue inférieure à une deuxième fréquence limite $F_{L2}(M, K) = [(K + 1)/K] \cdot 2 \cdot F_{0c}/(2M - 1)$ avec $K > 40 \cdot (2M - 1)$.
8. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1, caractérisée en ce que lesdits moments sont contigus et forment ensemble une plage temporelle continue; et en ce que le dispositif de régulation (52) est agencé pour appliquer durant la plage temporelle continue lesdites impulsions de régulation de manière que deux impulsions de régulation successives quelconques intervenant dans cette plage temporelle continue présentent entre leurs débuts ladite distance temporelle D_T avec ladite période de régulation T_{reg} égale à une période de consigne T_{0c} , laquelle est l'inverse de la fréquence de consigne F_{0c} , de manière à pouvoir synchroniser continûment, après une éventuelle phase transitoire initiale, la fréquence de l'oscillateur mécanique sur la fréquence de consigne F_{0c} durant la plage temporelle continue.
9. Pièce d'horlogerie selon la revendication 8, caractérisée en ce que la distance temporelle D_T est égale à un nombre impair $2M - 1$ multiplié par la moitié de la période de consigne T_{0c} , soit une relation mathématique $D_T = (2M - 1) \cdot T_{0c}/2$, M étant un nombre entier positif supérieur à zéro, le nombre M étant sélectionné de manière à permettre une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur la fréquence de consigne $F_{0c} = 1/T_{0c}$ durant la plage temporelle continue après une phase transitoire initiale éventuelle.
10. Pièce d'horlogerie selon la revendication 8, caractérisée en ce que le dispositif de régulation (52) est agencé pour appliquer, durant la plage temporelle continue, périodiquement les impulsions de régulation avec une fréquence de déclenchement $F_D(N) = 2 \cdot F_{0c}/N$, le nombre N étant sélectionné de manière que, pour un rapport entre une fréquence de dérive maximale dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique et la fréquence de consigne compris entre $(K - 1)/K$ et $(K + 1)/K$, ce nombre $N < K/40$.
11. Pièce d'horlogerie selon la revendication 9, caractérisée en ce que le dispositif de régulation (52) est agencé pour appliquer, durant la plage temporelle continue, périodiquement les impulsions de régulation avec une fréquence de déclenchement $F_D(M) = 2 \cdot F_{0c}/(2M - 1)$, le nombre M étant sélectionné de manière que, pour un rapport entre une fréquence de dérive maximale dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique et la fréquence de consigne compris entre $(K - 1)/K$ et $(K + 1)/K$, on a $2M - 1 < K/40$.
12. Pièce d'horlogerie selon la revendication 10, caractérisée en ce que le nombre N est constant et prédéfini pour la plage temporelle continue.
13. Pièce d'horlogerie selon la revendication 11, caractérisée en ce que le nombre M est constant et prédéfini pour la plage temporelle continue.
14. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 2 à 13, caractérisée en ce que les impulsions de régulation ont chacune une durée (T_R) inférieure au quart de la période de consigne T_{0c} .
15. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 2 à 13, caractérisée en ce que la durée (T_R) desdites impulsions de régulation est inférieure ou égale à un dixième de la période de consigne T_{0c} .
16. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que le dispositif de régulation (52, 62) comprend un interrupteur (60) agencé entre les deux électrodes (20, 22) du spiral piézoélectrique, cet interrupteur étant commandé par un circuit de commande (56, 64) qui est agencé pour fermer momentanément cet interrupteur durant lesdites impulsions de régulation de manière à le rendre passant/conducteur, ces impulsions de régulation définissant alors des impulsions de court-circuit.
17. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que ledit spiral (70) comprend un corps central (72) en silicium, une couche d'oxyde de silicium (74) déposée en surface dudit corps central de manière à compenser thermiquement le spiral, une couche conductrice (76) déposée sur la couche d'oxyde de silicium, et ledit matériau piézoélectrique déposé sous forme d'une couche piézoélectrique (78) sur ladite couche

conductrice, lesdites deux électrodes (20a, 20b) étant agencées sur la couche piézoélectrique respectivement des deux côtés latéraux du spiral.

18. Pièce d'horlogerie selon la revendication 17, caractérisée en ce que des première et deuxième parties (80a, 80b) de la couche piézoélectrique, qui s'étendent respectivement sur les deux côtés latéraux dudit corps central (72), présentent des structures cristallographiques respectives qui sont symétriques relativement à un plan médian (84) parallèle à ces deux côtés latéraux; et en ce que ladite couche conductrice (76) forme une seule et même électrode interne qui s'étend sur les deux côtés latéraux du corps central, cette électrode interne n'ayant pas de liaison électrique propre avec le dispositif de régulation.
19. Pièce d'horlogerie selon la revendication 18, caractérisée en ce que ladite couche piézoélectrique (78) est constituée d'un cristal de nitrure d'aluminium formé par une croissance de ce cristal perpendiculairement à ladite couche conductrice (76) et depuis cette couche conductrice.
20. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que le dispositif de régulation comprend ou est associé à un circuit d'alimentation (66), formé d'un redresseur (68) d'une tension induite $U(t)$ entre les deux électrodes du spiral piézoélectrique lorsque le résonateur mécanique oscille et agencé pour alimenter le dispositif de régulation, de sorte que le dispositif de régulation avec le circuit d'alimentation forment une unité autonome; et en ce que ladite unité autonome est supportée par le balancier auquel elle est fixée.

Fig. 1
(Art antérieur)

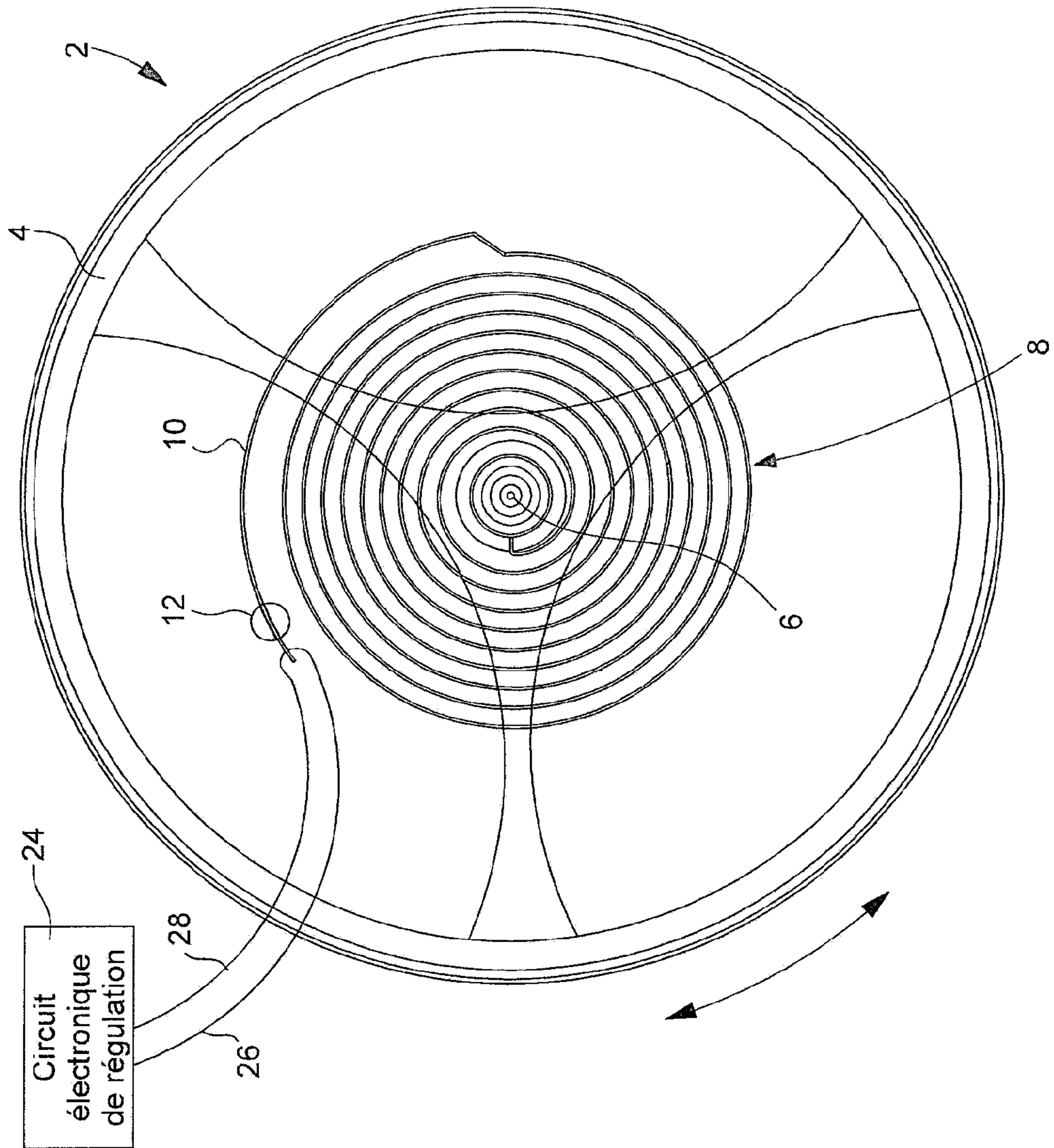


Fig. 2
(Art antérieur)

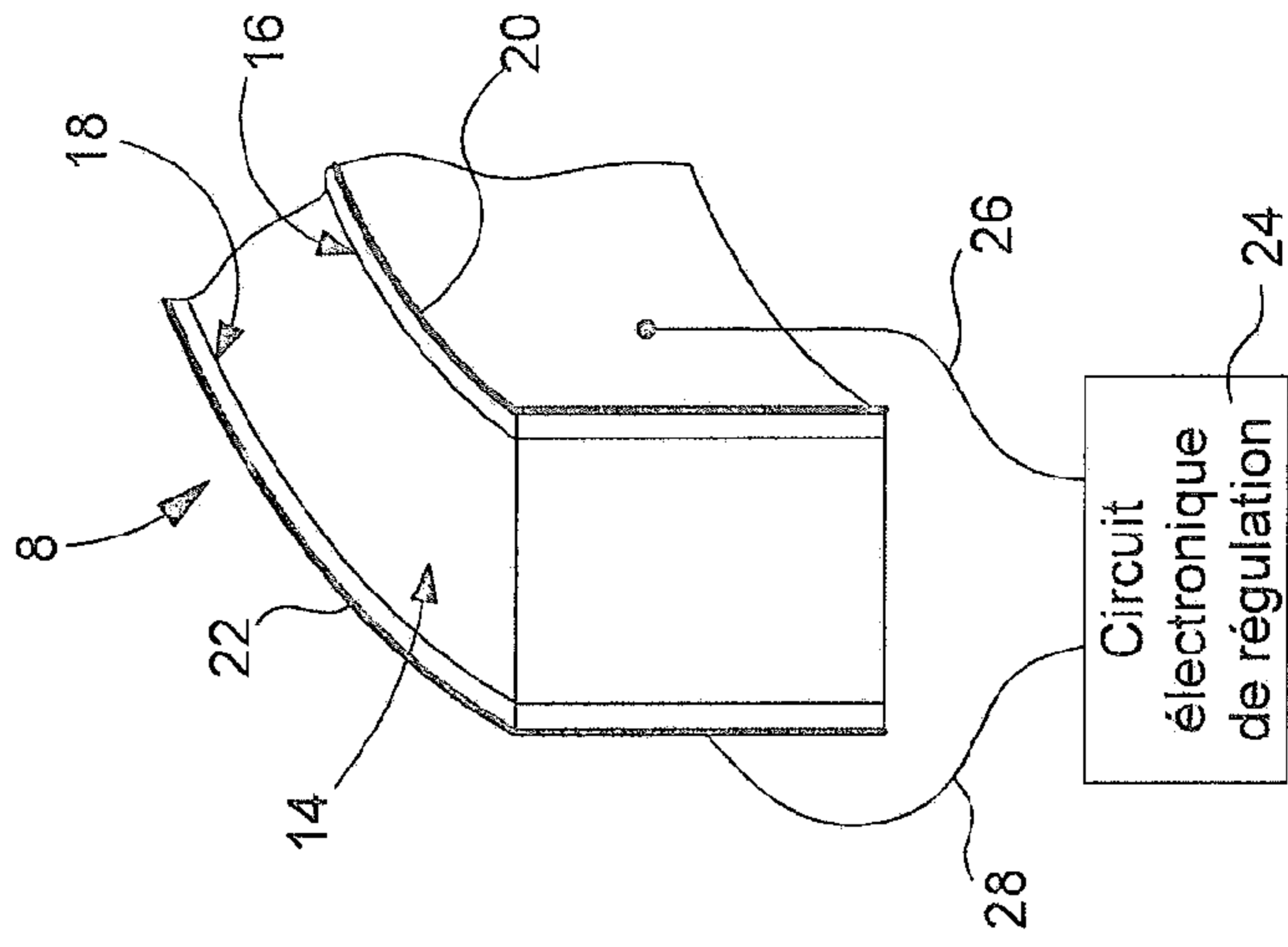


Fig. 3
(Art Antérieur)

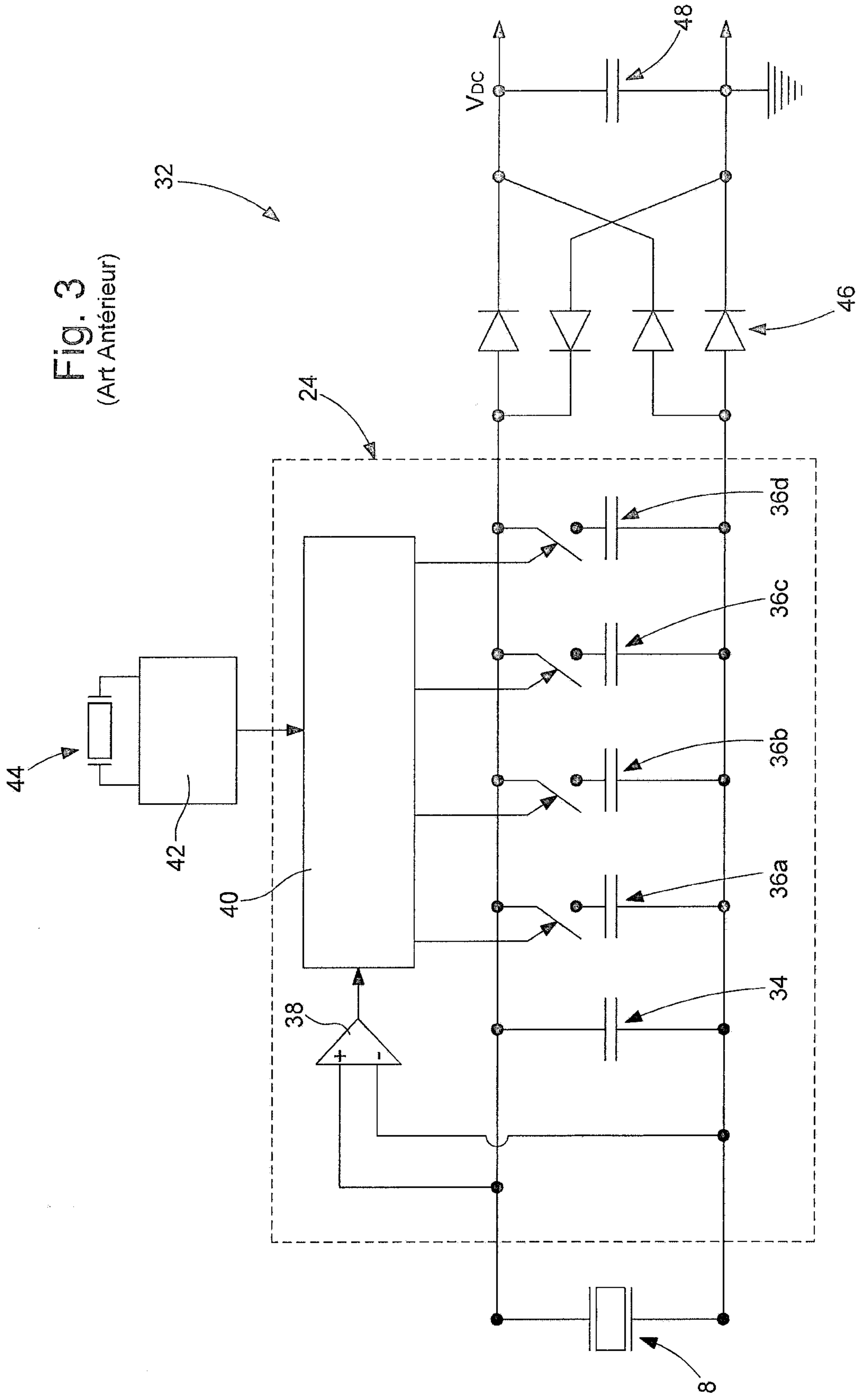


Fig. 4
(Art antérieur)

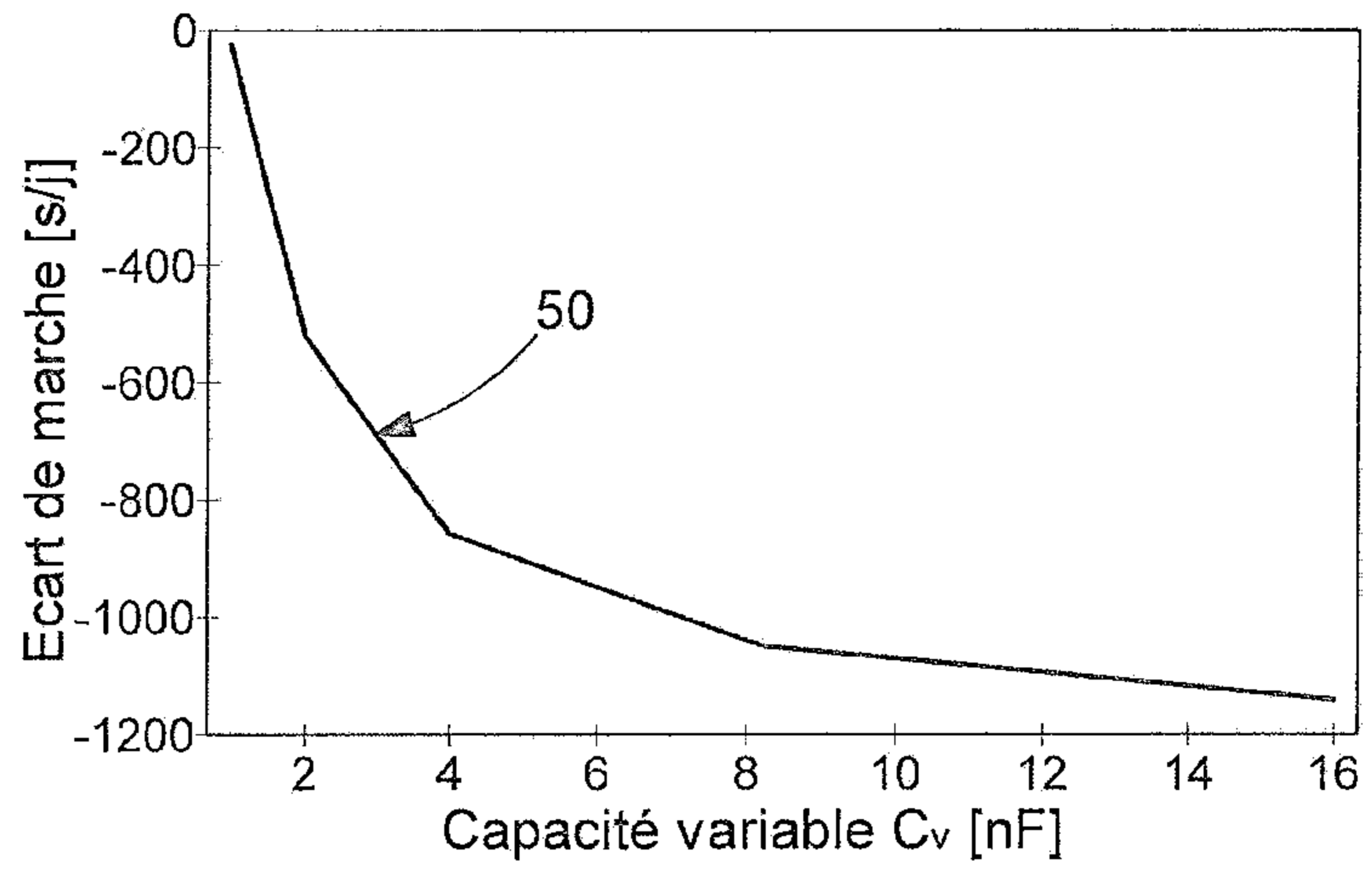


Fig. 6

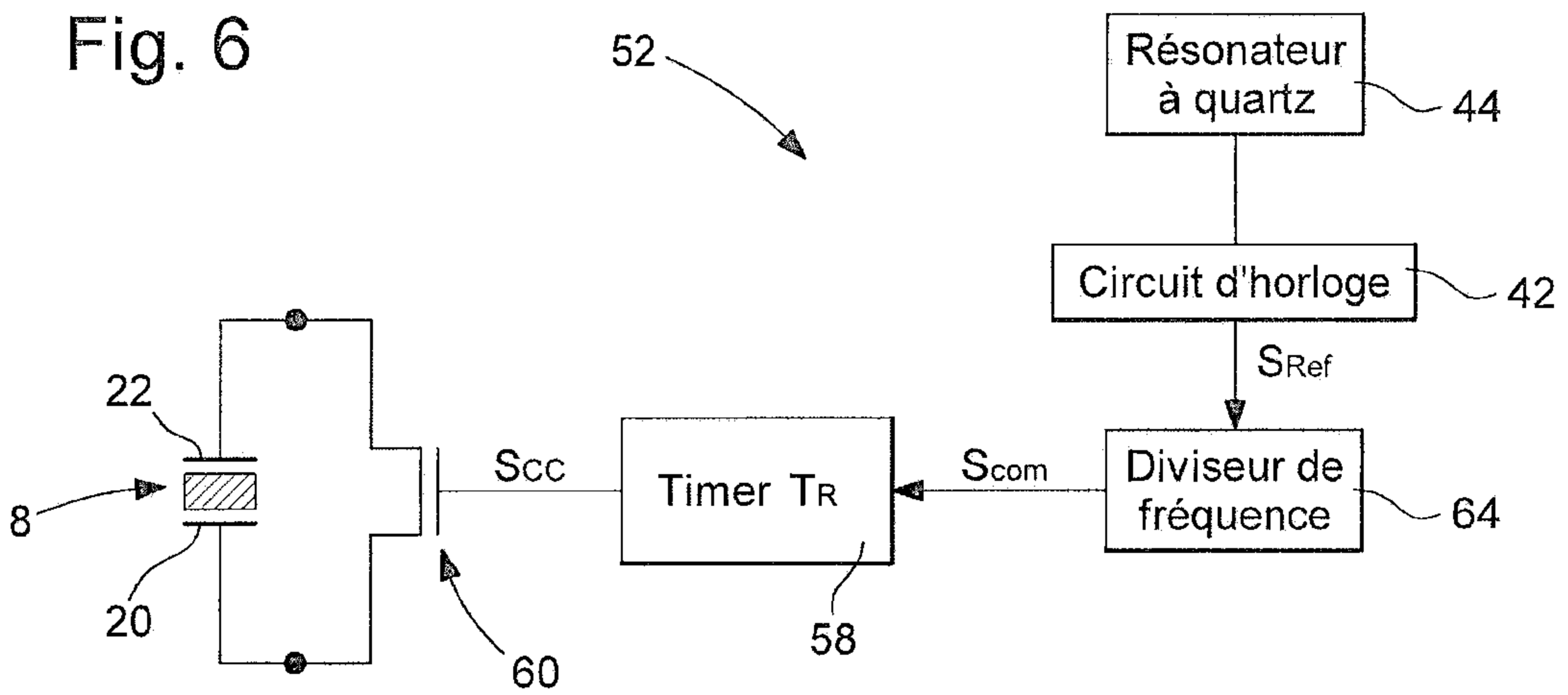


Fig. 7

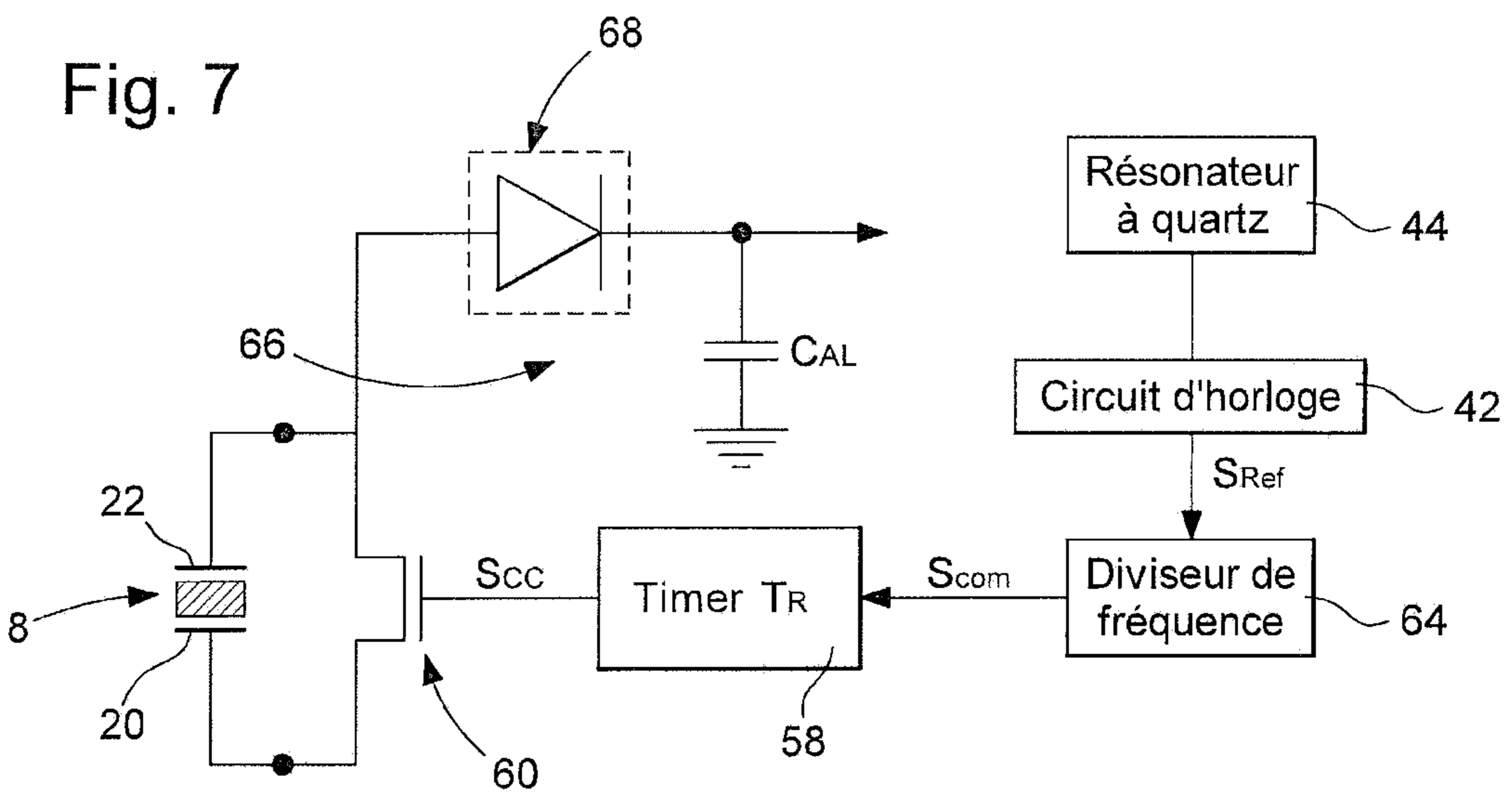
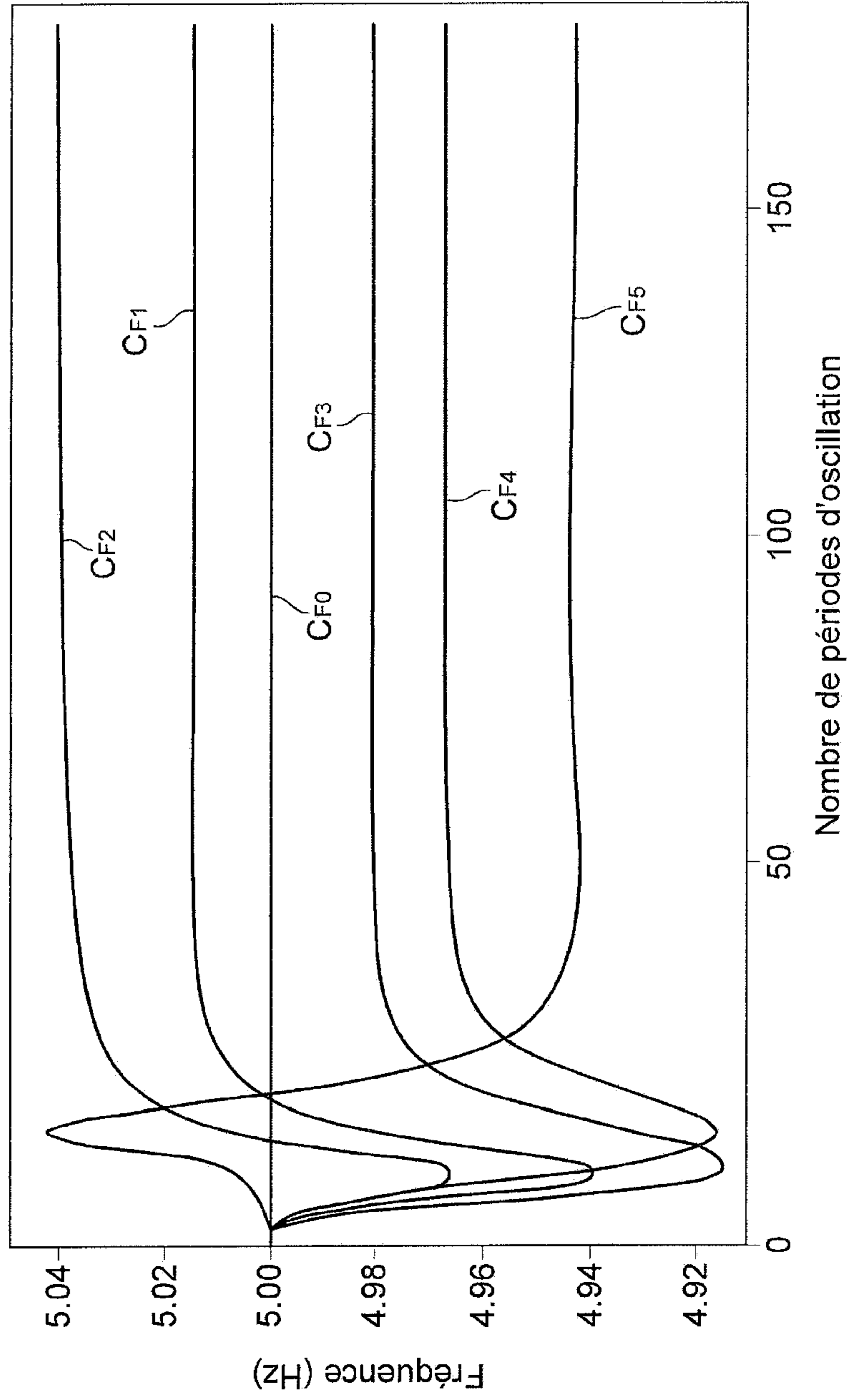


Fig. 5



CF0: $F_{D0} = 10.00$ Hz
 $F_{S0} = 5.00$ Hz

CF1: $F_{D1} = 10.03$ Hz
 $F_{S1} = 5.015$ Hz

CF2: $F_{D2} = 10.08$ Hz
 $F_{S2} = 5.04$ Hz

CF3: $F_{D3} = 9.96$ Hz
 $F_{S3} = 4.98$ Hz

CF4: $F_{D4} = 9.94$ Hz
 $F_{S4} = 4.97$ Hz

CF5: $F_{D5} = 9.88$ Hz
 $F_{S5} = 4.94$ Hz

Fig. 8

