



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
01.04.2020 Bulletin 2020/14

(51) Int Cl.:
G04C 3/04 (2006.01) G04C 11/08 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **19193740.8**

(22) Date de dépôt: **27.08.2019**

(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 MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(71) Demandeur: **The Swatch Group Research and Development Ltd**
2074 Marin (CH)

(72) Inventeurs:
• **Tombez, Lionel**
2022 Bevaix (CH)
• **IMBODEN, Matthias**
2072 St-Blaise (CH)

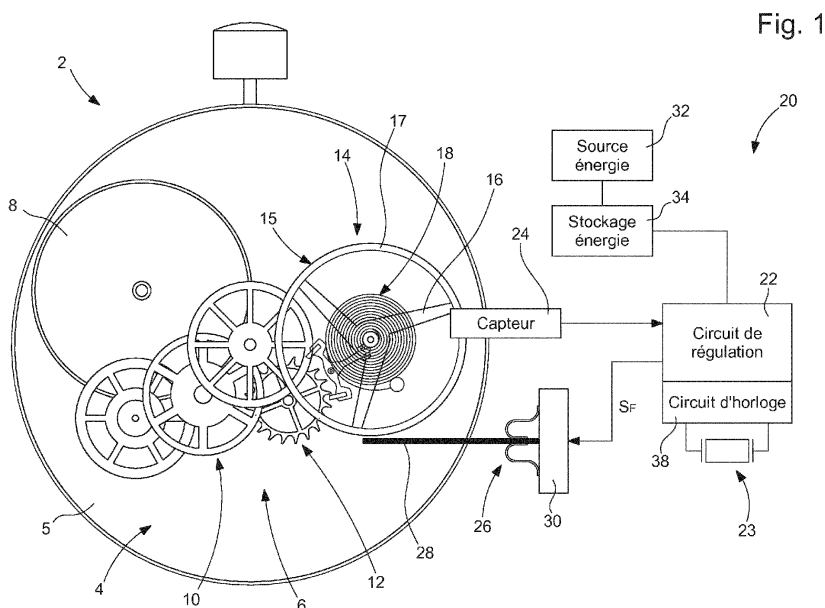
(30) Priorité: **27.09.2018 EP 18197282**

(74) Mandataire: **ICB SA**
Faubourg de l'Hôpital, 3
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **ENSEMBLE HORLOGER COMPRENANT UN OSCILLATEUR MECANIQUE ASSOCIE A UN DISPOSITIF ELECTRONIQUE DE REGULATION DE SA FREQUENCE MOYENNE**

(57) La pièce d'horlogerie (2) est munie d'un mouvement mécanique (4) qui comprend un résonateur mécanique (14), un capteur (24) détectant les oscillations du résonateur mécanique, et un dispositif de freinage (26) agencé pour générer des impulsions de freinage en réponse à un signal de commande (S_F) fourni par un circuit de régulation (22) associé à un oscillateur auxiliaire. Le circuit de régulation est agencé pour pouvoir détecter une dérive temporelle, négative ou positive, dans l'os-

cillation du résonateur mécanique et pour générer, dans une période de correction, en association avec le dispositif de freinage, lorsque la dérive temporelle correspond à au moins un certain retard, une série d'impulsions de freinage qui sont appliquées au résonateur mécanique à une fréquence F_{SUP} dans une plage de valeurs donnée et de préférence supérieure à une fréquence $F_Z(N) = 2 \cdot F_0c/N$, F_0c étant une fréquence de consigne pour le résonateur mécanique et N un nombre entier positif.



Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne une pièce d'horlogerie comprenant un oscillateur mécanique dont la fréquence moyenne est synchronisée sur une fréquence de consigne déterminée par un oscillateur électronique auxiliaire. A cet effet, la pièce d'horlogerie comprend un dispositif de régulation capable de corriger une dérive temporelle éventuelle dans le fonctionnement de l'oscillateur mécanique, lequel cadence la marche du mouvement mécanique qui l'incorpore.

[0002] Plus particulièrement, la pièce d'horlogerie est munie d'un mouvement mécanique qui comprend :

- un mécanisme indicateur d'au moins une donnée temporelle,
- un résonateur mécanique susceptible d'osciller autour d'une position neutre correspondant à son état d'énergie potentielle minimale, et
- un dispositif d'entretien du résonateur mécanique formant avec ce résonateur mécanique un oscillateur mécanique qui est agencé pour cadencer la marche du mécanisme indicateur.

[0003] Cette pièce d'horlogerie est munie en outre d'un dispositif de régulation agencé pour réguler la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique et comprenant :

- un capteur pour pouvoir détecter un nombre de périodes ou d'alternances dans l'oscillation du résonateur mécanique dans une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique,
- un oscillateur auxiliaire,
- un dispositif de freinage qui est agencé pour pouvoir appliquer momentanément une force de freinage au résonateur mécanique, et
- un circuit de régulation comprenant un dispositif de mesure agencé pour pouvoir mesurer, sur la base d'un signal de détection fourni par le capteur, une dérive temporelle de l'oscillateur mécanique relativement à l'oscillateur auxiliaire, ce circuit de régulation étant agencé pour déterminer si la dérive temporelle mesurée correspond à au moins une certaine avance ou à au moins un certain retard et pour pouvoir, si c'est le cas, générer un signal de commande qui active sélectivement le dispositif de freinage en fonction de la dérive temporelle mesurée, de manière à engendrer au moins une impulsion de freinage qui est appliquée au résonateur mécanique pour corriger au moins partiellement cette dérive temporelle.

Arrière-plan technologique

[0004] Des pièces d'horlogerie du type défini ci-avant dans le domaine de l'invention ont été récemment divulguées dans les demandes de brevet CH 713306 A2 et

EP 3339982 A1.

[0005] La pièce d'horlogerie divulguée dans le document CH 713306 A2 comprend un mouvement mécanique, muni d'un oscillateur mécanique, et un système électromagnétique formé d'au moins un aimant monté sur le balancier d'un oscillateur mécanique et d'une bobine portée par un support du balancier. Le système électromagnétique fait partie d'un dispositif de régulation prévu pour réguler la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique dans le cas où cet oscillateur présente une dérive temporelle positive relativement à un oscillateur auxiliaire, par exemple un oscillateur à quartz, comme dans le cas où il présente une dérive temporelle négative. Après avoir observé qu'une impulsion de freinage, appliquée au résonateur formant l'oscillateur mécanique dans une alternance de son oscillation, engendre un déphasage négatif lorsqu'elle intervient avant le passage du résonateur par sa position neutre et un déphasage positif lorsqu'elle intervient après le passage du résonateur par sa position neutre, ce document propose une solution dans laquelle la dérive temporelle est mesurée et le mouvement d'oscillation du résonateur est observé pour que le dispositif de régulation puisse lui appliquer sélectivement une ou plusieurs impulsions de freinage, respectivement via un ou plusieurs court-circuit de la bobine, dans une ou plusieurs premières demi-alternances respectives (situées avant le passage du résonateur par sa position neutre) lorsque la dérive temporelle mesurée correspond à au moins une certaine avance et dans une ou plusieurs secondes demi-alternances respectives (situées après le passage du résonateur par sa position neutre) lorsque la dérive temporelle correspond à au moins un certain retard. Pour ce faire, le circuit électronique du dispositif de régulation comprend un compteur temporel ou un minuteur permettant de déterminer, sur la base de détections d'impulsions de tension induite dans la bobine, si une impulsion de tension induite intervient dans une première demi-alternance ou dans une seconde demi-alternance de manière à pouvoir appliquer sélectivement les impulsions de freinage comme indiqué ci-dessus. Le procédé de régulation implémenté dans ce document, bien que remarquable, requière un circuit électronique relativement complexe qui consomme donc une certaine énergie électrique qui est prise de l'oscillateur mécanique, ce qui tend à réduire son amplitude d'oscillation et donc la durée de fonctionnement normal pour une certaine énergie mécanique stockée dans un barillet du mouvement mécanique.

[0006] La pièce d'horlogerie divulguée dans le document EP 3339982 A1 est remarquable par le système prévu pour engendrer des impulsions de freinage mécanique appliquées au balancier de l'oscillateur mécanique. Cependant, le procédé de régulation s'apparente à celui du document précédent. Il est prévu un capteur agencé pour pouvoir détecter les passages du résonateur par sa position neutre. Sur la base de la connaissance de la période de consigne pour l'oscillateur mécanique et des détections opérées par le capteur, un circuit

logique de commande détermine à l'aide d'un compteur temporel les instants auxquels les impulsions de freinage doivent être déclenchées pour qu'elles interviennent sélectivement avant ou après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans des alternances correspondantes, c'est-à-dire pour appliquer les impulsions de freinage mécanique soit dans des premières demi-alternances, soit des deux secondes demi-alternances. Dans ce cas aussi, un circuit électronique relativement complexe est nécessaire.

Résumé de l'invention

[0007] Le but principal de la présente invention est de simplifier le circuit électronique du dispositif de régulation de la fréquence moyenne d'un oscillateur mécanique, en fournissant une alternative aux dispositifs de régulation de l'art antérieur, décrits dans l'arrière-plan technologique, qui soit aisée à implémenter dans une pièce d'horlogerie.

[0008] A cet effet, l'invention concerne une pièce d'horlogerie telle que définie précédemment dans le domaine de l'invention et qui est caractérisée par le fait que le circuit de régulation comprend un dispositif générateur d'au moins une fréquence qui est agencé de manière à pouvoir générer un signal digital périodique à une fréquence F_{SUP} ; et par le fait que le circuit de régulation est agencé pour pouvoir fournir, lorsqu'il détermine une dérive temporelle correspondant à au moins un certain retard dans la marche de la pièce d'horlogerie, momentanément au dispositif de freinage un premier signal de commande pour activer ce dispositif de freinage de manière que le dispositif de freinage génère, durant une première période de correction, une série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à la fréquence F_{SUP} . Cette fréquence F_{SUP} et la durée de la première période de correction sont prévues et le dispositif de freinage est agencé de manière que la série d'impulsions de freinage périodiques à la fréquence F_{SUP} puisse engendrer, au cours de la première période de correction, une phase synchrone dans laquelle l'oscillateur mécanique est synchronisé sur une fréquence de correction qui est supérieure à une fréquence de consigne F_0c prévue pour l'oscillateur mécanique.

[0009] Dans un mode de réalisation principal, la fréquence F_{SUP} est comprise dans une première plage de valeurs s'étendant entre $(M+1)/M$ et $(M+2)/M$, inclus, multipliés par une fréquence $F_Z(N)$ égale au double d'une fréquence de consigne F_0c pour l'oscillateur mécanique divisée par un nombre entier positif N , soit $[(M+1)/M] \cdot F_Z(N) < F_{SUP} \leq [(M+2)/M] \cdot F_Z(N)$ avec $F_Z(N) = 2 \cdot F_0c/N$, M étant égal à cent fois deux à la puissance K avec K égal à un nombre entier positif supérieur à zéro et inférieur à treize, soit $0 < K < 13$ et $M = 100 \cdot 2^K$, et N étant prévu inférieur à M divisé par trente, soit $N < M/30$.

[0010] Dans le cas où le circuit de régulation détermine une dérive temporelle correspondant à au moins une cer-

taine avance dans la marche de la pièce d'horlogerie, deux modes de réalisation généraux sont prévus. Dans le premier mode de réalisation général, le circuit de régulation est agencé pour pouvoir, après avoir détecté ladite au moins une certaine avance, arrêter l'oscillateur mécanique et ensuite bloquer momentanément le résonateur mécanique de manière à corriger au moins partiellement ladite au moins une certaine avance détectée.

[0011] Dans le deuxième mode de réalisation général, ledit dispositif générateur d'au moins une fréquence est un dispositif générateur de fréquences agencé de manière à pouvoir en outre générer un signal digital périodique à une fréquence F_{INF} et le circuit de régulation est agencé pour pouvoir fournir, lorsqu'il détermine une dérive temporelle correspondant à au moins une certaine avance dans la marche de la pièce d'horlogerie, momentanément au dispositif de freinage un deuxième signal de commande pour activer ce dispositif de freinage de manière que le dispositif de freinage génère, durant une deuxième période de correction, une série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à la fréquence F_{INF} . Cette fréquence F_{INF} et la durée de la deuxième période de correction sont prévues et le dispositif de freinage est agencé de manière que la série d'impulsions de freinage périodiques à la fréquence F_{INF} puisse engendrer, au cours de la deuxième période de correction, une phase synchrone dans laquelle l'oscillateur mécanique est synchronisé sur une fréquence de correction qui est inférieure à la fréquence de consigne F_0c .

[0012] La fréquence F_{INF} est avantageusement comprise dans une deuxième plage de valeurs s'étendant entre $(M-2)/M$, inclus, et $(M-1)/M$ multipliés par la fréquence $F_Z(N)$, soit $[(M-2)/M] \cdot F_Z(N) \leq F_{INF} < [(M-1)/M] \cdot F_Z(N)$.

[0013] Dans une variante principale du deuxième mode de réalisation général, le circuit de régulation est agencé pour pouvoir fournir, chaque fois que le circuit de mesure détermine une dérive temporelle correspond à au moins une certaine avance ou à au moins un certain retard, momentanément au dispositif de freinage un signal de commande qui est sélectivement formé par :

- un premier signal d'activation périodique du dispositif de freinage, qui est déterminé par ledit signal digital périodique à ladite fréquence F_{INF} , lorsque la dérive temporelle correspond à ladite au moins une certaine avance, de manière à générer une première série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à la fréquence F_{INF} , et
- un deuxième signal d'activation périodique du dispositif de freinage, qui est déterminé par ledit signal digital périodique à ladite fréquence F_{SUP} , lorsque la dérive temporelle correspond audit au moins un certain retard, de manière à générer une deuxième série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à la fréquence

F_{SUP} .

[0014] En particulier, les impulsions de freinage ont une durée T_P inférieure à au quart d'une période de consigne T_{0c} , soit $T_P < T_{0c}/4$, T_{0c} étant par définition l'inverse de la fréquence de consigne F_{0c} .

[0015] Dans une variante préférée, le nombre entier positif K est supérieur à deux et inférieur à dix, soit $2 < K < 10$, et le nombre N est inférieur au nombre M divisé par cent ($N < M/100$).

[0016] Dans une variante générale, le circuit de régulation est agencé de manière que le signal de commande est fourni au dispositif de freinage, chaque fois que ce circuit de régulation détermine que la dérive temporelle correspond à ladite au moins une certaine avance ou audit au moins un certain retard, durant une période de correction au cours de laquelle la fréquence de l'oscillateur mécanique est synchronisée respectivement sur une première fréquence de correction F_{cor1} qui est dans ladite deuxième plage de valeurs calculée avec $F_z (N=2) = F_{0c}$ ou sur une deuxième fréquence de correction F_{cor2} qui est dans ladite première plage de valeurs calculée avec $F_z (N=2) = F_{0c}$.

[0017] Dans une variante préférée, la durée de la phase synchrone est prévue largement supérieure à une durée maximale d'une phase transitoire intervenant généralement au début des périodes de correction avant la phase synchrone.

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 Figure 1 montre, en partie schématiquement, un premier mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie selon l'invention ;
- La Figure 2 montre le schéma du circuit électronique d'une variante du dispositif de régulation du premier mode de réalisation ;
- La Figure 3 est un organigramme d'un mode de fonctionnement du dispositif de régulation de la Figure 2 implémenté dans son circuit logique de commande ;
- La Figure 4 donne, pour un premier mode de régulation selon l'invention mis en oeuvre dans le premier mode de réalisation de l'invention et dans le cas d'une pièce d'horlogerie dont le mécanisme indicateur d'une donnée temporelle présente de l'avance, des graphes représentant l'évolution temporelle de la position angulaire du résonateur mécanique, une première série d'impulsions de freinage appliquées à ce résonateur mécanique, dans une période de correction, en fonction d'une dérive temporelle également représentée, ainsi qu'un graphe de l'évolution de la fréquence instantanée de l'oscillateur mécanique dans une zone temporelle englobant la période de correction considérée ;

- La Figure 5 donne, pour le premier mode de régulation et dans le cas d'une pièce d'horlogerie dont le mécanisme indicateur d'une donnée temporelle présente du retard, des graphes représentant l'évolution temporelle de la position angulaire du résonateur mécanique, une deuxième série d'impulsions de freinage appliquées à ce résonateur mécanique, dans une période de correction, en fonction d'une dérive temporelle également représentée, ainsi qu'un graphe de l'évolution de la fréquence instantanée de l'oscillateur mécanique dans une zone temporelle englobant la période de correction considérée ;
- La Figure 6 montre, en partie schématiquement, un deuxième mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie selon l'invention ;
- La Figure 7 montre le résonateur mécanique et un dispositif de freinage électromagnétique formant le dispositif de régulation du deuxième mode de réalisation ;
- La Figure 8 montre le schéma du circuit électronique d'une variante du dispositif de régulation du deuxième mode de réalisation ; et
- La Figure 9 donne, dans le cadre du deuxième mode de réalisation, les graphes de la position angulaire du résonateur mécanique sur une période d'oscillation, de la tension induite dans une bobine du dispositif de freinage électromagnétique et d'un intervalle de temps distinct au cours duquel un court-circuit est appliqué à la bobine, dans un régime stable d'une synchronisation entre un générateur de fréquence du dispositif de régulation et le résonateur mécanique oscillant qui est obtenue au cours d'une série d'impulsions de freinage appliquées au résonateur mécanique.

Description détaillée de l'invention

[0019] A la Figure 1 est représentée une pièce d'horlogerie selon la présente invention. Hormis l'agencement du circuit de régulation et du mode de fonctionnement de ce circuit de commande, lequel met en oeuvre un procédé de régulation selon la présente invention, cette pièce d'horlogerie correspond essentiellement au premier mode de réalisation de la pièce d'horlogerie décrit dans le document EP 3 339 982 à l'aide des figures 1 et 2 de ce document, de sorte qu'on se référera à l'enseignement de ce document et que toutes les variantes de réalisation ne seront pas décrites ici.

[0020] La pièce d'horlogerie 2 comprend un mouvement horloger mécanique 4 qui incorpore un mécanisme 6 agencé pour indiquer au moins une donnée temporelle, un résonateur mécanique 14, formé par un balancier 16 monté pivotant sur la platine 5 et un spiral 18, et un dispositif d'entretien du résonateur mécanique formant avec ce résonateur mécanique un oscillateur mécanique qui cadence la marche du mécanisme indicateur d'une donnée temporelle. Le dispositif d'entretien comprend un

échappement 12, formé par une ancre et une roue d'échappement qui est reliée cinématiquement au barillet 8 par l'intermédiaire du rouage 10. Le résonateur mécanique est susceptible d'osciller le long d'un axe d'oscillation, ici un axe géométrique circulaire, autour d'une position neutre correspondant à un état d'énergie potentielle mécanique minimale. Chaque oscillation du résonateur mécanique définit une période d'oscillation et deux alternances.

[0021] La pièce d'horlogerie 2 comprend en outre un dispositif pour réguler la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique, ce dispositif de régulation 20 comprenant un circuit électronique de régulation 22 qui est associé à une base de temps de référence constituée par un oscillateur auxiliaire 36. Cet oscillateur auxiliaire est formé par un résonateur à quartz 23 et un circuit d'horloge 38 qui entretient le résonateur à quartz et reçoit de ce dernier un signal de fréquence de référence que ce circuit d'horloge fournit en sortie sous la forme d'un signal périodique digital de référence S_Q . On notera que d'autres types d'oscillateurs auxiliaires peuvent être prévus, notamment un oscillateur intégré entièrement dans le circuit de régulation. Par définition, l'oscillateur auxiliaire est plus précis que l'oscillateur mécanique. Le dispositif de régulation 20 comprend aussi un capteur 24 pour détecter au moins une position angulaire du balancier lorsqu'il oscille, permettant de détecter, pour une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, un nombre d'alternances ou de périodes dans l'oscillation du résonateur mécanique. Le dispositif de régulation comprend encore un dispositif de freinage mécanique 26 agencé pour pouvoir appliquer momentanément une force de freinage au résonateur mécanique 14, en particulier des impulsions de freinage mécanique à son balancier. Finalement, l'ensemble horloger comprend une source d'énergie 32 associée à un dispositif 34 de stockage de l'énergie électrique engendrée par la source d'énergie. La source d'énergie est par exemple formée par une cellule photovoltaïque ou par un élément thermoélectrique, ces exemples n'étant nullement limitatifs. Dans le cas d'une pile, la source d'énergie et le dispositif de stockage forment ensemble un seul et même composant électrique.

[0022] De manière générale, le dispositif de régulation 20 comprend aussi un dispositif de mesure agencé pour mesurer, sur la base de signaux de position fournis par le capteur, une dérive temporelle D_T de l'oscillateur mécanique relativement à l'oscillateur auxiliaire (base de temps de référence 36). On comprend qu'une telle mesure est aisée dès lors qu'il est prévu un capteur capable de détecter le passage du résonateur mécanique par une certaine position angulaire, notamment par sa position neutre. Un tel événement a lieu dans toutes les alternances (demi-périodes d'oscillation) de l'oscillateur mécanique. Le circuit de mesure sera décrit plus en détails par la suite.

[0023] Le capteur 24 est agencé pour pouvoir détecter le passage d'au moins un point de référence du balancier

16 par une certaine position angulaire donnée relativement à un support de ce résonateur mécanique. Dans une variante avantageuse, le capteur est agencé pour détecter le passage du résonateur mécanique par sa position neutre. On notera que, dans cette variante, le capteur peut être associé à l'ancre de l'échappement de manière à détecter le basculement de cette ancre lors des impulsions d'entretien de l'oscillation qui sont prévues sensiblement lorsque le résonateur mécanique passe par sa position neutre.

[0024] Dans une variante particulière, le capteur 24 est un capteur optique, du type photoélectrique, qui comprend une source de lumière, agencée de manière à pouvoir envoyer un faisceau de lumière en direction du balancier, et un détecteur de lumière, agencé pour recevoir en retour un signal lumineux dont l'intensité varie périodiquement en fonction de la position du balancier. Par exemple, le faisceau est envoyé sur la surface latérale 15 de la serge 17, cette surface présentant une zone limitée avec une réflectivité différente des deux zones avoisinantes, de sorte que le capteur peut détecter le passage de cette zone limitée et fournir au dispositif de régulation un signal de position lorsque cet événement se produit. On comprendra que la surface circulaire présentant une réflexion variable pour le faisceau de lumière peut être située à d'autres endroits du balancier. La variation peut dans un cas particulier être produite par un trou dans la surface réfléchissante. Le capteur peut aussi détecter le passage d'une certaine partie du balancier, par exemple un bras, la position neutre correspondant par exemple au milieu d'un signal réfléchi par ce bras. On comprend donc que la modulation du signal lumineux permet de détecter de diverses manières au moins une position angulaire du balancier, par une variation négative ou positive de la lumière captée. Dans d'autres variantes, le capteur de position peut être du type capacitif ou du type inductif et être ainsi agencé de manière à pouvoir détecter une variation de capacité, respectivement d'inductance en fonction de la position du balancier. Le capteur comprend des moyens pour convertir le signal lumineux analogique en un signal digital S_C . Il peut aussi comprendre une bascule qui permet de diviser par deux la fréquence du signal lumineux lorsque celui-ci intervient une fois par alternance, de sorte que le signal S_C corresponde à la fréquence d'oscillation F_0 de l'oscillateur mécanique. L'homme du métier connaît de nombreux capteurs qui pourront aisément être incorporés dans l'ensemble horloger selon l'invention.

[0025] Le dispositif de freinage mécanique 26 est agencé pour pouvoir appliquer au balancier 16 des impulsions de freinage mécanique de manière à réguler la fréquence de l'oscillateur mécanique lorsqu'une certaine dérive temporelle D_T de cet oscillateur mécanique est constatée. Dans une variante avantageuse, un couple de freinage appliqué au résonateur mécanique par une quelconque impulsion de freinage mécanique est prévu inférieur à un couple de blocage de l'oscillateur mécanique et la durée des impulsions de freinage est prévue

de manière à prendre au maximum une certaine énergie au résonateur mécanique de sorte que l'amplitude de l'oscillation demeure supérieure à une valeur minimale donnée. En d'autres termes, le couple de freinage est prévu inférieur au couple exercé par le spiral à l'amplitude minimale prévue et la durée des impulsions est telle que cette amplitude minimale soit respectée pour un couple de force minimal prédéfini qui est exercé par le barillet (à noter que l'oscillateur mécanique est entretenu par le barillet via l'échappement), ceci afin de ne pas bloquer momentanément le mouvement d'oscillation du résonateur mécanique durant les impulsions de freinage et de maintenir l'oscillateur mécanique dans sa plage de fonctionnement utile dès que le barillet exerce un couple de force supérieur au couple de force minimal prévu. Dans une autre variante plus générale, on peut appliquer un couple de freinage supérieur au couple exercé par le spiral à l'amplitude minimale prévue, mais la durée des impulsions est déterminée, en tenant compte de l'entretien de l'oscillateur mécanique, de sorte que cette amplitude minimale soit maintenue pour le couple de force minimal du barillet à partir duquel il est prévu que la pièce d'horlogerie soit fonctionnelle et pour toute position angulaire du résonateur mécanique lors de l'application d'une impulsion de freinage. On remarquera que l'énergie prélevée au résonateur mécanique est maximale lorsque l'impulsion de freinage intervient lors du passage de ce résonateur par sa position neutre.

[0026] A la Figure 1, le dispositif de freinage mécanique est formé par un actionneur 26 qui comprend un organe de freinage mécanique 28 agencé pour être actionné, en réponse à un signal de commande S_F fourni par le circuit de régulation au circuit de commande 30 de cet actionneur, de manière à exercer, durant les impulsions de freinage, un couple de freinage mécanique sur une surface de freinage 15 du balancier pivotant 16. Dans la variante représentée, la surface de freinage est circulaire et définie par la surface latérale externe de la serge 17 du balancier. L'organe de freinage mécanique 28 comprend une partie mobile (définie par l'extrémité libre de cet organe) qui définit un patin de freinage agencé de manière à pouvoir venir exercer une certaine pression contre la surface de freinage circulaire lors de l'application des impulsions de freinage au résonateur mécanique.

[0027] L'actionneur 26 comprend un élément piézoélectrique alimenté par un le circuit de commande 30 qui lui applique une tension électrique d'activation en fonction du signal de commande S_F fourni par le circuit de régulation 22. Lorsque l'élément piézoélectrique est mis momentanément sous tension, l'organe de freinage vient en contact avec une surface de freinage du balancier pour le freiner. Dans l'exemple représenté à la Figure 1, la lame formant l'organe de freinage se courbe et sa partie d'extrémité vient presser contre la surface latérale circulaire 15 de la serge 17 du balancier 16. La partie d'extrémité de la lame définit donc un patin de freinage mobile. Dans une variante préférée, le balancier pivotant et

l'organe de freinage mécanique sont agencés de manière que les impulsions de freinage puissent être appliquées principalement par un frottement sec dynamique entre l'organe de freinage mécanique et la surface de freinage 15. Dans une autre variante, on peut prévoir un frottement visqueux entre l'organe de freinage et une partie de freinage du balancier.

[0028] Dans une variante particulière (non représentée), le balancier comprend un arbre central qui définit ou qui porte une partie autre que la serge du balancier définissant une surface de freinage circulaire. Dans ce cas, un patin de l'organe de freinage est agencé de manière à venir exercer une pression contre cette surface de freinage circulaire lors de l'application des impulsions de freinage mécanique.

[0029] Une surface de freinage circulaire, pour un organe oscillant qui est pivoté (balancier), associé à au moins un patin de freinage, porté par le dispositif de freinage du dispositif de régulation, constitue un système de freinage mécanique qui présente des avantages déterminants. En effet, grâce à un tel système, des impulsions de freinage peuvent être appliquées au résonateur mécanique à n'importe quel instant des oscillations, et ceci de manière indépendante de l'amplitude d'oscillation du balancier. On notera encore que le patin de l'organe de freinage peut aussi présenter une surface de contact circulaire, de même rayon que la surface de freinage, mais une surface plane a pour avantage de laisser une certaine marge dans le positionnement de l'organe de freinage relativement au balancier, ce qui permet d'avoir de plus grandes tolérances de fabrication et de montage du dispositif de freinage dans le mouvement horloger ou à sa périphérie.

[0030] De manière avantageuse, les divers éléments du dispositif de régulation 20 forment un module indépendant du mouvement horloger. Ainsi, ce module peut être assemblé ou associé au mouvement mécanique 4 que lors de leur montage notamment dans une boîte de montre. En particulier, un tel module peut-être fixé à un cercle d'emboîtement qui entoure le mouvement horloger. On comprend que le module de régulation électronique peut donc être avantageusement associé au mouvement horloger une fois ce dernier entièrement monté et réglé, le montage et démontage de ce module pouvant intervenir sans devoir intervenir sur le mouvement mécanique lui-même.

[0031] De manière générale, le circuit de régulation 22 est agencé pour pouvoir déterminer si une dérive temporelle, qui est mesurée par le dispositif de mesure sur la base des signaux qu'il reçoit du capteur 24 et de la base de temps de référence 36, correspond à au moins une certaine avance ou à au moins un certain retard et pour pouvoir, si c'est le cas, générer un signal de commande qui active sélectivement le dispositif de freinage, pour engendrer des impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique avec une fréquence de freinage qui est fonction de la dérive temporelle mesurée, de sorte à corriger au moins partielle-

ment cette dérive temporelle mesurée.

[0032] Dans une variante principale, le circuit de régulation 22 comprend un dispositif générateur de fréquences agencé de manière à pouvoir générer un premier signal digital périodique S_{F1} à une première fréquence F_{INF} (première fréquence de freinage) et un deuxième signal digital périodique S_{FS} à une deuxième fréquence F_{SUP} (deuxième fréquence de freinage).

[0033] La première fréquence F_{INF} est comprise dans une plage de valeurs s'étendant entre $(M-2)/M$, inclus, et $(M-1)/M$ multipliés par une fréquence $F_Z(N)$ qui est égale au double d'une fréquence de consigne F_{0c} , pour l'oscillateur mécanique, divisée par un nombre entier positif N , soit $F_Z(N) = 2 \cdot F_{0c}/N$ et $[(M-2)/M] \cdot F_Z(N) \leq F_{INF} < [(M-1)/M] \cdot F_Z(N)$, M étant égal à cent fois deux à la puissance K avec K égal à un nombre entier positif supérieur à zéro et inférieur à treize, soit $0 < K < 13$ et $M = 100 \cdot 2^K$, et N étant prévu inférieur à M divisé par trente, soit $N < M/30$. La deuxième fréquence F_{SUP} est comprise dans une plage de valeurs s'étendant entre $(M+1)/M$ et $(M+2)/M$, inclus, multipliés par la fréquence $F_Z(N)$, avec M et N tels que définis ci-avant, soit $[(M+1)/M] \cdot F_Z(N) < F_{SUP} \leq [(M+2)/M] \cdot F_Z(N)$. L'opérateur ' $\leq$ ' signifie 'égal ou inférieur à', la limite en question étant comprise dans la plage de valeurs.

[0034] Le circuit de régulation 22 est agencé pour fournir, chaque fois qu'il détermine que la dérive temporelle D_T de l'oscillateur mécanique correspond au moins à une certaine avance ou au moins à un certain retard, momentanément au dispositif de freinage 26 un signal de commande S_F durant une période de correction, ce signal de commande S_F étant sélectivement formé par :

- le premier signal digital périodique S_{F1} lorsque la dérive temporelle correspond au moins à la certaine avance, de manière à générer une première série d'impulsions de freinage 60 qui sont appliquées au résonateur mécanique 14 avec une première fréquence de déclenchement F_{1D} égale à la première fréquence F_{INF} (première fréquence de freinage), et
- le deuxième signal digital périodique S_{FS} lorsque la dérive temporelle correspond au moins à un certain retard, de manière à générer une deuxième série d'impulsions de freinage 61 qui sont appliquées au résonateur mécanique avec une deuxième fréquence de déclenchement F_{2D} égale à la deuxième fréquence F_{SUP} (deuxième fréquence de freinage).

[0035] Dans une variante préférée, le nombre entier positif K est supérieur à deux et inférieur à dix, soit $2 < K < 10$ et le nombre N est inférieur au nombre M divisé par cent ($N < M/100$).

[0036] Les impulsions de freinage ont une durée T_P inférieure à la moitié d'une période de consigne T_{0c} , soit $T_P < T_{0c}/2$, T_{0c} étant par définition l'inverse de la fréquence de consigne F_{0c} pour l'oscillateur mécanique formé du résonateur 14 et de l'échappement 12. De préférence, dans ce premier mode de réalisation, les impul-

sions de freinage ont une durée T_P inférieure au quart de la période de consigne T_{0c} , soit $T_P < T_{0c}/4$.

[0037] La Figure 2 représente de manière détaillée le circuit de régulation 22 et le circuit de commande 30 de l'actionneur 26 formant le dispositif de freinage mécanique caractérisant le premier mode de réalisation. Le circuit de régulation comprend :

- deux étages DIV1 et DIV2 d'un diviseur de fréquence qui reçoit en entrée de la base de temps de référence 36 le signal périodique digital de référence S_Q et qui fournit en sortie un signal d'horloge S_H à une moindre fréquence,
- un compteur différentiel bidirectionnel CB qui reçoit à une entrée le signal d'horloge S_H et à une seconde entrée le signal digital S_C du capteur 24, lequel fournit via ce signal digital S_C une impulsion digitale à chaque alternance ou à chaque période de l'oscillation du résonateur mécanique 14, et qui fournit en sortie un signal de mesure S_D correspondant à une valeur représentative de la dérive temporelle D_T de l'oscillateur,
- un circuit logique de commande 40 qui reçoit en entrée seulement le signal de mesure S_D (hormis un signal de cadencement à une fréquence généralement bien supérieure à celle de l'oscillateur à quartz, soit bien supérieure à la fréquence du signal de référence S_Q) et qui fournit en sortie, en fonction de la valeur du signal de mesure S_D , sélectivement un signal de commande S_R et un signal de commande S_A (lesquels seront décrits par la suite lors de la description d'un premier mode de régulation selon l'invention en référence aux Figures 3 à 5),
- un premier générateur de fréquence 42 fournissant, lorsqu'il est activé par le signal de commande S_A , momentanément le premier signal digital périodique S_{F1} et un deuxième générateur de fréquence 44 fournissant, lorsqu'il est activé par le signal de commande S_R , momentanément le deuxième signal digital périodique S_{FS} , les premier et deuxième générateurs de fréquence formant ensemble le dispositif générateur de fréquences mentionné précédemment, et
- une porte logique 'OR' qui est connectée en entrée aux sorties respectives des deux générateurs de fréquence 42 et 44 et qui fournit en sortie le signal de commande S_F .

[0038] Si le signal digital S_C fourni par le capteur 24 présente une période correspondant à une alternance de l'oscillateur mécanique, une bascule peut être agencée dans le circuit de régulation 22 en amont du compteur CB de manière à diviser par deux les impulsions périodiques du signal S_C et fournir en entrée du compteur CB une seule impulsion par période d'oscillation T_0 .

[0039] Le circuit de commande 30 du dispositif de freinage comprend une source de tension d'alimentation V_{ACT} qui alimente l'organe de freinage pour l'actionner

via un interrupteur 50, lequel est commandé par un signal périodique S_P fourni par un minuteur 48 incorporé dans le circuit de commande pour gérer la durée des impulsions de freinage. Le minuteur reçoit sélectivement, via le signal de commande S_F , le premier signal digital périodique S_{F1} et le deuxième signal digital périodique S_{F2} qui l'activent périodiquement durant une période de correction en fonction d'une détection d'une certaine avance ou d'un certain retard dans la marche de l'oscillateur mécanique et donc dans la marche de la pièce d'horlogerie, et ceci de manière répétitive au cours de périodes de correction distinctes et successives lorsqu'une dérive temporelle perdure. Ainsi, le minuteur 48 rend l'interrupteur 50 périodiquement conducteur durant chaque période de correction pour générer, selon le cas, soit une première série d'impulsions de freinage 60, soit une deuxième série d'impulsions de freinage 61 (voir Figures 4 et 5).

[0040] Dans une variante préférée, la surface de freinage du balancier 16 est configurée de manière à permettre au dispositif de freinage de débiter, dans une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, une impulsion de freinage de chaque première série d'impulsions de freinage et une impulsion de freinage de chaque deuxième série d'impulsions de freinage à n'importe quelle position angulaire du résonateur mécanique 14 entre les deux positions angulaires extrêmes qu'il peut occuper lorsqu'il oscille dans la plage de fonctionnement utile de la pièce d'horlogerie. Comme l'amplitude d'oscillation du balancier-spiral est généralement supérieure à 180° ($\pm 180^\circ$) dans un mouvement mécanique classique, la condition susmentionnée implique, dans la variante représentée à la Figure 1, que la surface latérale 15 du balancier est circulaire et sensiblement continue sur l'entier du pourtour du balancier, de sorte que l'organe de freinage mobile 28 peut venir appuyer contre la surface latérale circulaire sensiblement en tout point.

[0041] La Figure 3 donne l'organigramme d'un premier mode de régulation implémenté dans le circuit de régulation 22 du premier mode de réalisation. Après l'activation du circuit au début de son alimentation électrique ou dans le cadre d'une initialisation intervenant lors de cette activation, le compteur CB est remis à zéro et il commence à comptabiliser une différence éventuelle entre le premier nombre d'impulsions compris dans le signal S_C reçu du capteur 24 et le deuxième nombre d'impulsions compris dans le signal d'horloge S_H . Le diviseur DIV1 & DIV2 est agencé de manière que le signal d'horloge fournit un signal de consigne avec un nombre d'impulsions par unité de temps correspondant au nombre d'impulsions prévu dans le signal S_C par unité de temps pour une marche correcte de la pièce d'horlogerie, c'est-à-dire sans dérive temporelle.

[0042] Dans chaque séquence du premier mode de régulation, le circuit logique 40 détermine premièrement si la valeur du compteur CB est supérieure à un nombre entier positif $N1_H$ (correspondant à une avance de l'oscillateur mécanique) ou inférieure à un nombre entier né-

gatif $-N2_H$ (correspondant à un retard de l'oscillateur mécanique). Si $CB > N1_H$ (premier cas considéré), le circuit logique active le générateur de fréquence 42 via un signal de commande S_A et ce générateur de fréquence commence à fournir le premier signal digital périodique S_{F1} , à la première fréquence F_{INF} définie précédemment, au circuit de commande 30 du dispositif de freinage via la porte logique 46. Il en résulte que le dispositif de freinage commence alors à générer une première série d'impulsions de freinage 60 de manière périodique à la première fréquence F_{INF} . Une telle situation est représentée à la Figure 4 qui montre :

- dans le graphe supérieur 54B, la position angulaire θ du résonateur mécanique 14 sur une pluralité de périodes d'oscillation au cours de laquelle intervient une première série d'impulsions de freinage 60,
- dans le graphe intermédiaire 56A, l'évolution correspondante de la fréquence de l'oscillateur mécanique (la fréquence de consigne $F0_C$ est égale à 4 Hz dans l'exemple traité, soit $F0_C = 4$ Hz), et
- dans le graphe inférieur 58A, l'évolution correspondante de la dérive temporelle D_T de l'oscillateur mécanique.

[0043] On notera que, pour avoir une représentation visible de la position angulaire du résonateur mécanique et des impulsions de freinage, la Figure 4 montre de fait seulement une série tronquée d'impulsions de freinage avec un bien moins grand nombre d'impulsions qu'en réalité, de sorte que la dérive temporelle D_T correspond ici à une fraction $\varepsilon 1_H$ de la dérive temporelle $N1_H$. Mais ceci permet d'exposer clairement le principe de fonctionnement. Dans le premier cas, dans l'exemple donné, la fréquence naturelle $F0 = 4.0005$ Hz, ce qui correspond à une avance d'environ dix secondes par jour. Lorsque la dérive temporelle atteint ou dépasse une valeur $\varepsilon 1_H$, à savoir en réalité une valeur $N1_H$, le dispositif de freinage est actionné via le générateur de fréquence 42 et il commence à appliquer périodiquement au résonateur mécanique des impulsions de freinage 60 à une fréquence F_{INF} définie précédemment (par souci de clarté du dessin, toutes les impulsions sont représentées à la Figure 4 telles qu'elles interviennent durant une phase stable / synchrone exposée par la suite). On remarquera que, dans l'exemple donné, les impulsions de freinage interviennent dans chaque période d'oscillation et donc avec une fréquence $F0_C$, de sorte que la fréquence $F_Z(N) = 2 \cdot F0_C / N$, qui sert à définir les plages pour les fréquences de freinage, est prévue avec $N = 2$. Par exemple, comme représenté à la Figure 4, la première fréquence de freinage F_{INF} est égale à $0.99975 \cdot F0_C = 3.9990$ Hz, soit $F_{INF} = F_Z(2) \cdot (L-1)/L = F0_C \cdot (L-1)/L$ avec $L = 4'000$. Cette première fréquence F_{INF} est dans la plage $[(M-2)/M] \cdot F_Z(2)$ à $[(M-1)/M] \cdot F_Z(2)$ avec $K = 6$, soit $M = 100 \cdot 2^6$.

[0044] Pendant la phase d'activation du générateur de fréquence 42, le circuit logique 40 attend que la valeur du compteur CB devienne égale ou inférieure à un nom-

bre entier $N1_L$, lequel est inférieur au nombre $N1_H$ et de préférence inférieur en valeur absolue à $N1_H$. Dans l'exemple représenté à la Figure 4, $N1_L$ est égal à zéro de sorte que la fraction $\varepsilon1_L$ de la dérive temporelle $N1_L$ donnée sur cette Figure 4 vaut également zéro. Dès que le circuit logique a détecté l'événement attendu, soit lorsque la valeur du compteur CB devient égale ou inférieure à un nombre entier $N1_L$, le circuit logique met un terme à l'activation du générateur 42 de sorte que ce dernier est désactivé, ce qui met fin à une séquence de correction / période de correction. Si la valeur $N1_H = 4$ et que le compteur CB compte les alternances de l'oscillateur mécanique, ceci correspond à une dérive temporelle d'une demi-seconde. Dans l'exemple donné, la durée D_{PC} d'une période de correction vaut au minimum le nombre L susmentionné multiplié par la dérive temporelle D_T corrigée, soit $D_{PC} = L \cdot D_T = 4'000 \cdot 0,5 = 2'000$ secondes. Ainsi, les périodes de correction durent chacune environ 34 minutes, y compris la phase transitoire initiale.

[0045] A la Figure 4, le graphe 56A de la fréquence de l'oscillateur mécanique, formé par le résonateur mécanique 14 et l'échappement 12, montre l'évolution de cette fréquence résultant d'une séquence du premier mode de régulation dans le premier cas décrit ci-avant. Alors que la fréquence de l'oscillateur mécanique est supérieure à la fréquence de consigne $F0c$ en l'absence d'impulsions de freinage, cette fréquence diminue dès qu'intervient une première série d'impulsions de freinage 60. On observe une phase transitoire avant que la fréquence d'oscillation se stabilise à une première fréquence de correction F_{cor1} qui est égale à la première fréquence F_{INF} avec $F_z(N=2) = F0c$, soit $F_{cor1} = F_{INF}(N=2)$, et donc qu'une phase synchrone apparaisse. Ainsi, durant cette phase synchrone, on observe une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur la première fréquence de correction F_{cor1} qui est légèrement inférieure à la fréquence de consigne, ce qui permet d'effectuer une correction de la dérive temporelle, comme le montre le graphe inférieur 58A de la Figure 4. A la fin d'une séquence du premier mode de régulation, la valeur de la dérive temporelle est diminuée et est ici égale au nombre entier $N1_L$ qui correspond à un seuil inférieur pour la dérive temporelle, alors que le nombre entier $N1_H$, qui engendre le déclenchement d'une première série d'impulsions de freinage, correspond à un seuil supérieur de la dérive temporelle.

[0046] On remarquera que, en valeurs absolues, la différence entre $F_{INF}(N=2)$ et $F0c$ est de préférence prévue supérieure à une différence typique entre $F0$ et $F0c$. Ainsi, le dispositif de freinage est généralement activé moins de la moitié du temps, soit moins de 12 heures par jour. Dans l'exemple donné ici, en prenant comme hypothèse que la fréquence naturelle $F0$ reste stable au cours du temps, le dispositif de freinage devra être actionné pendant environ 8 heures par jour.

[0047] Dans chaque séquence du mode de régulation, si $CB < -N2_H$ (second cas considéré), le circuit logique 40 active le générateur de fréquence 44 via un signal de commande S_R et ce générateur de fréquence commence

à fournir le deuxième signal digital périodique S_{FS} , à la deuxième fréquence F_{SUP} définie précédemment, au circuit de commande 30 du dispositif de freinage via la porte logique 46. Il en résulte que le dispositif de freinage commence alors à générer une deuxième série d'impulsions de freinage 61 de manière périodique à la deuxième fréquence F_{SUP} . Une telle situation est représentée à la Figure 5 qui montre :

- dans le graphe supérieur 54B, la position angulaire du résonateur mécanique 14 sur une pluralité de périodes d'oscillation au cours de laquelle intervient une seconde série d'impulsions de freinage 61,
- dans le graphe intermédiaire 56B, l'évolution correspondante de la fréquence de l'oscillateur mécanique, et
- dans le graphe inférieur 58B, l'évolution correspondante de la dérive temporelle D_T de l'oscillateur mécanique.

[0048] On notera que, pour avoir une représentation visible de la position angulaire du résonateur mécanique et des impulsions de freinage, la Figure 5, comme la Figure 4, montre de fait seulement une série tronquée d'impulsions de freinage avec un bien moins grand nombre d'impulsions qu'en réalité, de sorte que la dérive temporelle D_T correspond ici à une fraction $-\varepsilon2_H$ de la dérive temporelle $-N2_H$. Dans le second cas, dans l'exemple donnée, la fréquence naturelle $F0 = 3.9995$ Hz, ce qui correspond environ à un retard de dix secondes par jour. Lorsque la dérive temporelle atteint ou devient inférieure à une valeur $-\varepsilon2_H$, à savoir en réalité une valeur $-N2_H$, le dispositif de freinage est actionné via le générateur de fréquence 44 et il commence à appliquer périodiquement au résonateur mécanique des impulsions de freinage 61 à une fréquence F_{SUP} définie précédemment (par souci de clarté du dessin, toutes les impulsions sont représentées à la Figure 5 telles qu'elles interviennent durant une phase stable / synchrone exposée par la suite). Dans l'exemple représenté, comme dans le premier cas, la fréquence $F_Z(N) = 2 \cdot F0c/N$ est prévue avec $N = 2$, de sorte que la fréquence $F_Z(2) = F0c$. La deuxième fréquence de freinage F_{SUP} est égale à $1.00025 \cdot F0c = 4.001$, soit à $F_{SUP} = F0c \cdot (L+1)/L$ avec $L = 4'000$. Cette deuxième fréquence F_{SUP} est dans la plage $[(M+1)/M] \cdot F_Z(2)$ à $[(M+2)/M] \cdot F_Z(2)$ avec $K = 6$, soit $M = 100 \cdot 2^6$. On notera que rien n'oblige à prendre une même valeur pour N et une même valeur L dans le second cas (correction d'un retard) que dans le premier cas (correction d'une avance).

[0049] Pendant la phase d'activation du générateur de fréquence 44, le circuit logique 40 attend que la valeur du compteur CB devienne égale ou supérieure à un nombre entier $N2_L$, lequel est supérieur au nombre $N2_H$ et de préférence inférieur en valeur absolue à $N2_H$. Dans l'exemple représenté à la Figure 5, $N2_L$ est égal à zéro, comme $N1_L$, de sorte que la fraction $\varepsilon2_L$ de la dérive temporelle $N2_L$ donnée sur cette Figure 5 vaut également

zéro. Dès que le circuit logique a détecté l'événement attendu, soit lorsque la valeur du compteur CB devient égale ou supérieure au nombre entier $N2_L$, le circuit logique met un terme à l'activation du générateur 44 de sorte que ce dernier est désactivé, ce qui met fin à une séquence de correction. La séquence de correction est prévue en boucle, de sorte que le circuit logique 40 revient ensuite au début d'une prochaine séquence et il attend la détection d'une nouvelle dérive temporelle. Chaque séquence de correction correspond à une période de correction.

[0050] A la Figure 5, le graphe 56B de la fréquence de l'oscillateur mécanique montre l'évolution de cette fréquence résultant d'une séquence du premier mode de régulation dans le second cas considéré. Alors qu'en absence d'impulsions de freinage la fréquence de l'oscillateur mécanique est ici inférieure à la fréquence de consigne $F0c = 4$ Hz, la fréquence de l'oscillateur mécanique augmente dès qu'intervient une deuxième série d'impulsions de freinage 61. Comme dans le premier cas, on observe une phase transitoire avant que la fréquence de l'oscillateur mécanique se stabilise à une deuxième fréquence de correction $Fcor2$ égale à la deuxième fréquence F_{SUP} avec $Fz(N=2) = F0c$, soit $Fcor2 = F_{SUP}(N=2)$ et donc qu'une phase synchrone apparaisse au cours de la deuxième série d'impulsions de freinage 61. Ainsi, durant cette phase synchrone, on observe une synchronisation de l'oscillateur mécanique sur la deuxième fréquence de correction $Fcor2$ qui est légèrement supérieure à la fréquence de consigne $F0c$, ce qui permet d'effectuer une correction de la dérive temporelle D_T , comme le montre le graphe inférieur 56B de la Figure 5. Dans ce second cas, à la fin d'une séquence du premier mode de régulation, la valeur absolue de la dérive temporelle est diminuée relativement au début de la séquence et est ici égale au nombre entier $N2_L$ qui correspond à un seuil inférieur pour la dérive temporelle, alors que le nombre entier $N2_H$, qui engendre le déclenchement d'une deuxième série d'impulsions de freinage, correspond à un seuil supérieur pour la dérive temporelle (à noter que la notion de seuil inférieur et seuil supérieur est considérée en valeurs absolues).

[0051] Le circuit de régulation est agencé de manière que chaque période de correction a une durée suffisante à l'établissement de la phase synchrone dans laquelle la fréquence de l'oscillateur mécanique est synchronisée, en fonction d'une dérive positive ou négative détectée, respectivement sur une première fréquence de correction $Fcor1$ qui est égal à la fréquence F_{INF} calculée avec $Fz(N=2) = F0c$ ou sur une deuxième fréquence de correction $Fcor2$ qui est égal à la fréquence F_{SUP} calculée avec $Fz(N=2) = F0c$.

[0052] Dans une variante préférée, la durée de la phase synchrone est prévue largement supérieure à une durée maximale de la phase transitoire, notamment au moins dix fois supérieure.

[0053] La pièce d'horlogerie selon l'invention est remarquable par le fait qu'une correction d'une dérive tem-

porelle, détectée par le circuit de régulation en association avec un capteur, est effectuée par la génération d'une série d'impulsions de freinage de manière périodique à une fréquence sélectionnée proche mais différente d'une fréquence $Fz(N) = 2 \cdot F0c/N$, N étant un nombre entier positif, ce qui permet de réguler la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique pour qu'elle égale une fréquence de consigne $F0c$ sans avoir à gérer les instants de déclenchement des impulsions de freinage relativement à la position angulaire de l'oscillateur mécanique comme dans l'art antérieur. On pourrait prévoir de déterminer l'instant d'une première impulsion de freinage de chaque série d'impulsions relativement à la position angulaire de l'oscillateur mécanique pour assurer une phase transitoire relativement courte avant la phase stable de la synchronisation, mais une telle variante n'est pas nécessaire.

[0054] En référence aux Figures 6 à 9, on décrira ci-après un deuxième mode de réalisation de l'invention et un deuxième mode de régulation selon l'invention. A la Figure 6, les éléments du mouvement horloger 4A de la pièce d'horlogerie 3 déjà décrits précédemment ne seront pas décrits ici à nouveau. Le dispositif de régulation 72 de ce deuxième mode de réalisation comprend :

- une base de temps de référence 36,
- un dispositif de freinage électromagnétique 76 pour freiner le résonateur mécanique 14A au cours de périodes de correction, et
- un circuit de régulation 74 qui reçoit un signal périodique digital S_Q de la base de temps de référence et qui est agencé pour engendrer des séries d'impulsions 84 de court-circuit de la bobine 78 via un interrupteur 50 (voir Figures 8 et 9) respectivement au cours de périodes de correction de dérives temporelles détectées successivement par ce circuit de régulation.

[0055] Par 'freinage électromagnétique' on comprend un freinage du résonateur mécanique engendré via une interaction électromagnétique entre au moins un aimant permanent, porté par le résonateur mécanique ou un support de ce résonateur mécanique, et au moins une bobine portée respectivement par le support ou le résonateur mécanique et associée à un circuit électronique dans lequel un courant induit dans la bobine par l'aimant permanent peut être engendré.

[0056] Dans une variante générale (non représentée), le dispositif de freinage électromagnétique est formé par un système électromagnétique qui comprend une bobine 78 portée par un support 5 du résonateur mécanique 14A et au moins un aimant permanent porté par un balancier de ce résonateur mécanique, ce système électromagnétique étant agencé de manière qu'une tension induite est générée entre les deux bornes 78A & 78B de la bobine dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique pour une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique. Le dispositif de régulation est

agencé de manière à permettre au circuit de régulation de diminuer momentanément l'impédance entre les deux bornes de la bobine, durant des intervalles de temps distincts T_P , pour engendrer des impulsions de freinage électromagnétique du résonateur mécanique. Dans la variante avantageuse du deuxième mode de réalisation décrite en référence aux Figures 8 et 9, un court-circuit de la bobine est effectué durant chaque intervalle de temps distinct T_P .

[0057] Dans la variante particulière représentée aux Figures 6 et 7, le système électromagnétique du dispositif de freinage électromagnétique comprend une première paire d'aimants bipolaires 64 & 65 à aimantation axiale et de polarités opposées. Ces deux aimants bipolaires sont agencés sur le balancier 16A symétriquement relativement à un demi-axe de référence 68 de ce balancier, ce demi-axe de référence définissant une position angulaire zéro (0°) lorsque le résonateur mécanique est dans sa position neutre (état d'énergie potentielle minimale). On considère ici un système de coordonnées polaires centré sur l'axe d'oscillation du résonateur mécanique 14A et fixe relativement à la platine 5 du mouvement horloger 3. De manière générale, la bobine 78 est agencée avec un décalage angulaire relativement à la position angulaire zéro de manière qu'une tension induite dans la bobine intervienne substantiellement, lorsque l'oscillateur mécanique oscille dans sa plage de fonctionnement utile, dans chaque alternance alternativement avant et après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans cette alternance. Le décalage angulaire de la bobine est défini comme la distance angulaire minimale entre la position angulaire zéro et la position angulaire du centre de la bobine. Dans la plage de fonctionnement utile de la pièce d'horlogerie 3, les positions angulaires extrêmes (amplitudes d'oscillation) du résonateur mécanique sont prévues, en valeurs absolues, sensiblement égales ou supérieures au décalage angulaire de la bobine. De préférence, comme représenté à la Figure 7, le décalage angulaire est prévu sensiblement égal à 180°. On notera que le balancier 16A est représenté sur la Figure 7 dans une position angulaire θ égale à 90° ($\theta = 90^\circ$).

[0058] A la Figure 9 sont représentées, pour un décalage angulaire de 180° et pour une amplitude d'oscillation du résonateur mécanique dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur, la position angulaire du balancier 16A (courbe 82) sur une période d'oscillation et la tension induite (courbe 86) générée dans la bobine 78 au cours de cette période d'oscillation. Dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, le système électromagnétique formé de la bobine et de la première paire d'aimants 64 & 65 engendre, dans chaque alternance de cet oscillateur mécanique, deux impulsions de tension induite 88_A et 88_B , à savoir une impulsion 88_A dans chaque première demi-alternance $A1_1$, $A2_1$ et une impulsion 88_B dans chaque seconde demi-alternance $A1_2$, $A2_2$. On remarque que les impulsions 88_A et 88_B sont séparées deux à deux par des zones

temporelles sans tension induite dans la bobine 28. Grâce au positionnement de la bobine avec un décalage angulaire de 180°, les deux impulsions de tension induite 88_A et 88_B intervenant dans chaque alternance présentent une symétrie relativement à l'instant du passage du résonateur mécanique 14A par sa position neutre.

[0059] Dans une variante avantageuse représentée aux Figures 8 et 9, des impulsions de freinage électromagnétique sont engendrées par un court-circuit de la bobine 78 durant des intervalles de temps distincts T_P qui sont sensiblement égaux ou supérieures aux zones temporelles sans tension induite dans la bobine autour des deux positions extrêmes du résonateur mécanique pour la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique. Dans le cas préféré (décalage angulaire de 180° de la bobine), les zones temporelles sans tension induite dans la bobine autour des deux positions extrêmes du résonateur mécanique sont sensiblement égales.

[0060] De préférence, le dispositif de régulation 72 comprend un circuit d'alimentation formé par une capacité de stockage C_{AL} et un circuit redresseur d'une tension induite (signal S_B) dans la bobine 78 par une deuxième paire d'aimants bipolaires 66 & 67 portée à cet effet par le balancier 16A. A la Figure 8, ce circuit d'alimentation est représenté comme une partie du circuit de régulation 74. Cependant, on peut aussi le considérer comme un circuit spécifique qui est associé au circuit de régulation pour l'alimenter. La seconde paire d'aimants bipolaires 66 & 67 est couplée momentanément à la bobine 28 dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique et sert donc essentiellement à l'alimentation électrique du dispositif de régulation, bien qu'elle puisse intervenir dans une phase transitoire initiale de chaque période de correction qui sera décrite par la suite. La deuxième paire d'aimants bipolaires présente un demi-axe milieu 69 entre ses deux aimants qui est décalé du décalage angulaire que présente la bobine 78 relativement au demi-axe de référence 68, de sorte que ce demi-axe 69 est aligné sur le centre de la bobine lorsque le résonateur mécanique est dans sa position de repos.

[0061] Le circuit d'alimentation est relié, d'une part, à une borne de la bobine et, d'autre part, à un potentiel de référence (masse) du dispositif de régulation au moins périodiquement lors de passage du résonateur mécanique par sa position neutre, mais de préférence constamment. La deuxième paire d'aimants génère des impulsions de tension induite 90_A et 90_B lors des passages du balancier 8B par la position angulaire zéro, ces impulsions présentant une plus grande amplitude que les impulsions de tension induite générées par la première paire d'aimants 64 & 65 et servant à l'alimentation de la capacité de stockage dont la tension est représentée par la courbe 94 à la Figure 9. Le redresseur est prévu ici à double alternance, de sorte que chaque pic central des impulsions 90_A et 90_B recharge la capacité d'alimentation.

[0062] Le circuit de régulation 74 d'une variante avantageuse du deuxième mode de réalisation, lequel met en

oeuvre un deuxième mode régulation de l'invention, est représenté à la Figure 8. Il reçoit en entrée, d'une part, le signal périodique de référence S_Q fourni par le circuit d'horloge 38 et, d'autre part, un signal de tension induite S_B (courbe 86 représentée à la Figure 9) fourni par la bobine 78. Sur la base de ces deux signaux, le circuit de régulation effectue la régulation voulue de la marche de la pièce d'horlogerie. Pour ce faire, il comprend un dispositif de mesure qui comprend un diviseur DIV1 & DIV2 fournissant un signal d'horloge S_H , un compteur bidirectionnel CB à deux entrées (du type différentiel), et un comparateur 52 qui reçoit en entrée une tension de référence U_{Ref} et le signal de tension induite S_B .

[0063] Comme montré à la Figure 9, il est prévu de détecter dans chaque période d'oscillation, pour la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, un pic central négatif d'une impulsion de tension induite 90A intervenant une fois dans chaque période d'oscillation. Le comparateur 52 indique si la tension induite dans la bobine devient inférieure à la tension de référence U_{Ref} (qui est négative). On comprend que la valeur de U_{Ref} est sélectionnée ici pour être, en valeurs absolues, supérieure aux amplitudes des impulsions de tension induite 88A et 88B qui sont générées par la première paire d'aimants 64 & 65 et inférieure à l'amplitude des pics centraux des impulsions 90A (à noter que, relativement aux amplitudes des impulsions de tension induite 88A et 88B, les pics centraux ont une valeur maximale plus élevée que représentée à la Figure 9 dans le cas d'un décalage angulaire de 180° pour la bobine). Ainsi, dans le second mode de réalisation, le capteur est de préférence formé par un système électromagnétique comprenant la bobine 78 et une paire d'aimants 66 & 67 additionnelle relativement au système magnétique du dispositif de freinage.

[0064] Par analogie avec le premier mode de réalisation tel que décrit, le comparateur 52 peut aussi être considéré comme une partie du capteur et non du dispositif de mesure. On remarquera que, de manière générale, une paire d'aimants additionnelle est avantageuse mais pas indispensable, car dans une autre variante les impulsions 88A et 88B peuvent aussi servir à l'alimentation électrique du dispositif de régulation et également à la détection du nombre d'alternances ou de périodes d'oscillation du résonateur mécanique. De manière générale, la tension de référence est sélectionnée de manière que, dans la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, le comparateur 52 fournisse à une première entrée du compteur CB un nombre d'impulsions prédéterminé par période d'oscillation du résonateur mécanique, et le signal d'horloge S_H est prévu pour qu'il délivre un même nombre d'impulsions par période de consigne T0c (inverse de la fréquence de consigne F0c) à une deuxième entrée du compteur CB. Ce compteur CB, comme dans le premier mode de réalisation, fournit en sortie un signal correspondant à son état et qui donne une mesure de la dérive temporelle D_T de l'oscillateur mécanique relativement à l'oscillateur auxiliaire 36.

[0065] L'état du compteur CB est fourni à deux comparateurs 82 et 84. Le premier comparateur 82 effectue une comparaison de l'état du compteur CB avec un premier nombre entier N1 supérieur à zéro, pour déterminer si la dérive temporelle mesurée est supérieure ou non à ce premier nombre N1, et détecte ainsi si au moins une certaine avance est intervenue dans la marche de l'oscillateur mécanique. Le deuxième comparateur 84 effectue une comparaison de cet état avec un deuxième nombre entier négatif -N2, N2 étant supérieur à zéro, pour déterminer si la dérive temporelle mesurée est inférieure ou non à ce deuxième nombre -N2, et détecte ainsi si au moins un certain retard est intervenu dans la marche de l'oscillateur mécanique. La sortie du premier comparateur 82 est fournie à un premier générateur de fréquence 42A agencé pour générer un premier signal digital périodique S_{FI} à la première fréquence F_{INF} durant une période de correction chaque fois que cette sortie indique que l'état du compteur CB est supérieure au nombre N1. Plus particulièrement, le premier générateur 42A de la fréquence F_{INF} comprend des moyens agencés pour permettre de l'activer et ensuite de le désactiver, le signal fourni par le premier comparateur étant fourni à une entrée 'start' du premier générateur pour l'activer dès que ce premier comparateur indique que l'état du compteur CB est supérieure au nombre N1. De manière similaire, la sortie du deuxième comparateur 84 est fournie à un deuxième générateur de fréquence 44A agencé pour générer un deuxième signal digital périodique S_{FS} à la deuxième fréquence F_{SUP} durant une période de correction chaque fois que cette sortie indique que l'état du compteur CB est inférieure au nombre -N2. Plus particulièrement, le deuxième générateur 44A de la fréquence F_{SUP} comprend des moyens agencés pour permettre de l'activer et ensuite de le désactiver, le signal fourni par le deuxième comparateur étant fourni à une entrée 'start' du deuxième générateur pour l'activer dès que le deuxième comparateur indique que l'état du compteur CB est inférieure au nombre -N2. Les premier et deuxième signaux digitaux périodiques S_{FI} et S_{FS} ainsi que les fréquences F_{INF} et F_{SUP} ont déjà été décrites dans le cadre du premier mode de réalisation et présentent dans le deuxième mode de réalisation les mêmes caractéristiques que dans ce premier mode de réalisation, de sorte que ces signaux et ces fréquences ne seront pas décrits ici à nouveau. Le signal de commande S_F est similaire à celui décrit dans le premier mode de réalisation ; il est formé du signal S_{FI} lorsque le premier générateur de fréquence est activé et du signal S_{FS} lorsque le deuxième générateur de fréquence est activé.

[0066] On comprend que les deux générateurs de fréquence ne sont jamais activés simultanément. Le point de liaison électrique 86 correspond en pratique à un élément électronique, par exemple une porte logique 'OU', ou à un circuit électronique, par exemple un multiplexeur à deux ou trois positions d'entrée et une seule sortie (il s'agit donc ici d'un commutateur à deux ou trois entrées). Dans le cas de trois positions d'entrée, il est avantageu-

sement prévu une position neutre dans laquelle le commutateur n'est connecté à aucun des deux générateurs de fréquence. Comme dans le premier mode de réalisation, le signal de commande S_F est fourni à un temporisateur 48 qui fournit en sortie le signal périodique S_P déjà décrit précédemment. Pour chaque impulsion élémentaire du signal S_{FI} ou du signal S_{FS} , correspondant à une période de la fréquence respective, le minuteur génère une impulsion d'activation de l'interrupteur 50 qui est ici un interrupteur de court-circuit de la bobine 78. Ainsi, dans chaque période du signal S_{FI} et du signal S_{FS} est engendrée une impulsion de court-circuit au cours d'un intervalle de temps distinct d'une durée T_P .

[0067] Un compteur à N (référéncé CN) reçoit également le signal de commande S_F et il compte le nombre d'impulsions élémentaires (nombre de périodes) dans ce signal de commande S_F depuis le début de chaque période de correction. Il est donc remis à zéro au début d'une quelconque période de correction, simultanément à l'activation, selon le cas, du premier ou deuxième générateur de fréquence. Ce compteur à N stoppe le générateur de fréquence qui a été activé dans la période de correction considérée dès qu'il a compté N impulsions élémentaires (soit N périodes) via une entrée 'Stop' que comporte chacun des deux générateurs de fréquence, N étant un nombre entier supérieur à un ($N > 1$). Dans une variante avantageuse, le compteur à N est alors désactivé jusqu'au début d'une prochaine période de correction. De préférence, le nombre N est largement plus grand que '1', ce nombre N étant par exemple compris entre 100 et 10'000. Dans chaque période de correction sont donc générées N impulsions de court-circuit de la bobine 78 au cours de N intervalles de temps distincts respectifs ayant chacun une durée T_P .

[0068] On remarquera qu'on peut connaître approximativement quelle dérive temporelle D_T (erreur temporelle absolue) est corrigée par un certain nombre N d'impulsions de court-circuit générées dans une période de correction, de sorte qu'il est aisé de sélectionner un nombre N qui soit en relation avec la dérive temporelle D_T détectée. Dans une variante préférée où les deux différences de fréquence entre la fréquence de consigne F_{0c} et respectivement la première fréquence F_{INF} et la deuxième fréquence F_{SUP} sont prévues de même valeur et où le nombre N1 est égal au nombre N2, le nombre N est choisi de manière qu'une dérive temporelle détectée, négative ou positive, est sensiblement corrigée lors d'une période de correction qui suit sa détection. Un même résultat peut être obtenu avec un nombre N1 différent du nombre N2 si les deux différences de fréquence susmentionnées ne sont pas prévues de même valeur.

[0069] De manière générale, sur la base de l'enseignement donné dans le document CH 713 306, on comprend que, d'une part, les impulsions de tension induite 88_A engendrent, si des impulsions 84 de court-circuit de la bobine 78 interviennent au moins partiellement lors de ces impulsions 88_A , des impulsions distinctes de freinage électromagnétique qui engendrent des déphasages né-

gatifs dans l'oscillation du résonateur mécanique 14A, de sorte qu'elles peuvent générer du retard dans la marche de la pièce d'horlogerie pour corriger une avance. D'autre part, les impulsions de tension induite 88_B engendrent, si des impulsions 84 de court-circuit de la bobine 78 interviennent au moins partiellement lors de ces impulsions 88_B , des impulsions distinctes de freinage électromagnétique qui engendrent des déphasages positifs dans l'oscillation du résonateur mécanique, de sorte qu'elles peuvent générer de l'avance dans la marche de la pièce d'horlogerie pour corriger un retard. On notera qu'un décalage angulaire de 180° présente l'avantage d'une grande efficacité pour engendrer les impulsions de freinage par les impulsions de court-circuit 84, ce qui permet de corriger efficacement une avance ou un retard dans la marche de la pièce d'horlogerie.

[0070] Comme dans le premier mode de réalisation, lors d'une période de correction au cours de laquelle est générée soit une première série d'impulsions de freinage par une première série correspondante d'impulsions de court-circuit de la bobine, soit une deuxième série d'impulsions de freinage par une deuxième série correspondante d'impulsions de court-circuit de la bobine, on observe dans une première partie de la période de correction une phase transitoire (plus au moins longue selon le cas et notamment selon le moment auquel intervient la première impulsion de court-circuit des N impulsions de court-circuit générées à chaque période de correction) au cours de laquelle la fréquence instantanée de l'oscillateur mécanique passe de la fréquence qu'il a avant la période de correction en question à la fréquence de correction sélectionnée, à savoir soit la fréquence F_{INF} ($N=2$) soit la fréquence F_{SUP} ($N=2$) en fonction de la dérive temporelle détectée que l'on corrige. Suite à la phase transitoire intervient une phase stable / phase synchrone dans une seconde partie de la période de correction. Au cours de la phase synchrone, la fréquence de l'oscillateur est synchronisée sur la fréquence de correction sélectionnée, à savoir soit sur la première fréquence de correction F_{cor1} soit sur la deuxième fréquence de correction F_{cor2} . On observe donc que, pour autant que la dérive temporelle naturelle de la pièce d'horlogerie reste dans une plage nominale pour laquelle le dispositif de freinage électromagnétique du résonateur mécanique a été dimensionné, dans chaque période de correction intervient une phase synchrone où l'oscillateur mécanique présente la fréquence de correction sélectionnée au travers de la sélection de la fréquence de freinage F_{INF} ou F_{SUP} , et ceci quelle que soit la position angulaire du balancier 16A lors d'une première impulsion de court-circuit dans une quelconque période de correction. Dans la phase synchrone, si aucune perturbation extérieure particulière n'intervient (par exemple un choc ou une certaine accélération du balancier due à un mouvement brusque), chaque impulsion de court-circuit engendre une impulsion de freinage électromagnétique, ce qui n'est pas toujours le cas dans la phase transitoire.

[0071] Dans la phase synchrone, on observe à la Fi-

gure 9 que les impulsions de court-circuit 84 sont callées entre deux impulsions de tension induite 88_B et 88_A entourant une position angulaire extrême du résonateur mécanique et deux impulsions de freinage distinctes interviennent respectivement au début et à la fin de chaque intervalle de temps T_P , ces deux impulsions de freinage distinctes correspondant à deux quantités d'énergie qui sont prélevées au résonateur mécanique lors d'une impulsion de freinage correspondant à une impulsion de court-circuit et qui sont variables (la variation de l'une étant opposée à la variation de l'autre, de sorte que si une des deux quantités d'énergie augmente ou diminue l'autre respectivement diminue ou augmente) en fonction de l'écart de fréquence entre la fréquence naturelle F_0 de l'oscillateur mécanique et la fréquence de correction sélectionnée et de la fréquence de freinage sélectionnée. Deux impulsions de freinage sont distinctes lorsqu'elles sont séparées par une zone temporelle ayant une durée non nulle. Par fréquence naturelle F_0 , on comprend la fréquence que présenterait naturellement l'oscillateur mécanique au cours de la période de correction considérée, c'est-à-dire dans le cas hypothétique d'une absence d'impulsions de court-circuit.

[0072] On remarquera que, dans la définition de la présente invention dans le texte descriptif et les revendications, les impulsions de freinage dans le deuxième mode de réalisation correspondent respectivement aux impulsions de court-circuit qui les produisent, de sorte que chaque impulsion de freinage d'une première série d'impulsions de freinage et d'une deuxième série d'impulsions de freinage englobe l'ensemble des impulsions de freinage distinctes pouvant intervenir durant l'intervalle de temps T_P de l'impulsion de court-circuit correspondante. On remarquera encore que, dans la phase transitoire, si les intervalles de temps T_P sont inférieurs à des zones temporelles sans tension induite dans la bobine, il est possible qu'aucune impulsion de freinage n'apparaisse dans des impulsions de court-circuit initiales. Dans la phase synchrone d'une période de correction, une impulsion de freinage peut ne contenir qu'une seule impulsion de freinage distincte, ce qui est le cas lorsque l'intervalle de temps T_P a une durée inférieure à celles des zones temporelles sans tension induite situées autour des positions angulaires extrêmes. Dans la variante avantageuse représentée à la Figure 9, chaque impulsion de freinage intervenant dans la phase synchrone d'une période de correction présente deux impulsions de freinage distinctes, respectivement au début et à la fin de chaque impulsion de court-circuit correspondante qui est engendrée durant un intervalle de temps T_P .

[0073] La Figure 9 correspond à une situation où la fréquence d'oscillation naturelle F_0 de l'oscillateur mécanique est un peu inférieure à la fréquence de consigne F_{0c} , de sorte que la pièce d'horlogerie retarde en l'absence de régulation. Dans ce cas, dans chaque période d'oscillation au cours de phases synchrones de périodes de correction successives d'un certain retard dans la marche de la pièce d'horlogerie, une première impulsion

de freinage distincte, engendrée dans la zone initiale de chaque impulsion de court-circuit 84 et intervenant dans la seconde demi-alternance $A1_2$ d'une première alternance d'oscillation $A1$ (au début des intervalles de temps distincts T_P), est plus forte qu'une deuxième impulsion de freinage distincte engendrée dans la zone finale de chaque impulsion de court-circuit et intervenant dans la première demi-alternance $A2_1$ d'une seconde alternance $A2$ (à la fin des intervalles de temps distincts T_P). Les première et deuxième impulsions de freinage distinctes sont engendrées respectivement par les impulsions de tension induite 88_B et 88_A lors de chaque impulsion de court-circuit 84 (respectivement au début et à la fin des intervalles de temps distincts T_P). Ainsi, dans ce cas, le déphasage positif généré par une impulsion de tension 88_B dans une demi-alternance $A1_2$ est supérieur au déphasage négatif généré par l'impulsion de tension 88_A dans la demi-alternance $A2_1$ suivante, de sorte qu'une petite correction du retard détecté intervient lors de chaque impulsion de court-circuit.

[0074] Dans la situation où la pièce d'horlogerie avance naturellement, c'est l'inverse qui est observé, à savoir que, dans la phase synchrone de la période de correction, la deuxième impulsion de freinage distincte susmentionnée est plus forte que la première impulsion de freinage distincte lors de chaque impulsion de court-circuit, de sorte qu'une petite correction de l'avance détectée intervient lors de chaque impulsion de court-circuit.

Revendications

1. Pièce d'horlogerie (2; 3) munie d'un mouvement mécanique (4) qui comprend :

- un mécanisme (6) indicateur d'au moins une donnée temporelle,
- un résonateur mécanique (14; 14A) susceptible d'osciller le long d'un axe d'oscillation autour d'une position neutre correspondant à son état d'énergie potentielle minimale, et
- un dispositif d'entretien (12) du résonateur mécanique formant avec ce résonateur mécanique un oscillateur mécanique qui est agencé pour cadencer la marche du mécanisme indicateur ;

la pièce d'horlogerie étant munie en outre d'un dispositif de régulation qui est agencé pour réguler la fréquence moyenne de l'oscillateur mécanique et qui comprend :

- un capteur (24; 66,67,78) agencé pour pouvoir détecter un nombre d'alternances ou de périodes dans l'oscillation du résonateur mécanique dans une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique,
- un oscillateur auxiliaire (23),
- un dispositif de freinage (26; 64,65,78) qui est

agencé pour pouvoir appliquer momentanément une force de freinage au résonateur mécanique,

- un circuit de régulation (22; 74) comprenant un dispositif de mesure (DIV1 & DIV2, CB) agencé pour pouvoir mesurer, sur la base d'un signal de détection (S_C) fourni par le capteur, une dérive temporelle de l'oscillateur mécanique relativement à l'oscillateur auxiliaire, ce circuit de régulation étant agencé pour déterminer si une dérive temporelle mesurée correspond à au moins une certaine avance ou à au moins un certain retard et pour pouvoir, si c'est le cas, générer un signal de commande qui active sélectivement le dispositif de freinage en fonction de la dérive temporelle mesurée, de manière à engendrer au moins une impulsion de freinage qui est appliquée au résonateur mécanique pour corriger au moins partiellement la dérive temporelle mesurée ;

caractérisée en ce que le circuit de régulation (22; 74) comprend un dispositif générateur d'au moins une fréquence qui est agencé de manière à pouvoir générer un signal digital périodique à une fréquence F_{SUP} ; et **en ce que** le circuit de régulation est agencé pour pouvoir fournir, lorsqu'il détermine une dérive temporelle correspondant à au moins un certain retard dans la marche de la pièce d'horlogerie, momentanément au dispositif de freinage un premier signal de commande pour activer ce dispositif de freinage de manière que le dispositif de freinage génère, durant une première période de correction, une série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à ladite fréquence F_{SUP} ; cette fréquence F_{SUP} et la durée de la première période de correction étant prévues et le dispositif de freinage étant agencé de manière que la série d'impulsions de freinage périodiques à la fréquence F_{SUP} puisse engendrer, au cours de la première période de correction, une phase synchrone dans laquelle l'oscillateur mécanique est synchronisé sur une fréquence de correction (F_{cor2}) qui est supérieure à une fréquence de consigne F_{0c} prévue pour l'oscillateur mécanique.

2. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** ladite fréquence F_{SUP} est comprise dans une première plage de valeurs s'étendant entre $(M+1)/M$ et $(M+2)/M$, inclus, multipliés par une fréquence $F_Z(N)$ égale au double de ladite fréquence de consigne F_{0c} divisée par un nombre entier positif N , soit $[(M+1)/M] \cdot F_Z(N) < F_{SUP} \leq [(M+2)/M] \cdot F_Z(N)$ avec la fréquence $F_Z(N) = 2 \cdot F_{0c}/N$, M étant égal à cent fois deux à la puissance K avec K égal à un nombre entier positif supérieur à zéro et inférieur à treize, soit $0 < K < 13$ et $M = 100 \cdot 2^K$, et N étant prévu inférieur à M divisé par trente, soit $N < M/30$.

3. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1 ou 2, **caractérisée en ce que** ledit dispositif générateur d'au moins une fréquence est un dispositif générateur de fréquences agencé de manière à pouvoir en outre générer un signal digital périodique à une fréquence F_{INF} ; et **en ce que** le circuit de régulation est agencé pour pouvoir fournir, lorsqu'il détermine une dérive temporelle correspondant à au moins une certaine avance dans la marche de la pièce d'horlogerie, momentanément au dispositif de freinage un deuxième signal de commande pour activer ce dispositif de freinage de manière que le dispositif de freinage génère, durant une deuxième période de correction, une série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à ladite fréquence F_{INF} ; cette fréquence F_{INF} et la durée de la deuxième période de correction étant prévues et le dispositif de freinage étant agencé de manière que la série d'impulsions de freinage périodiques à la fréquence F_{INF} puisse engendrer, au cours de la deuxième période de correction, une phase synchrone dans laquelle l'oscillateur mécanique est synchronisé sur une fréquence de correction (F_{cor1}) qui est inférieure à la fréquence de consigne F_{0c} .

4. Pièce d'horlogerie selon la revendication 3, **caractérisée en ce que** ladite fréquence F_{INF} est comprise dans une deuxième plage de valeurs s'étendant entre $(M-2)/M$, inclus, et $(M-1)/M$ multipliés par ladite fréquence $F_Z(N)$, soit $[(M-2)/M] \cdot F_Z(N) \leq F_{INF} < [(M-1)/M] \cdot F_Z(N)$.

5. Pièce d'horlogerie selon la revendication 3 ou 4, **caractérisée en ce que** le circuit de régulation est agencé pour pouvoir fournir, chaque fois que le circuit de mesure détermine une dérive temporelle correspondant à au moins une certaine avance ou à au moins un certain retard, momentanément au dispositif de freinage un signal de commande qui est sélectivement formé par :

- un premier signal d'activation périodique du dispositif de freinage, qui est déterminé par ledit signal digital périodique à ladite fréquence F_{INF} , lorsque la dérive temporelle correspond à ladite au moins une certaine avance, de manière à générer une première série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à la fréquence F_{INF} , et
- un deuxième signal d'activation périodique du dispositif de freinage, qui est déterminé par ledit signal digital périodique à ladite fréquence F_{SUP} , lorsque la dérive temporelle correspond audit au moins un certain retard, de manière à générer une deuxième série d'impulsions de freinage périodiques qui sont appliquées au résonateur mécanique à la fréquence F_{SUP} .

6. Pièce d'horlogerie selon la revendication 2 ou 4, **caractérisée en ce que** le nombre entier positif K est supérieur à deux et inférieur à dix, soit $2 < K < 10$, et le nombre N est inférieur au nombre M divisé par cent ($N < M/100$). 5
7. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** le dispositif de freinage (26) est formé par un actionneur qui comprend un organe de freinage mécanique (28) agencé pour être actionné, en réponse audit signal de commande (S_F), de manière à exercer, durant les impulsions de freinage, un couple de freinage mécanique sur une surface de freinage (15) d'un balancier pivotant (16) que comprend le résonateur mécanique (14). 10 15
8. Pièce d'horlogerie selon la revendication 7, **caractérisée en ce que** le balancier pivotant comprend une serge (17) qui définit la surface de freinage, laquelle est circulaire ; et **en ce que** l'organe de freinage mécanique (28) comprend une partie mobile qui définit un patin de freinage agencé de manière à pouvoir venir exercer une certaine pression contre la surface de freinage circulaire (15) lors de l'application des impulsions de freinage au résonateur mécanique. 20 25
9. Pièce d'horlogerie selon la revendication 8, **caractérisée en ce que** le balancier pivotant et l'organe de freinage mécanique sont agencés de manière que les impulsions de freinage mécanique puissent être appliquées principalement par un frottement sec dynamique entre l'organe de freinage mécanique et la surface de freinage. 30 35
10. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 7 à 9, **caractérisée en ce que** la surface de freinage (15) est configurée de manière à permettre au dispositif de freinage de débiter, dans une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique, une impulsion de freinage de chaque première série d'impulsions de freinage et une impulsion de freinage de chaque deuxième série d'impulsions de freinage à n'importe quelle position angulaire du résonateur mécanique le long dudit axe d'oscillation. 40 45
11. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** les impulsions de freinage mécanique ont une durée T_P inférieure au quart d'une période de consigne T_{0c} , soit $T_P < T_{0c}/4$, T_{0c} étant par définition l'inverse de la fréquence de consigne F_{0c} . 50
12. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 1 à 6, **caractérisée en ce que** le dispositif de freinage (76) est formé par un système électromagnétique qui comprend une bobine (78) portée par le résonateur mécanique (14A) ou un support (5) de ce résonateur mécanique et au moins un aimant permanent (64,65) porté respectivement par ce support ou ce résonateur mécanique, le système électromagnétique étant agencé de manière qu'une tension induite est générée par ledit au moins un aimant permanent entre les deux bornes (78A,78B) de la bobine dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique pour une plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique ; et **en ce que** le dispositif de régulation est agencé de manière à permettre au circuit de régulation de diminuer périodiquement l'impédance entre les deux bornes de la bobine durant des intervalles de temps distincts (T_P) pour générer ladite série d'impulsions de freinage périodiques à ladite fréquence F_{INF} et ladite série d'impulsions de freinage périodiques à ladite fréquence F_{SUP} . 55
13. Pièce d'horlogerie selon la revendication 12, **caractérisée en ce que** le système électromagnétique comprend une paire d'aimants bipolaires (64,65) à aimantation axiale et de polarités opposées, ces deux aimants bipolaires étant agencés sur un balancier (16A) symétriquement relativement à un demi-axe de référence (62A) de ce balancier, ce demi-axe de référence définissant une position angulaire zéro lorsque le résonateur mécanique est dans sa position neutre ; et **en ce que** la bobine est agencée sur ledit support et présente un décalage angulaire relativement à la position angulaire zéro de manière qu'une tension induite dans cette bobine intervienne substantiellement, lorsque l'oscillateur mécanique oscille dans sa plage de fonctionnement utile, dans chaque alternance alternativement avant et après le passage du résonateur mécanique par sa position neutre dans cette alternance, les positions angulaires extrêmes du résonateur mécanique dans ladite plage de fonctionnement utile étant, en valeurs absolues, supérieures audit décalage angulaire qui est défini comme la distance angulaire minimale entre la position angulaire zéro et la position angulaire du centre de la bobine. 60 65
14. Pièce d'horlogerie selon la revendication 13, **caractérisée en ce que** ledit décalage angulaire est sensiblement égal à 180° . 70
15. Pièce d'horlogerie selon la revendication 13 ou 14, **caractérisée en ce que** les impulsions de freinage électromagnétique sont engendrées par un court-circuit de la bobine durant les intervalles de temps distincts (T_P) qui sont sensiblement égaux ou supérieures à la durée maximale de zones temporelles sans tension induite dans la bobine autour des deux positions extrêmes du résonateur mécanique pour la plage de fonctionnement utile de l'oscillateur mécanique. 75

16. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 13 à 15, **caractérisée en ce qu'elle** comprend un circuit d'alimentation formé par une capacité de stockage (C_{AL}) et un circuit redresseur d'une tension induite dans la bobine (78) par au moins un aimant permanent (66, 67) porté par le balancier (16A) et couplé à la bobine. 5
17. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 13 à 15, **caractérisée en ce que** le capteur est formé par la bobine et au moins un aimant permanent (66, 67) porté par le balancier et couplé à la bobine, ce capteur comprenant en outre un comparateur (52) recevant, à une première entrée, un signal (S_B) représentatif de la tension induite par cet au moins un aimant permanent et, à une seconde entrée, une tension de référence, cette dernière étant sélectionnée de manière que le comparateur fournisse à un compteur bidirectionnel (CB) du dispositif de mesure un nombre d'impulsions prédéterminé par période d'oscillation de l'oscillateur mécanique pour la plage de fonctionnement utile de cet oscillateur mécanique. 10 15 20

25

30

35

40

45

50

55

Fig. 1

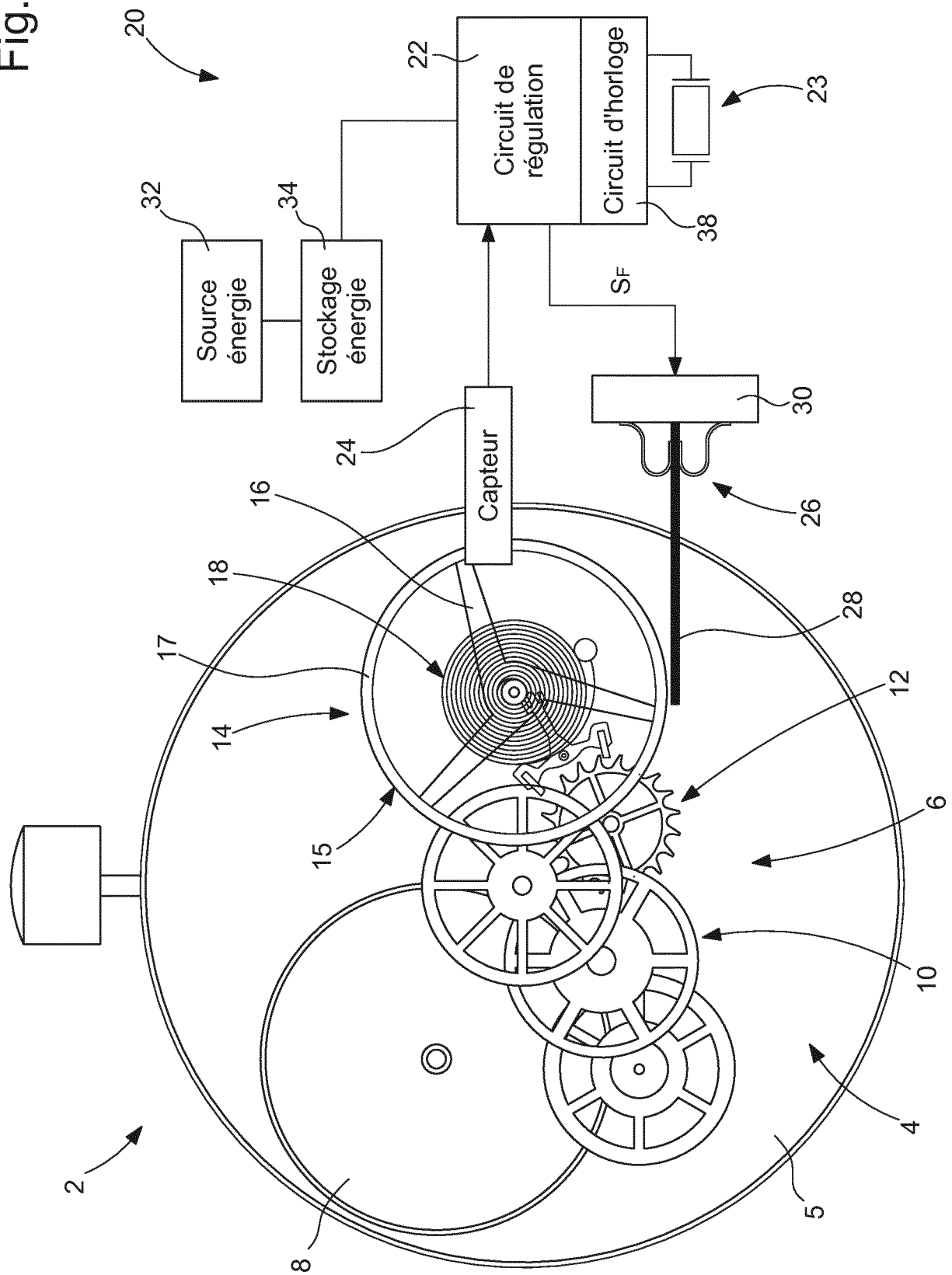


Fig. 2

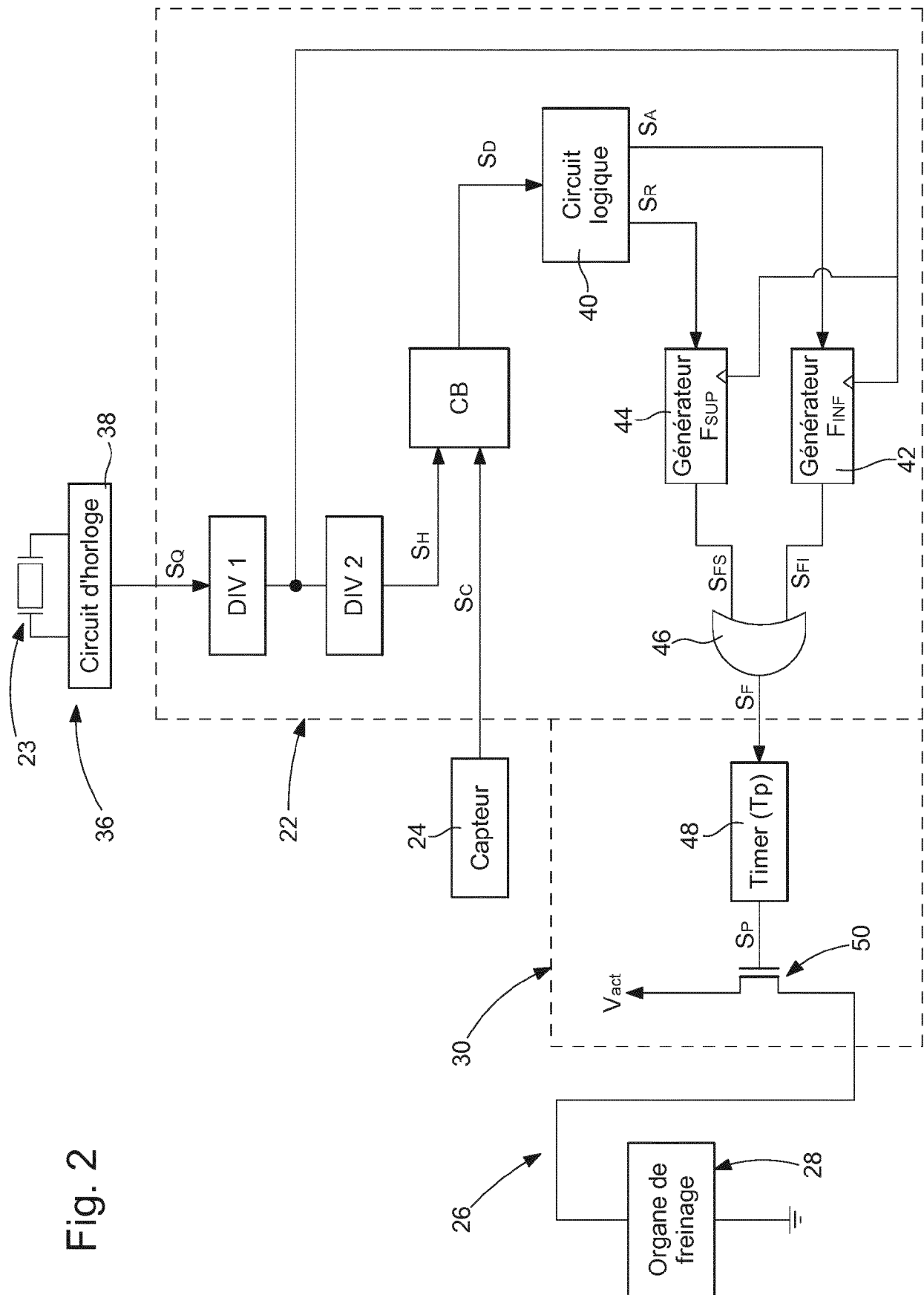


Fig. 3

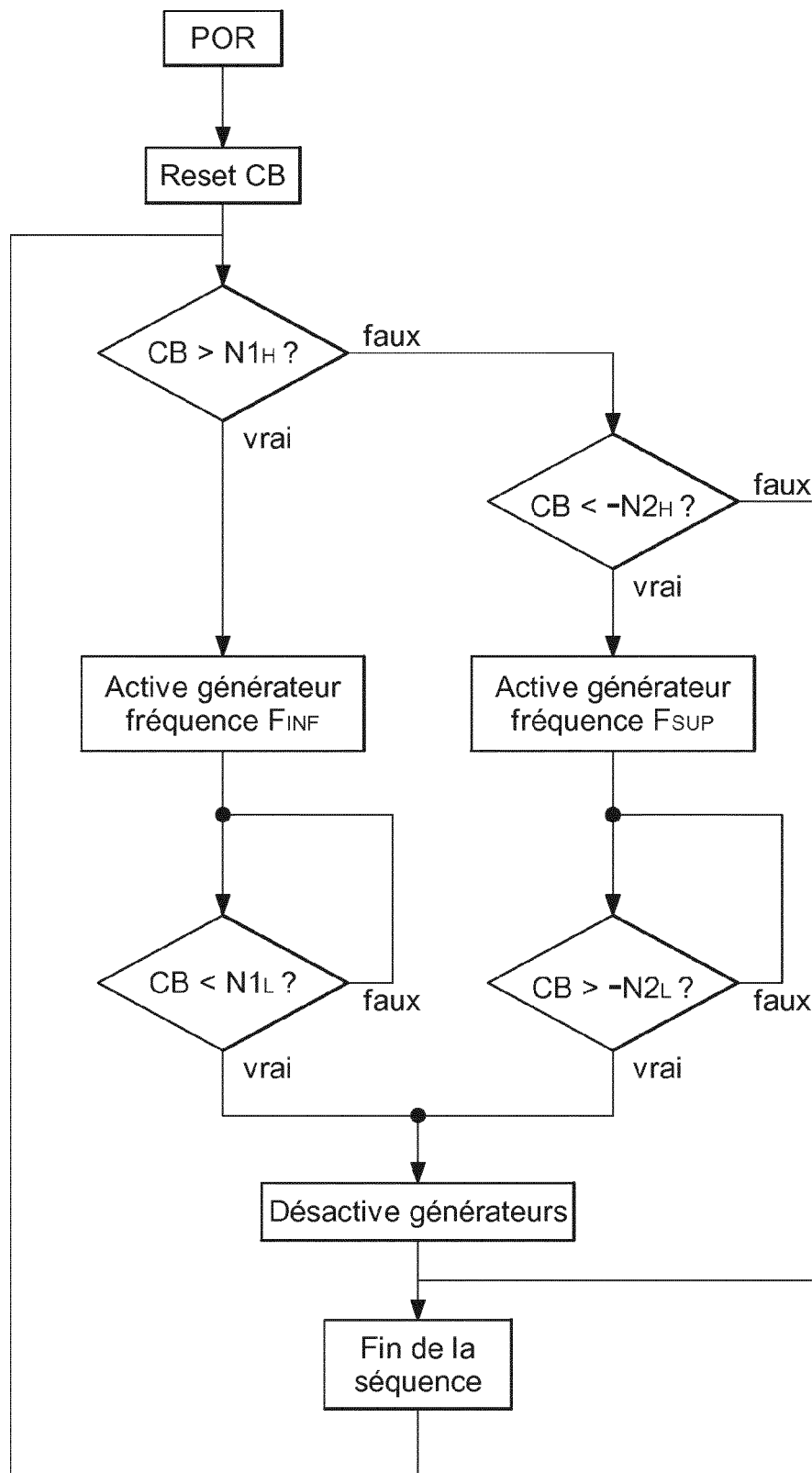


Fig. 4

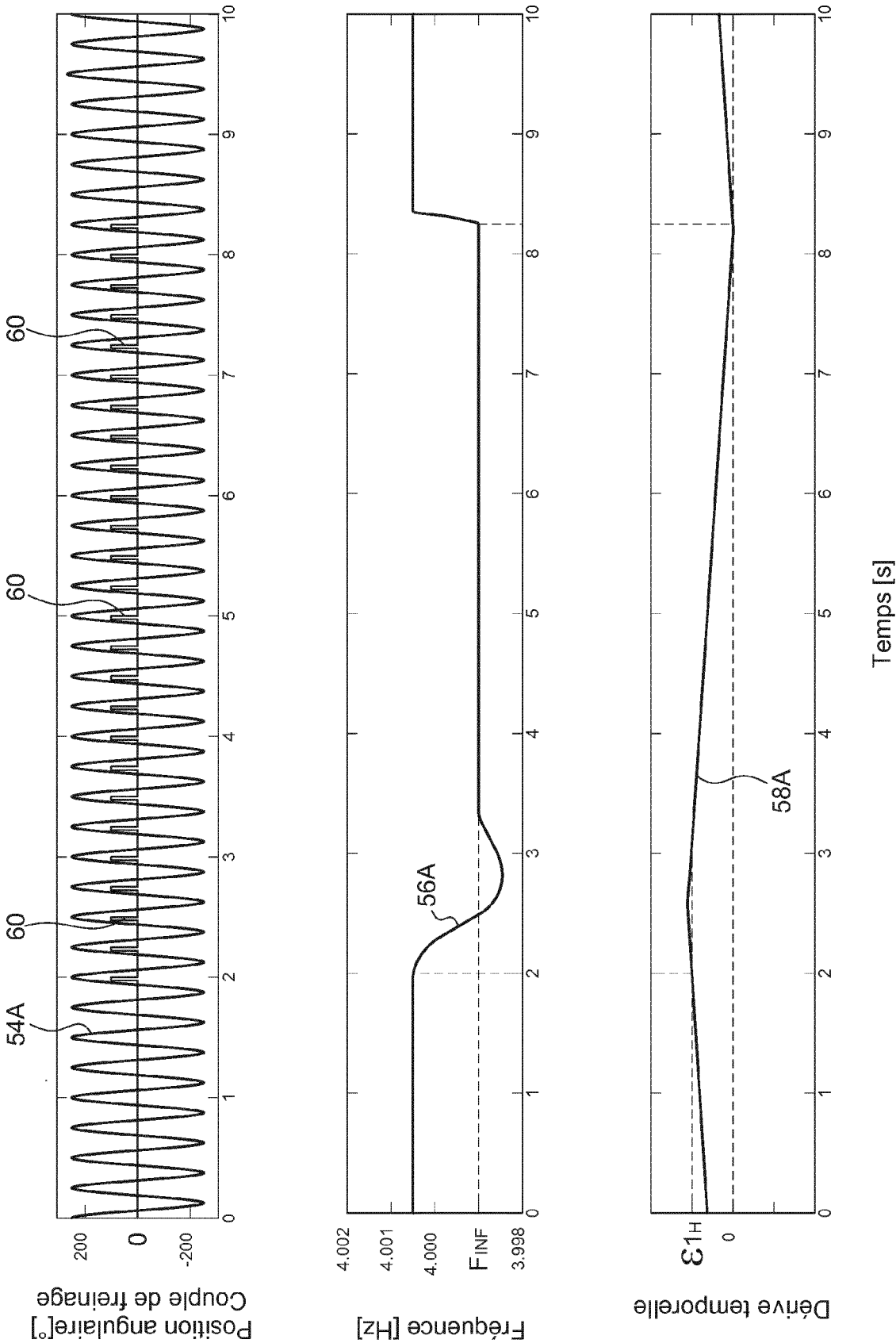
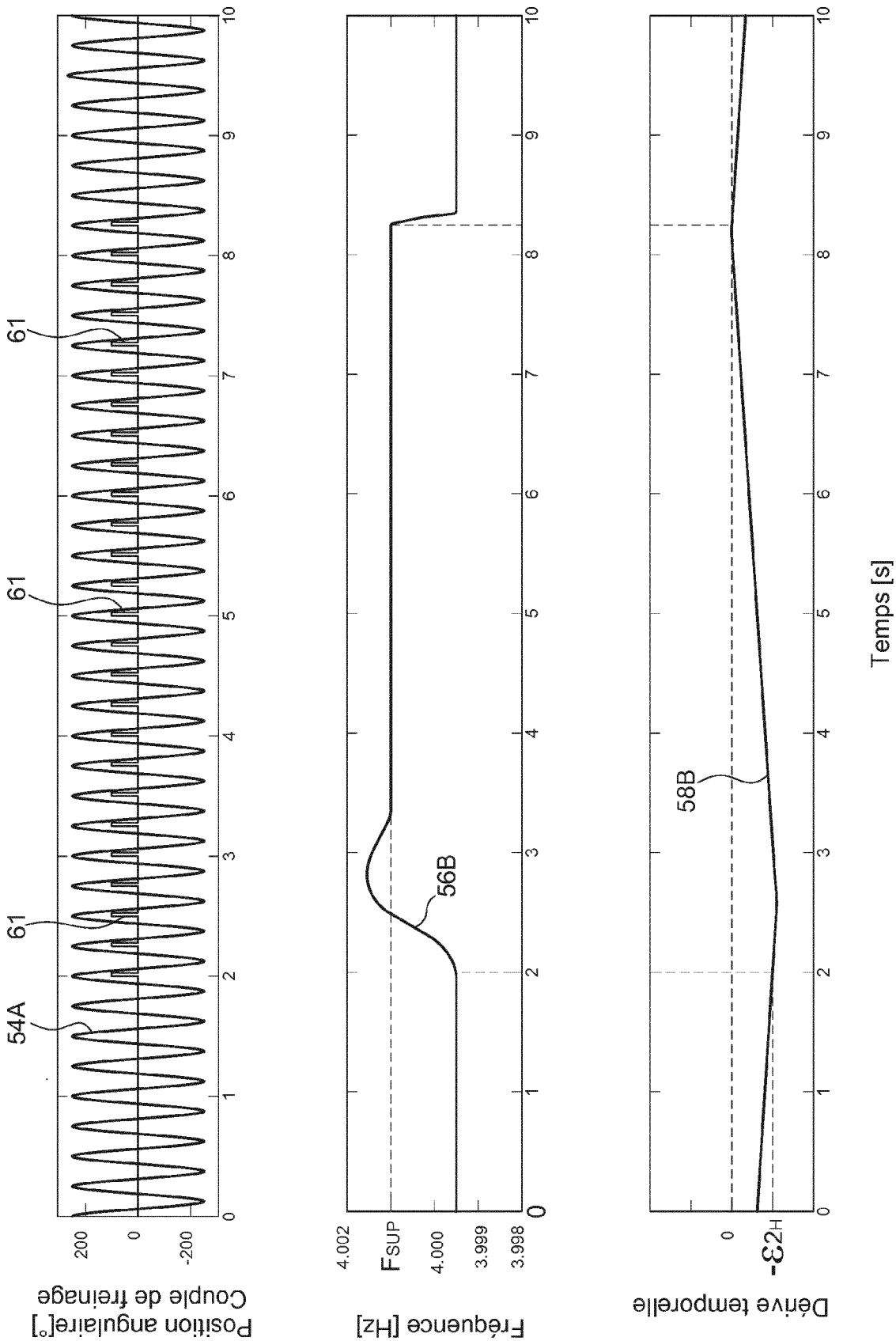


Fig. 5



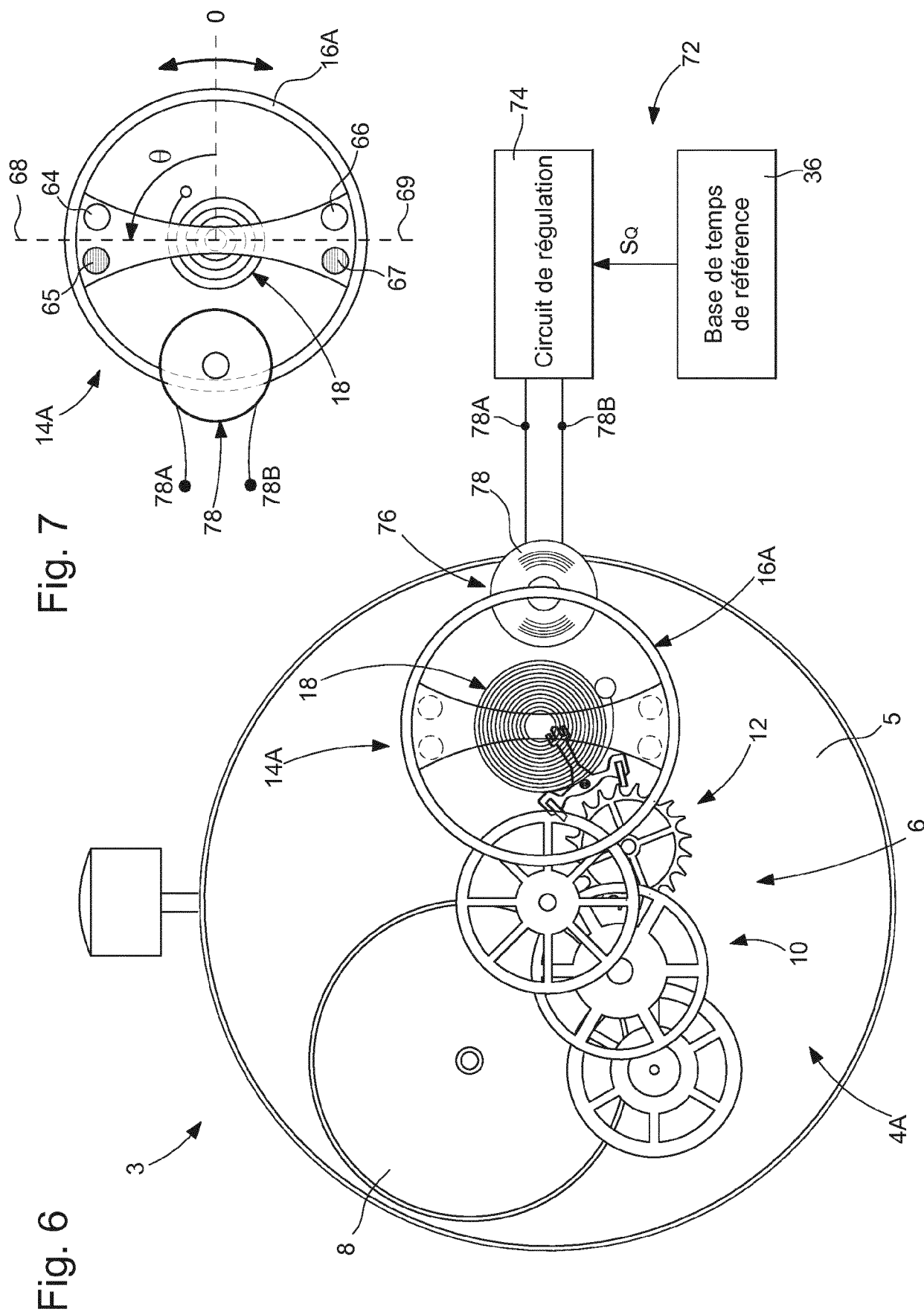


Fig. 8

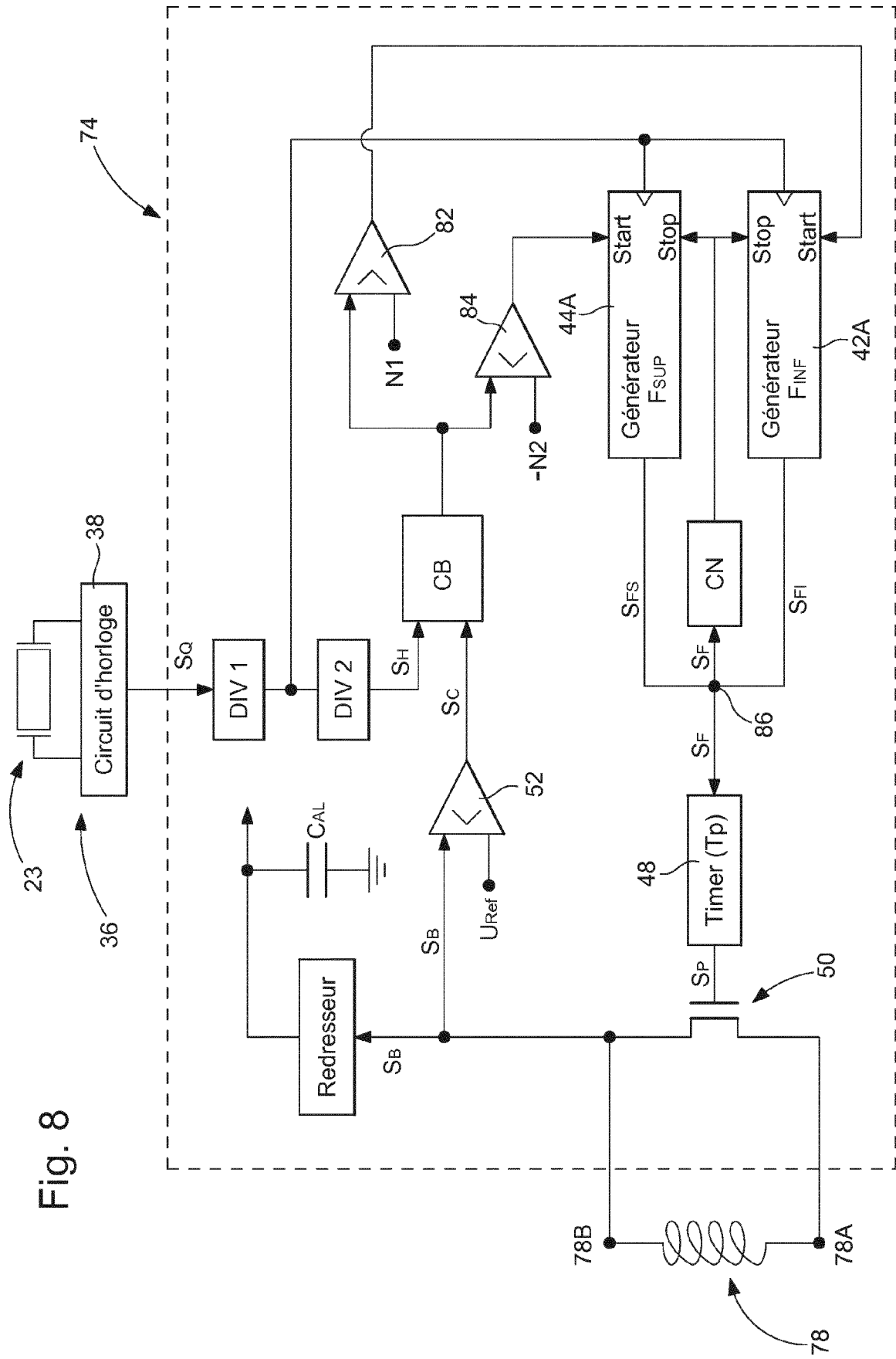
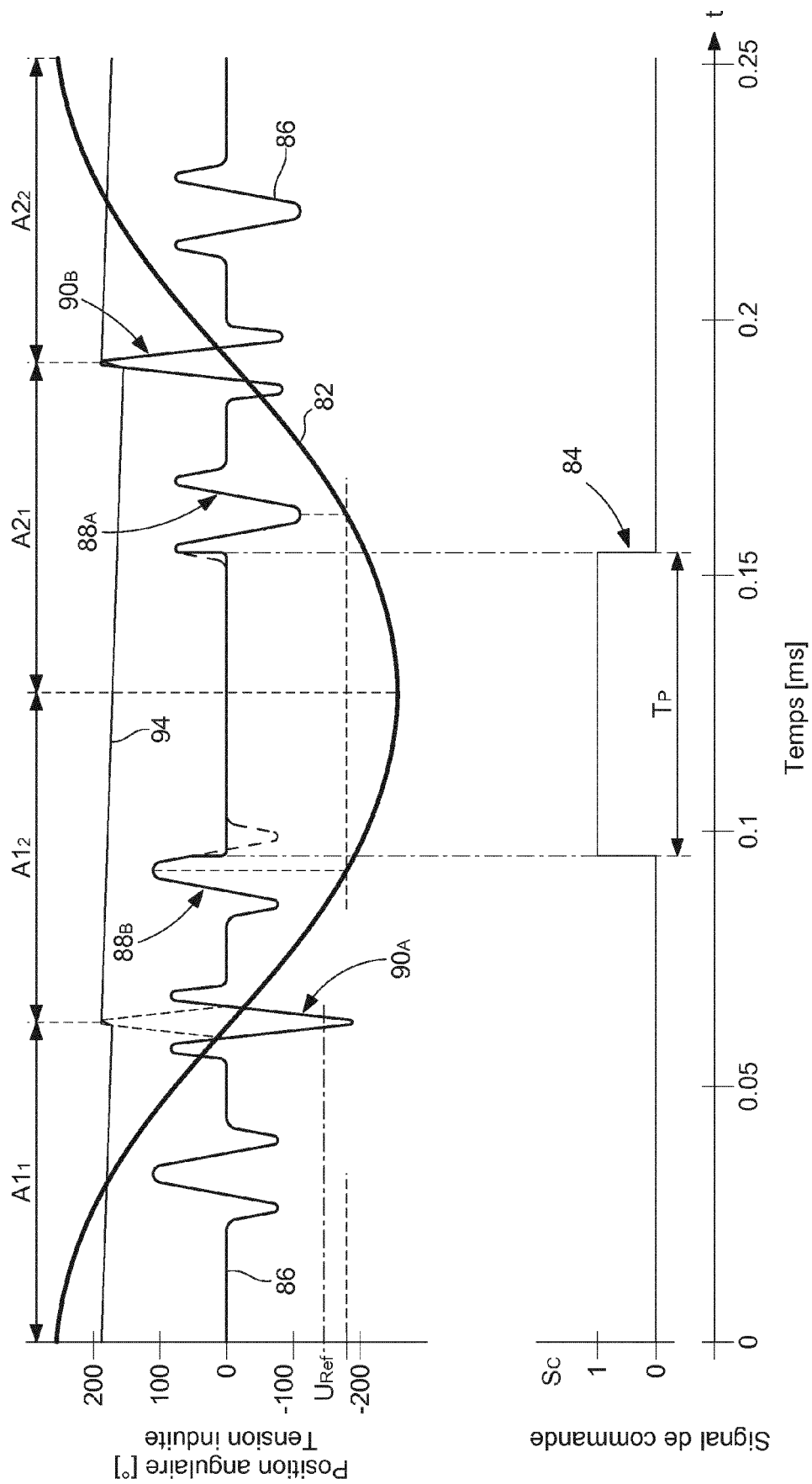


Fig. 9





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 19 19 3740

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	EP 1 241 538 A1 (SEIKO INSTR INC [JP]) 18 septembre 2002 (2002-09-18) * alinéas [0082] - [0124] * * figures 5, 6, 8 *	1-17	INV. G04C3/04 G04C11/08
A	EP 1 014 230 A1 (PIGUET FREDERIC S A [CH]) 28 juin 2000 (2000-06-28) * figures 1, 2 * * alinéas [0014] - [0029] *	1-17	
A	US 2004/013047 A1 (SHIMIZU EISAKU [JP] ET AL) 22 janvier 2004 (2004-01-22) * abrégé * * figures 1, 4, 7 *	1	
A	US 2002/141528 A1 (KOIKE KUNIO [JP] ET AL) 3 octobre 2002 (2002-10-03) * abrégé * * figures 4,8, 11, 13-16 *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G04C
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		17 janvier 2020	Pirozzi, Giuseppe
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 03.02 (P04C02)

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

EP 19 19 3740

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.

17-01-2020

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 1241538 A1	18-09-2002	CN 1347520 A	01-05-2002
		CN 1434933 A	06-08-2003
		EP 1164441 A1	19-12-2001
		EP 1241538 A1	18-09-2002
		WO 0148565 A1	05-07-2001
		WO 0148567 A1	05-07-2001
EP 1014230 A1	28-06-2000	EP 1014230 A1	28-06-2000
		HK 1029186 A1	30-04-2010
US 2004013047 A1	22-01-2004	CN 1374572 A	16-10-2002
		DE 60217427 T2	25-10-2007
		EP 1239350 A2	11-09-2002
		HK 1046314 A1	25-05-2007
		JP 3823741 B2	20-09-2006
		JP 2002257949 A	11-09-2002
		US 2004013047 A1	22-01-2004
US 2002141528 A1	03-10-2002	CN 1379298 A	13-11-2002
		EP 1246032 A2	02-10-2002
		JP 2002296365 A	09-10-2002
		US 2002141528 A1	03-10-2002

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

- CH 713306 A2 [0004] [0005]
- EP 3339982 A1 [0004] [0006]
- EP 3339982 A [0019]
- CH 713306 [0069]