



CONFÉDÉRATION SUISSE
 INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH 715 049 A2**

(51) Int. Cl.: **G04C 5/00** (2006.01)
G04B 17/28 (2006.01)
G04B 15/06 (2006.01)

Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein

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

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 00601/19

(22) Date de dépôt: 07.05.2019

(43) Demande publiée: 13.12.2019

(30) Priorité: 07.06.2018 CH 734/18

(71) Requérant:
 Montres Breguet S.A., Place de la Tour 23
 1344 L'Abbaye (CH)

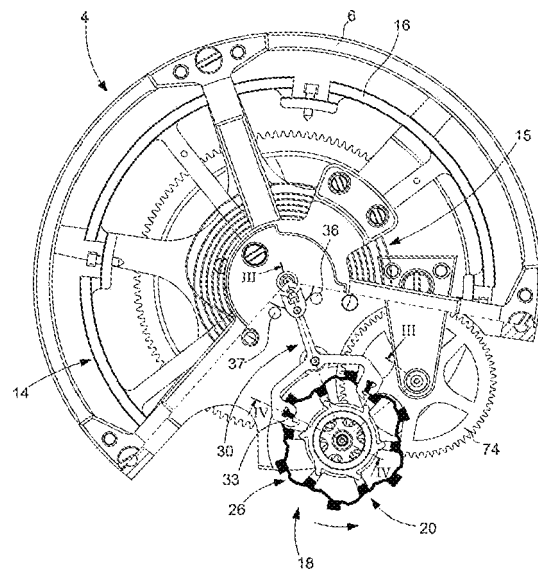
(72) Inventeur(s):
 Polychronis Nakis Karapatis, 1324 Premier (CH)
 Marc Stranczl, 1260 Nyon (CH)
 Benoît Légeret, 1024 Ecublens (CH)

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

(54) **Pièce d'horlogerie comprenant un tourbillon.**

(57) La pièce d'horlogerie comprend un tourbillon comprenant une cage (6) qui porte un balancier (16), un spiral (15) et un dispositif d'échappement magnétique (18), ce dernier comprenant un mobile d'échappement (20), comprenant au moins une structure magnétique annulaire (26), et en outre au moins un élément magnétique (33) couplé avec la structure magnétique et ayant un mouvement oscillant synchrone avec l'oscillation du résonateur mécanique (14). L'échappement magnétique (18) est agencé de manière à présenter alternativement des phases d'accumulation d'énergie, provenant d'une conversion d'énergie mécanique fournie par le barillet en énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique (18), et des phases de transfert d'énergie accumulée dans l'échappement magnétique (18) au résonateur mécanique (14). Au cours des phases de transfert d'énergie, l'élément magnétique (33) subit une force magnétique radiale, relativement à l'axe de rotation du mobile d'échappement (20), de sorte que l'échappement magnétique (18) convertit alors en énergie mécanique de l'énergie potentielle magnétique accumulée dans la phase d'accumulation d'énergie précédente pour pouvoir entretenir l'oscillation du résonateur mécanique (14).

L'invention permet d'augmenter la fréquence d'oscillation de résonateur mécanique (14) et aussi la précision de marche.



Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne les pièces d'horlogerie comprenant un mouvement horloger équipé d'un tourbillon portant dans une cage un résonateur mécanique, formé d'un balancier et d'un spiral, et un dispositif d'échappement. Par tourbillon, on comprend aussi ce que l'homme du métier appelle parfois un carrousel. En outre, un tel mouvement horloger comprend un barillet agencé pour accumuler de l'énergie mécanique et un rouage reliant cinématiquement la cage du tourbillon au barillet.

Arrière-plan technologique

[0002] Les mouvements horlogers équipés d'un tourbillon sont connus de longue date. On nomme généralement 'un tourbillon' un tel mouvement horloger et même une montre équipée d'un tel mouvement horloger.

[0003] Dans un tourbillon classique, la cage fonctionne comme un mobile de seconde. Elle comprend un pignon de seconde et elle est entraînée via ce pignon de seconde par une roue moyenne. La cage porte un échappement classique formé d'un mobile d'échappement et d'une ancre, en particulier d'une ancre suisse. La force est transmise au mobile d'échappement via son pignon qui engrène, à la manière d'un satellite, avec une roue de seconde fixe et solidaire de la platine.

[0004] Le fonctionnement d'un échappement classique à ancre suisse est bien connu de l'homme du métier. La roue d'échappement présente une pluralité de dents qui coopèrent avec deux palettes portées par l'ancre. Chaque palette présente à son extrémité libre un plan incliné. Pour engendrer une impulsion d'entretien du balancier-spiral, une des dents de la roue d'échappement vient appuyer tangentiellement contre le plan incliné d'une des deux palettes, de manière à exercer un couple de force sur l'ancre qui est ainsi entraînée en rotation par la roue d'échappement, cette dernière étant entraînée en rotation par la rotation de la cage via la roue de seconde fixe. L'impulsion d'entretien se termine lorsque le bec d'impulsion, que comporte chaque dent de la roue d'échappement, se trouve au bas du plan incliné. Ainsi, pour engendrer une impulsion d'entretien, la roue d'échappement doit pouvoir subir une rotation sur une distance angulaire correspondant à la distance angulaire, relativement à l'axe de rotation du mobile d'échappement, du plan incliné de la palette avec laquelle elle interagit. Or, comme indiqué, la rotation de la roue d'échappement est intimement liée à celle de la cage du tourbillon, une liaison cinématique étant prévue entre la roue d'échappement et la cage du tourbillon. Par conséquent, pour entraîner en rotation la roue d'échappement il faut mettre en mouvement de rotation le tourbillon qui a une relativement grande inertie. L'impulsion d'entretien transmise au balancier est donc limitée en intensité par l'inertie du tourbillon et également du rouage reliant cinématiquement la cage du tourbillon au barillet. L'inertie de la cage du tourbillon est rapportée à la roue d'échappement, ce qui augmente l'inertie de cette dernière.

[0005] Le mécanisme à tourbillon est connu pour moyenniser les positions verticales et donc améliorer la marche d'un mouvement horloger dans une montre-bracelet lorsqu'elle est portée. Toutefois, dans un mouvement classique, le tourbillon augmente l'inertie du dispositif d'échappement car la cage du tourbillon est solidaire en rotation de la roue d'échappement. Ceci limite l'accélération que peut subir la roue d'échappement. L'impulsion donnée au balancier étant dépendante de la rotation de la roue d'échappement, il n'est pas possible d'augmenter la fréquence au-dessus de 5 Hz de manière fiable au niveau chronométrique. Il en résulte que la fréquence d'oscillation possible pour le balancier-spiral d'un tel mécanisme à tourbillon est limitée. Ainsi, la fréquence d'oscillation d'un balancier-spiral classique dans un tourbillon est généralement inférieure à cinq Hertz (5 Hz) et peut dans certains cas spécifiques atteindre 5 Hz. Elle vaut usuellement par exemple trois Hertz. On comprend que ceci limite la précision de marche que l'on peut obtenir avec un mouvement horloger équipé d'un tourbillon classique.

[0006] Ainsi, l'avantage remarquable du tourbillon pour la précision de la marche au porté d'une montre qui l'incorpore est péjoré, à cause du fonctionnement de l'échappement classique, par la grande inertie que présente généralement sa cage.

Résumé de l'invention

[0007] Le but de la présente invention est de fournir une solution au problème du tourbillon classique mentionné précédemment, de manière à permettre d'augmenter encore plus le bénéfice chronométrique d'un tourbillon, en particulier d'augmenter la précision de marche du mouvement horloger équipé d'un tourbillon selon l'invention par l'agencement d'un résonateur mécanique dans la cage du tourbillon, ayant une fréquence d'oscillation F_0 supérieure aux fréquences conventionnelles, de préférence supérieure à cinq Hertz ($F_0 > 5\text{Hz}$).

[0008] A cet effet, l'invention concerne une pièce d'horlogerie comprenant un mouvement horloger équipé d'un tourbillon, qui comprend une cage agencée tournante autour d'un axe principal, d'un barillet, agencé pour accumuler de l'énergie mécanique, et d'un rouage reliant cinématiquement la cage du tourbillon au barillet. Le tourbillon porte un résonateur mécanique, formé d'un balancier et d'un spiral, et un dispositif d'échappement. Selon l'invention, le dispositif d'échappement est un échappement magnétique qui comprend un mobile d'échappement formé d'un pignon d'échappement et d'une structure magnétique ou de structures magnétiques ayant une forme générale annulaire qui est centrée sur un axe de rotation du mobile d'échappement. L'échappement magnétique comprenant en outre un élément magnétique qui, ou une pluralité d'éléments magnétiques dont chacun est agencé de manière à avoir un mouvement oscillant qui est synchrone

avec l'oscillation du résonateur mécanique et qui présente une composante radiale non nulle relativement audit axe de rotation. L'élément magnétique ou chacun des éléments magnétiques de la pluralité d'éléments magnétiques est couplé, au moins momentanément de manière périodique, avec la structure magnétique ou les structures magnétiques de manière que le mobile d'échappement effectue une rotation d'une période angulaire prédéterminée à chaque période d'oscillation du balancier. Ensuite, selon l'invention, l'échappement magnétique présente, en fonctionnement normal du mouvement horloger, alternativement des phases d'accumulation d'énergie, provenant d'une conversion d'énergie mécanique fournie par le barillet en énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique, et des phases de transfert d'énergie accumulée dans l'échappement magnétique au résonateur magnétique.

[0009] Finalement, l'échappement magnétique est agencé de manière que:

- au cours de chaque phase d'accumulation d'énergie, l'élément magnétique ou l'ensemble des éléments magnétiques, qui parmi la pluralité d'éléments magnétiques sont alors couplés à la structure magnétique ou aux structures magnétiques, subit un couple de force magnétique, relativement audit axe de rotation, ayant un sens opposé à celui d'un couple d'entraînement, appliqué par le barillet via la cage du tourbillon au mobile d'échappement, et une intensité inférieure à celle de ce couple de force d'entraînement, de sorte que le mobile d'échappement est apte à tourner d'un certain angle pour permettre l'accumulation d'une certaine énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique;
- au cours de chaque phase de transfert d'énergie, l'élément magnétique ou chaque élément de l'ensemble des éléments magnétiques, qui parmi la pluralité d'éléments magnétiques est couplé à la structure magnétique ou aux structures magnétiques lors d'une phase d'accumulation d'énergie précédente, subit une force magnétique radiale (laquelle est de préférence principale), relativement audit axe de rotation, au cours d'une alternance de son mouvement oscillant et dans le sens de la composante radiale de ce mouvement oscillant durant cette alternance, de sorte que l'échappement magnétique convertit en énergie mécanique de l'énergie potentielle magnétique accumulée (de préférence la majeure partie) dans la phase d'accumulation d'énergie précédente pour pouvoir entretenir l'oscillation du résonateur mécanique.

[0010] Grâce aux caractéristiques de la pièce d'horlogerie selon l'invention, en particulier au type d'échappement magnétique sélectionné pour équiper le tourbillon, les impulsions d'énergie transmises au résonateur mécanique pour l'entretenir ne sont plus limitées en intensité par l'inertie de la cage de tourbillon. De fait, même l'inertie du rouage n'influence plus la génération de ces impulsions d'énergie. En effet, seule l'inertie de l'ancre (dans le cas où un arrêt est prévu) influence la dynamique des impulsions d'entretien fournies par l'échappement magnétique au résonateur mécanique. On notera que l'ancre forme ici un convertisseur magnéto-mécanique. Ainsi, ces impulsions d'entretien peuvent être plus brèves, c'est-à-dire intervenir dans des intervalles de temps très limités qui ne dépendent plus de l'inertie du tourbillon. Ces caractéristiques remarquables permettent d'améliorer la précision de la marche du mouvement horloger et en particulier d'améliorer l'isochronisme des résonateurs mécaniques formés par un balancier-spiral. De plus, elles permettent d'agencer dans le tourbillon des résonateurs mécaniques ayant un haut facteur de qualité, en particulier un balancier-spiral ayant une fréquence naturelle d'oscillation bien plus élevée que celle d'un balancier-spiral usuel pour un tourbillon classique, en particulier une fréquence naturelle supérieure à 5 Hz.

[0011] L'échappement magnétique selon la présente invention permet donc de dissocier temporellement la transmission périodique d'une certaine quantité d'énergie du barillet à l'échappement magnétique, qui est agencé pour l'accumuler momentanément, et la transmission de cette énergie accumulée de l'échappement magnétique au résonateur mécanique.

[0012] Ainsi, grâce à l'échappement magnétique tel que sélectionné dans le cadre de l'invention pour équiper un tourbillon, les impulsions d'entretien fournies par l'échappement magnétique au résonateur mécanique peuvent être engendrées principalement sans rotation de la roue d'échappement et substantiellement de manière indépendante d'une telle rotation. Ainsi, l'inertie du rouage et l'inertie de la cage de tourbillon n'entravent plus la génération des impulsions d'entretien. Ce qui est important, c'est le caractère radial de la force qui intervient principalement pour générer chaque impulsion d'entretien après une phase d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique, de sorte que le fait que la cage tourne ou pas ou seulement d'un petit angle est sensiblement sans conséquence sur la génération des impulsions d'entretien. De ce fait, le mécanisme à tourbillon équipé d'un échappement magnétique selon l'invention peut délivrer des impulsions d'entretien de courte durée et de relativement grande intensité.

[0013] Dans un mode de réalisation avantageux, le résonateur mécanique comprend un balancier qui est pivoté magnétiquement dans la cage du tourbillon, laquelle comprend à cet effet deux paliers magnétiques. Cette variante particulière permet, en plus des divers avantages procurés par l'échappement magnétique sélectionné, de fortement limiter les différences de marche du résonateur mécanique entre les positions horizontales et les positions verticales (ces dernières étant moyennées grâce au tourbillon). On comprend donc qu'il devient ainsi possible d'obtenir une montre à tourbillon ayant une très grande précision de marche.

Brève description des figures

[0014] 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:

CH 715 049 A2

- la fig. 1 est une vue partielle en perspective d'un premier mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie selon l'invention, laquelle est formée par un mouvement équipé d'un tourbillon;
- la fig. 2 est une vue partielle de dessus du mouvement horloger de la fig. 1 avec quelques éléments enlevés pour faciliter la vue d'éléments importants pour l'invention;
- la fig. 3 est une vue en coupe du mouvement horloger de la fig. 1, selon le trait de coupe III-III indiqué à la fig. 2;
- la fig. 4 est une vue en coupe du mouvement horloger de la fig. 1, selon le trait de coupe IV-IV indiqué à la fig. 2;
- la fig. 5 donne les deux courbes de l'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique de la fig. 2, en fonction de la position angulaire du mobile d'échappement, pour l'arrêt positionné respectivement dans l'une et l'autre de ses deux positions de repos;
- les fig. 6 à 9 représentent partiellement le résonateur mécanique et l'échappement magnétique, incorporés dans le tourbillon du premier mode de réalisation, dans quatre positions différentes lors d'une alternance du résonateur mécanique;
- la fig. 10 est une coupe partielle, similaire à celle de la fig. 3, d'un deuxième mode de réalisation de l'invention;
- la fig. 11 est une représentation schématique partielle d'une première variante du premier ou deuxième mode de réalisation, dans laquelle seuls le balancier et l'échappement magnétique incorporés dans le tourbillon ont été représentés;
- la fig. 12 montre une deuxième variante de réalisation du premier ou deuxième mode de réalisation de l'invention;
- la fig. 13 montre le résonateur mécanique et l'échappement magnétique, porté par la cage d'un tourbillon, d'un troisième mode de réalisation de l'invention; et
- la fig. 14 représente, pour l'échappement magnétique de la fig. 13, des courbes d'énergie potentielle magnétique définie par la structure magnétique et alternativement deux éléments magnétiques fixés au balancier et interagissant avec la structure magnétique.

Description détaillée de l'invention

[0015] A l'aide des la fig. 1 à 11, on décrira par la suite un premier mode de réalisation de l'invention et en particulier le fonctionnement spécifique de l'échappement magnétique incorporé dans le tourbillon de l'invention.

[0016] La pièce d'horlogerie comprend un mouvement horloger 2 équipé d'un tourbillon 4 comprenant une cage 6 agencée tournante autour d'un axe principal 8, d'un barillet 10 agencé pour accumuler de l'énergie mécanique et d'un rouage 11 reliant cinématiquement la cage du tourbillon au barillet. Le tourbillon porte un résonateur mécanique 14, formé d'un balancier 16 et d'un spiral 15, et un dispositif d'échappement 18. Le tourbillon est pivoté entre une platine 3 et un pont 9. Le dispositif d'échappement est constitué par un échappement magnétique qui comprend un mobile d'échappement 20 formé d'un pignon d'échappement 24 et d'une première roue d'échappement 22, cette dernière comprenant une première structure magnétique 26 ayant une forme générale annulaire et centrée sur un axe de rotation 28 du mobile d'échappement.

[0017] L'échappement magnétique comprend un arrêt 30 qui couple momentanément, dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique 14, ce résonateur mécanique au mobile d'échappement 20. Cet arrêt et le mobile d'échappement sont pivotés entre une partie de la cage 6 et un pont d'échappement 19 porté par cette cage. L'arrêt subit, lorsque le résonateur mécanique oscille, un mouvement de va-et-vient entrecoupé de phases de repos où l'arrêt est à l'arrêt alternativement dans deux positions de repos où il est respectivement en butée contre deux goupilles 36 et 37.

[0018] Dans la variante représentée, l'arrêt est formé par une ancre qui porte deux éléments magnétiques 32 et 33 chacun agencés de manière à présenter un mouvement oscillant qui est synchrone avec l'oscillation du résonateur mécanique et qui est orienté principalement selon une direction radiale relativement à l'axe de rotation 28 de l'ancre. Les deux éléments magnétiques sont similaires et situés d'un même côté de la roue d'échappement 22. Ils sont tous deux couplés simultanément de manière semblable à la première structure magnétique, laquelle est agencée de manière que ces deux éléments magnétiques sont couplés avec elle de manière continue (ou quasi continue) et de manière que leurs couplages magnétiques respectifs s'additionnent. On décrira par la suite plus en détails le fonctionnement de cet échappement magnétique.

[0019] Dans la variante représentée, le mobile d'échappement 20 comprend une deuxième roue 38 comprenant une deuxième structure magnétique 40 qui présente une symétrie planaire avec la première structure magnétique 26 et qui est située à distance de cette dernière de manière à permettre aux deux éléments magnétiques 32 et 33 d'être situés,

lorsqu'ils oscillent, au moins momentanément entre les première et deuxième structures magnétiques. Les deux éléments magnétiques 32 et 33 interagissent, de manière similaire, simultanément avec les première et deuxième structures magnétiques, de sorte que les effets s'additionnent. Les deux éléments magnétiques sont couplés avec les première et deuxième structures magnétiques de sorte que le mobile d'échappement effectue une rotation d'une période angulaire prédéterminée à chaque période d'oscillation du balancier 16. Les première et deuxième structures magnétiques et sont formées respectivement d'un premier aimant permanent et d'un deuxième aimant permanent qui présentent chacun une aimantation axiale et une même polarité. Les deux éléments magnétiques de l'ancre sont formés chacun par un aimant permanent présentant une aimantation axiale et une polarité inversée relativement aux premier et deuxième aimants, de sorte à subir une force de répulsion magnétique avec chacune des deux structures magnétiques.

[0020] De préférence, les première et deuxième roues 22 et 38 portent respectivement une première structure ferromagnétique 44 et une deuxième structure ferromagnétique 46 qui recouvrent respectivement les première et deuxième structures magnétiques des deux côtés externes de l'ensemble constitué de ces première et deuxième structures magnétiques, de manière à former en association avec quelques goupilles de fixation (voir fig. 3) s'élevant de chacune des deux structures ferromagnétiques, un certain blindage des première et deuxième structures magnétiques et de chaque élément magnétique situé entre celles-ci et ainsi couplé magnétiquement avec elles. Les deux structures ferromagnétiques forment respectivement deux supports pour les deux structures magnétiques. Dans la variante représentée, puisque les deux éléments magnétiques sont continûment couplés avec les première et deuxième structures magnétiques et restent donc situés entre les deux structures ferromagnétiques, l'échappement magnétique est partiellement blindé. De plus, les champs magnétiques des structures magnétiques et des éléments magnétiques sont confinés par les première et deuxième structures ferromagnétiques.

[0021] De manière générale, l'échappement magnétique est agencé de manière à présenter, en fonctionnement normal du mouvement horloger, alternativement des phases d'accumulation d'énergie, provenant d'une conversion d'énergie mécanique fournie par le barillet en énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique, et des phases de transfert d'énergie accumulée dans l'échappement magnétique au résonateur magnétique. Chaque phase d'accumulation d'énergie et la phase de transfert d'énergie qui lui succède interviennent au cours d'un intervalle de temps égal à la moitié d'une période d'oscillation du résonateur mécanique.

[0022] Dans le cadre du premier mode de réalisation, l'agencement de l'échappement magnétique mentionné au paragraphe précédent et le fonctionnement de cet échappement magnétique seront décrits ci-après à l'aide des fig. 5 à 9. La fig. 5 montre deux courbes d'énergie potentielle magnétique 66 et 68, respectivement pour les deux positions de repos de l'ancre 30 où cette dernière est respectivement en appui contre les butées 36 et 37, qui correspondent chacune à l'énergie potentielle magnétique E_{PM} dans l'échappement magnétique en fonction de l'angle θ donnant la position angulaire du mobile d'échappement 20 et donc des structures magnétiques 26 et 40 (on notera que cet angle θ est mesuré selon le sens de rotation du mobile d'échappement, à savoir le sens horaire dans l'exemple représenté aux fig. 6 à 9). Un échappement magnétique du type sélectionné pour le premier mode de réalisation de l'invention est divulgué dans la demande de brevet EP 3 208 667 A1. On décrira ci-après son fonctionnement et les caractéristiques particulières à ce fonctionnement qui sont exploitées dans le cadre de la présente invention. Les fig. 6 à 9 montrent quatre instants successifs d'une alternance du balancier 16 et d'une alternance de l'ancre 30 qui est couplée momentanément à ce balancier.

[0023] Premièrement, les deux structures magnétiques 26 et 40 définissent ensemble, dans chacune des deux positions de repos de l'ancre 30, des portions croissantes d'énergie potentielle magnétique PC1, respectivement PC2 pour les éléments magnétiques 32 et 33 de l'ancre 30 qui sont tous deux couplés, ici continûment, aux deux structures magnétiques. Dans la variante décrite, ces portions croissantes sont définies substantiellement par une piste magnétique 58 que comprend chacune des deux structures magnétiques 26 et 40, cette piste magnétique présentant un tracé particulier, alternativement rentrant et sortant relativement à un cercle géométrique médian. Lors d'un fonctionnement normal du mouvement horloger, ce tracé particulier est adapté à une accumulation d'énergie potentielle magnétique lors d'une rotation du mobile d'échappement sur une certaine distance angulaire, alors que l'ancre est alternativement dans ses deux positions de repos. Chaque piste magnétique 58 est formée par l'aimant permanent qui constitue la structure magnétique correspondante, cet aimant permanent étant agencé en répulsion magnétique avec les aimants permanents qui constituent les deux éléments magnétiques 32 et 33, comme déjà décrit.

[0024] Les portions croissantes PC1 et PC2 définissent ainsi des rampes angulaires d'accumulation d'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique. Au cours de chaque phase d'accumulation d'énergie, les deux structures magnétiques 26, 40 et donc le mobile d'échappement subissent un couple de force magnétique (schématisé aux fig. 8 et 9 par deux flèches tangentielles FT) ayant un sens opposé au sens de rotation du mobile d'échappement (donné sur ces figures par une flèche circulaire), c'est-à-dire opposé à un couple d'entraînement appliqué par le barillet via la cage du tourbillon au mobile d'échappement, et une intensité inférieure à celle de ce couple d'entraînement, de sorte que le mobile d'échappement tourne d'un certain angle pour permettre l'accumulation d'une certaine énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique. On remarquera que les deux éléments magnétiques 32 et 33 subissent, en réaction, chacun une force magnétique FM1, respectivement FM2 ayant, d'une part, une composante tangentielle non nulle relativement à l'axe de rotation du mobile d'échappement (c'est-à-dire une composante tangente en tous points à un cercle géométrique centré sur l'axe de rotation 28). D'autre part, ces forces magnétiques FM1 et FM2 sont orientées de manière que l'ancre subit aussi un couple de force de magnétique, lequel maintient en appui la fourchette 52 contre

la goupille d'arrêt 36, respectivement 37 selon que l'ancre est dans l'une ou l'autre de ses deux positions de repos dans la phase d'accumulation d'énergie considérée. A la fig. 8, laquelle montre une situation de l'échappement magnétique sensiblement au début d'une phase d'accumulation d'énergie, les forces magnétiques FM1 et FM2 sont orientées de sorte que le couple de force magnétique appliqué à l'ancre est plus important que le couple de force magnétique appliqué à cette ancre en fin d'une phase d'accumulation d'énergie (situation correspondant à celle de la fig. 6, mais déjà visible à la fig. 9 montrant une situation intermédiaire de l'échappement magnétique lors d'une phase d'accumulation d'énergie).

[0025] Lors de chaque phase d'accumulation d'énergie, on peut dire que les deux éléments magnétiques 32 et 33 de l'ancre, qui sont couplés aux deux structures magnétiques 26 et 40, gravissent ensemble une des rampes angulaires d'accumulation d'énergie potentielle magnétique PC1 ou PC2, par une certaine rotation du mobile d'échappement, alors que l'ancre 30 est dans une phase de repos. Cependant, on notera qu'il s'agit d'une énergie d'interaction magnétique de sorte que c'est l'ensemble 'structures magnétiques et éléments magnétiques' qui gravit les rampes angulaires d'accumulation d'énergie potentielle magnétique. Dans le cas d'un repère de coordonnées lié au mouvement horloger, c'est de fait plutôt le mobile d'échappement qui gravit les portions croissantes PC1 et PC2 des courbes d'énergie potentielles 66 et 68, puisqu'il tourne alors que les éléments magnétiques sont immobiles. Néanmoins, si on considère un repère de coordonnées associé au mobile d'échappement et fixe relativement à celui-ci, alors c'est bien les deux éléments magnétiques qui gravissent les portions croissantes. On comprend donc que ceci est équivalent.

[0026] A la fig. 5, on voit que l'échappement magnétique est agencé de manière que les portions croissantes PC1 de la première courbe d'énergie potentielle magnétique 66 sont respectivement décalées d'une demi-période angulaire $P/2$ relativement aux portions croissantes PC2 de la deuxième courbe d'énergie potentielle magnétique 68. Ensuite, les deux structures magnétiques définissent pour les deux éléments magnétiques 32 et 33, dans chacune des deux positions de repos de l'ancre, des barrières magnétiques BM1, respectivement BM2 qui succèdent aux portions croissantes PC1, respectivement PC2. Les barrières magnétiques BM1 et BM2 d'une courbe d'énergie potentielle magnétique 66, 68 sont formées respectivement par des plages aimantées 60 et 62 qui sont situées alternativement de part et d'autre de la piste aimantée 58. Chaque barrière magnétique BM1 est ainsi située angulairement entre deux barrières magnétiques successives BM2 (et donc inversement).

[0027] Plus précisément, dans la variante décrite, deux barrières magnétiques successives BM1 ou BM2 sont décalées angulairement d'une période angulaire P . Les deux éléments magnétiques de l'ancre sont décalés angulairement, relativement à l'axe de rotation 28, sensiblement d'un angle égal à $3P/2$ (généralement d'un nombre impair de demi-période $P/2$). Dans chacune des deux positions de repos de l'ancre, lorsqu'un des deux éléments magnétiques est couplé avec une partie sortante de la piste 58, l'autre est couplé avec une partie rentrante de cette piste. Ensuite, lorsque le premier élément magnétique se présente devant une plage aimantée externe 60, le second se présente devant une plage aimantée interne 62, et inversement.

[0028] Lors d'un fonctionnement normal du mouvement horloger, les barrières magnétiques sont agencées de manière à engendrer, sur les deux éléments magnétiques ayant gravis une rampe angulaire précédente, un couple de force magnétique relativement important qui est opposé au couple d'entraînement appliqué par le barillet au mobile d'échappement, pour pouvoir ainsi stopper l'avance angulaire du mobile d'échappement. Pour un couple de force mécanique donné, le mobile d'échappement s'arrête finalement à une position angulaire sensiblement déterminée (situation correspondant à la fig. 6), correspondant sur la fig. 5 aux points stables E_1, E_3, E_{2N+1} , avec $N > 0$, alternativement sur les courbes 66 et 68. On notera que de faibles rebonds peuvent avoir lieu de sorte que le mobile d'échappement subit une certaine oscillation autour de ces points stables, laquelle s'amortit assez rapidement sous l'action des frottements usuels aux mobiles horlogers. Dans une variante préférée, le mouvement horloger 2 comprend une fusée 12 d'égalisation du couple de force fourni par le barillet 10 à la cage de tourbillon 6, de sorte que le mobile d'échappement est soumis à un couple sensiblement constant dans la plage de fonctionnement utile de la pièce d'horlogerie. Ainsi, dans toute cette plage de fonctionnement, les points stables susmentionnés correspondent à une énergie magnétique potentielle de même valeur.

[0029] Ensuite, au cours de chaque phase de transfert d'énergie, les deux éléments magnétiques 32 et 33 subissent chacun une force magnétique radiale FR1 et FR2 (situation correspondant à la fig. 7), relativement à l'axe de rotation 28 du mobile d'échappement, au cours d'une alternance de son mouvement oscillant et dans le sens de ce mouvement oscillant durant cette alternance. On notera que cette force magnétique radiale est généralement une composante radiale de la force magnétique totale s'exerçant sur chacun des éléments magnétiques. On remarquera que le mouvement oscillant de chacun des éléments magnétiques est, dans la variante préférée qui est représentée, sensiblement radial relativement à l'axe de rotation 28 du mobile d'échappement et donc des structures magnétiques 26 et 40 qui sont globalement centrées sur cet axe de rotation. L'axe de rotation de l'ancre est positionné à cet effet dans le mouvement horloger. Les forces magnétiques, agissant respectivement sur les éléments magnétiques de l'ancre, qui fournissent une énergie mécanique à cette ancre, sous forme d'un travail d'un couple de force magnétique, sont donc ici substantiellement les composantes radiales FR1, FR2, nommées aussi forces magnétiques radiales, des forces magnétiques totales respectives.

[0030] Comme dans un échappement mécanique classique à ancre suisse, chaque alternance de l'ancre 30 est débutée par un entraînement initial de cette ancre par le balancier via une cheville 50 (goupille ayant un profil de disque tronqué) qui vient se placer entre les deux cornes de la fourchette 52 de l'ancre. Cette phase initiale permet aux éléments magnétiques 32 et 33 de subir chacun un déplacement radial initial avant qu'ils ne subissent, dans une phase suivante de l'alternance considérée de leur mouvement oscillant, une chute d'énergie potentielle magnétique de sorte que l'échappement magné-

tique subit globalement une diminution d'énergie potentielle magnétique, référencée D1 et D2 à la fig. 5, au cours de chaque alternance de l'oscillation du balancier 16 et par conséquent de chaque alternance du mouvement oscillant de l'ancre 30. Lors d'une telle alternance, l'ancre passe d'une position de repos à l'autre de sorte que l'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique varie en passant d'une situation décrite par la courbe 66 à une situation décrite par la courbe 68 ou inversement, selon que l'ancre est initialement dans l'une ou l'autre de ses deux positions de repos au commencement de l'alternance considérée.

[0031] L'agencement de l'échappement magnétique décrit précédemment, duquel découle le profil de chacune des deux courbes 66 et 68, permet donc à cet échappement magnétique de convertir en énergie mécanique de l'énergie potentielle magnétique accumulée dans la phase d'accumulation d'énergie précédente pour la fournir à l'ancre sous forme d'un couple de force qui travaille alors que l'ancre tourne. Ainsi, l'ancre devient entraîneuse et fournit une impulsion d'énergie au balancier via sa fourchette 50, comme dans un échappement mécanique classique, pour entretenir l'oscillation du balancier-spiral. Ce qui est remarquable dans l'échappement magnétique sélectionné dans le cadre de l'invention, c'est que le transfert d'énergie peut intervenir sans aucune rotation du mobile d'échappement, comme représenté à la fig. 5 pour la variante particulière où le mobile d'échappement demeure à une même position angulaire lors de chaque alternance de l'ancre, l'énergie potentielle magnétique en fin d'alternance correspondant aux points E_2 , E_4 , E_{2N} avec $N > 0$, alternativement sur les courbes 68 et 66. On remarquera que selon le couple d'entraînement du barillet, l'inertie de la cage du tourbillon et l'agencement spécifique des structures magnétiques, le mobile d'échappement peut subir une petite rotation lors des alternances de l'ancre, notamment dans leur phase terminale. Une telle variante est également représentée à la fig. 5 où l'échappement magnétique se trouve en fin d'alternance aux points E_2^* , E_4^* , E_{2N}^* avec $N > 0$. L'important pour le type d'échappement magnétique sélectionné, ce n'est pas que la roue d'échappement tourne ou ne tourne pas durant la transmission d'une impulsion d'énergie au résonateur mécanique, mais c'est qu'un certain déplacement angulaire de celle-ci ne soit pas nécessaire pour déclencher cette impulsion d'énergie, une fois que le balancier est couplé mécaniquement à l'ancre via sa fourchette, et pour la générer entièrement, de sorte que son intensité ne dépend pas de l'inertie des éléments entre le barillet et le mobile d'échappement, en particulier pas de l'inertie de la cage du tourbillon.

[0032] On remarquera que l'échappement magnétique sélectionné dans le cadre du premier mode de réalisation est sensiblement à force constante; c'est-à-dire que les diminutions d'énergie potentielle magnétique dans les phases de transmission d'énergie au balancier demeurent sensiblement constantes dans la plage de fonctionnement utile de la pièce d'horlogerie. C'est une propriété du système magnétique de l'échappement magnétique sélectionné (voir fig. 5). En effet, même en l'absence d'un dispositif d'égalisation du couple de force appliqué au mobile d'échappement par le barillet, les impulsions d'entretien fournies au résonateur mécanique dans ladite plage de fonctionnement utile (couples de force appliqués par le barillet au mobile d'échappement variant dans une plage de valeurs donnée) correspondent respectivement à des quantités d'énergie ayant des valeurs proches. La fusée 12 d'égalisation du couple de force fourni par le barillet à la cage de tourbillon/au mobile d'échappement sert donc ici à améliorer le rendement de l'entier du système (mouvement horloger).

[0033] De manière générale, dans le cadre du premier mode de réalisation, l'échappement magnétique sélectionné comprend un arrêtair qui couple momentanément, dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique, ce résonateur mécanique au mobile d'échappement, l'arrêtair portant un élément magnétique ou une pluralité d'éléments magnétiques et subissant, lorsque le résonateur mécanique oscille, un mouvement de va-et-vient entrecoupé de phases de repos où l'arrêtair est à l'arrêt alternativement dans deux positions de repos. Une structure magnétique ou plusieurs structures magnétiques définissent dans les deux positions de repos de l'arrêtair respectivement une première courbe d'énergie potentielle magnétique et une deuxième courbe d'énergie potentielle magnétique, toutes deux en fonction de l'angle du mobile d'échappement et présentant chacune:

- des portions croissantes pour l'interaction magnétique entre la structure magnétique ou les structures magnétiques et ledit élément magnétique ou l'ensemble des éléments magnétiques qui, parmi la pluralité des éléments magnétiques, sont couplés à la structure magnétique, respectivement aux structures magnétiques dans la position de repos correspondante de l'arrêtair, ces portions croissantes étant configurées de manière à pouvoir être gravies cycliquement et périodiquement, lors d'un fonctionnement normal du mouvement horloger, par cet élément magnétique ou par cet ensemble d'éléments magnétiques, et
- des barrières magnétiques qui suivent respectivement les portions croissantes dans la position de repos correspondante de l'arrêtair, ces barrières magnétiques étant agencées de manière à pouvoir stopper une avance angulaire du mobile d'échappement alors que l'arrêtair est dans cette position de repos correspondante.

[0034] Ensuite, les portions croissantes de la première courbe d'énergie potentielle magnétique sont respectivement décalées angulairement relativement aux portions croissantes de la deuxième courbe d'énergie potentielle magnétique, chaque barrière magnétique d'une des première et deuxième courbes d'énergie potentielle magnétique étant située angulairement entre deux barrières magnétiques successives de l'autre de ces première et deuxième courbes d'énergie potentielle magnétique.

[0035] De plus, l'échappement magnétique est agencé de manière que:

- les phases d'accumulation d'énergie interviennent principalement et respectivement dans les phases de repos successives de l'arrêtair,

- lors de chaque phase d'accumulation d'énergie, ledit élément magnétique ou l'ensemble des éléments magnétiques, qui parmi la pluralité d'éléments magnétiques est alors couplé à la structure magnétique ou aux structures magnétiques, est susceptible de gravir au moins partiellement une des portions croissantes lors d'une certaine rotation du mobile d'échappement,
- les portions croissantes des première et deuxième courbes d'énergie potentielle magnétique peuvent, lors d'un fonctionnement normal du mouvement horloger, être respectivement et alternativement gravies au moins partiellement lors de phases d'accumulation d'énergie successives.

[0036] Finalement, l'échappement magnétique est en outre agencé de manière que:

- les phases de transfert d'énergie interviennent respectivement dans les alternances successives du mouvement de va-et-vient de l'arrêt, et
- cet échappement magnétique subit, lors du fonctionnement normal du mouvement horloger, globalement une diminution d'énergie potentielle magnétique lors de chacune des alternances successives du mouvement de va-et-vient de l'arrêt, et
- la diminution d'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique résulte principalement d'un travail de la force magnétique radiale exercée sur ledit élément magnétique ou sur chaque élément magnétique de l'ensemble des éléments magnétiques qui, parmi la pluralité d'éléments magnétiques, étaient couplés à la structure magnétique ou aux structures magnétiques lors d'une phase de repos précédente, ce travail de la force magnétique radiale étant ainsi fourni à l'arrêt qui est agencé pour le transmettre en majeure partie au résonateur mécanique, de sorte que ce résonateur mécanique peut recevoir une impulsion d'énergie mécanique dans chaque alternance du mouvement de va-et-vient de cet arrêt.

[0037] La variante du premier mode de réalisation représentée comprend six plages aimantées externes 60 formant autant de butées magnétiques pour arrêter momentanément la roue d'échappement et également six plages aimantées internes 62 formant aussi autant de butées magnétiques. On notera que le nombre de plages aimantées externes/internes peut être différents et de préférence supérieure. Ainsi dans une autre variante, le nombre de plages aimantées externes/internes est égale à dix ou douze. On notera encore que, dans une autre variante, il est prévu de n'avoir que des plages aimantées internes ou, de préférence, que des plages aimantées externes.

[0038] Dans une variante avantageuse, représentée aux fig. 2 et 6 à 9, il est prévu une sécurité mécanique en cas de chocs ou autres fortes accélérations que peut subir l'échappement magnétique. Elle est obtenue par les dents 70 solidaires du mobile d'échappement agencés au niveau des bras 54 et 55 de l'ancre qui portent respectivement les deux aimants 32 et 33, ces dents étant susceptibles de coopérer avec deux doigts situés respectivement aux extrémités des deux bras. Dans chaque position de repos de l'ancre, si la barrière magnétique décrite précédemment n'exerce pas un couple d'arrêt suffisant pour empêcher au mobile d'échappement de ne pas la traverser, un des deux doigts vient alors en butée contre une des dents 70.

[0039] Comme l'invention permet d'augmenter la fréquence d'oscillation du balancier-spiral, même de beaucoup, il est prévu à cet effet, notamment pour maintenir la vitesse angulaire de la cage de tourbillon à un tour par minute, que le tourbillon porte un mobile intermédiaire 74 dont la roue intermédiaire 76 engrène avec le pignon d'échappement 24 et dont le pignon intermédiaire 78 engrène avec la roue de seconde fixe 80 que comprend le mouvement horloger. Le mobile intermédiaire est un mobile réducteur de la fréquence de rotation du mobile d'échappement et est ici agencé de sorte que la cage du tourbillon effectue un tour sur elle-même par minute. Dans une variante avantageuse, la fréquence d'oscillation F_o du résonateur mécanique est supérieure à cinq Hertz ($F_o > 5$ Hz). Dans une variante préférée, cette fréquence est sensiblement égale ou supérieure à 6 Hz ($F_o \geq 6$ Hz) et, dans une variante spécifique la fréquence d'oscillation du résonateur mécanique a une valeur située entre, y compris, huit Hertz et douze Hertz ($8 \text{ Hz} \leq F_o \leq 12 \text{ Hz}$). On notera qu'un mobile intermédiaire est déjà utile pour de plus petites fréquences d'oscillation du balancier-spiral, par exemple pour trois Hertz ($F_o = 3$ Hz), car le mobile d'échappement effectue dans l'exemple représenté un tour pour six périodes d'oscillation du balancier-spiral, ce qui correspond à une fréquence de rotation bien supérieure à celle d'une roue d'échappement dentée classique.

[0040] La fréquence de rotation F_{Rot} de la roue d'échappement est déterminée par la fréquence du résonateur mécanique F_o et par le nombre de plages aimantées externes 60, respectivement du nombre de plages aimantées internes 62. Dans une variante générale, la fréquence de rotation F_{Rot} (nombre de tours par seconde) du mobile d'échappement est comprise entre, y compris, un quart et un seizième de la fréquence d'oscillation F_o du résonateur mécanique ($F_o/16 \leq F_{\text{Rot}} \leq F_o/4$). Ceci revient à dire que le nombre N_{PA} de plages aimantées/de butées magnétiques externes 60 ou internes 62 est compris entre quatre et seize ($4 \leq N_{\text{PA}} \leq 16$), car $F_{\text{Rot}} = F_o/N_{\text{PA}}$. Dans un premier exemple avec un résonateur mécanique oscillant à trois Hertz ($F_o = 3$ Hz) et la denture de la roue fixe (80) comprenant 108 dents, le pignon intermédiaire comprend 14 dents et la roue intermédiaire comprend 70 dents, alors que le pignon d'échappement (24) comprend 18 dents. Dans un deuxième exemple avec un résonateur mécanique oscillant à six Hertz ($F_o = 6$ Hz) et la denture de la roue fixe comprenant 120 dents, le pignon intermédiaire comprend 12 dents et la roue intermédiaire comprend 72 dents, alors que le pignon d'échappement comprend 12 dents.

[0041] A la fig. 10 est représenté, en coupe transversale similaire à celle de la fig. 3, un deuxième mode de réalisation de l'invention. On ne décrira ci-après que les éléments distinctifs de ce deuxième mode de réalisation. On notera que

l'échappement magnétique est identique à celui du premier mode de réalisation et que toutes les variantes qui ont été décrites pour ce premier mode de réalisation s'appliquent également pour le deuxième mode de réalisation, lequel se distingue par l'agencement du résonateur mécanique 14A qui comprend un balancier 16A pivoté magnétiquement dans la cage 6A du tourbillon 4A. La cage comprend à cet effet deux paliers magnétiques 84 et 86 qui sont formés respectivement par deux aimants 88 et 90, l'arbre 92 du balancier 16A étant prévu en matériau ferromagnétique pour assurer son alignement entre les deux aimants. Pour le fonctionnement d'un tel pivotement magnétique et diverses variantes possibles, on peut se référer aux documents EP 2 450 758, EP 3 109 712 et EP 3 106 933. Ce qui est remarquable avec un tel système magnétique pour le pivotement du balancier dans un tourbillon, c'est le fait qu'il permet de réduire fortement les différences de marche entre les positions horizontales et les positions verticales du mouvement, alors que le tourbillon permet de moyenniser les différences de marche entre les diverses positions verticales.

[0042] On décrira ci-après deux variantes des premier et deuxième modes de réalisation. La première variante est représentée à la fig. 11, de manière simplifiée. Le dispositif d'échappement 18B comprend une ancre 30B et un mobile d'échappement 20B, formé d'une seule roue 22 semblable à celle des variantes décrites précédemment et portant donc une structure magnétique 26 qui ne sera pas décrite ici à nouveau. Sur cette fig. 11, on a représenté le cercle géométrique médian 96 autour duquel intervient substantiellement chaque impulsion d'énergie fournie à l'ancre 30B qui la transmet au résonateur mécanique 14B (dont seul le balancier 16A a été représenté schématiquement). Ce cercle géométrique médian 96 sépare les portions rentrantes des portions entrantes de la piste magnétique 58 et également les plages d'arrêt extérieures 60 des plages d'arrêt intérieures 62, lesquelles forment les barrières magnétiques décrites précédemment. Plus globalement, ce cercle 96 sépare deux pistes magnétiques annulaires et contiguës 98 et 100 en regard desquelles se trouve le seul élément magnétique 32B de l'ancre respectivement dans les deux positions de repos de cette ancre et donc alternativement durant les phases d'accumulation d'énergie potentielle magnétique successives dans l'échappement magnétique. Le fonctionnement de cet échappement magnétique est similaire à celui déjà décrit. La distinction majeure de cette variante réside dans l'ancre 30B qui est munie d'un seul aimant 32B, agencé en répulsion de la structure magnétique aimantée 26, et dans le mobile d'échappement qui ne comprend qu'une seule structure magnétique agencée à un niveau inférieur/supérieur à celui dans lequel oscille l'aimant lorsque le mouvement horloger est en fonction.

[0043] La variante de la fig. 12 se distingue par l'agencement matériel de diverses parties formant l'échappement magnétique 18C. Par contre, le fonctionnement est semblable à celui déjà décrit, la structure magnétique 26C présentant en plan sensiblement un même design que la structure 26. Le mobile d'échappement 20C et sa roue 22C, portant la structure magnétique 26C, diffèrent respectivement du mobile 20B et de sa roue 22 de la figure précédente par le fait la structure 26C s'étend latéralement à un noyau 23, à sa périphérie, alors que la structure 26 est agencée sur un disque support (à haute perméabilité magnétique ou non selon la variante). L'ancre 30C est, selon la variante, similaire à l'ancre 30 ou 30B, à l'exception de l'agencement des éléments magnétiques. Plus précisément, l'ancre 30C comprend au moins une paire d'éléments magnétiques similaires 32C et 33C (deux aimants identiques dans l'exemple représenté) qui sont situés respectivement dessus et dessous la structure magnétique 26C et qui sont tous deux couplés de manière semblable à cette structure magnétique et de manière que leurs couplages magnétiques respectifs s'additionnent. De préférence, chaque paire d'aimants est portée par un support 31 en matériau à haute perméabilité magnétique (notamment ferro-magnétique) ayant une forme générale en «C».

[0044] En référence aux fig. 13 et 14, on décrira ci-après un troisième mode de réalisation de l'invention qui est caractérisé par un échappement magnétique 118 sans arrêtoir, le mobile d'échappement 120 étant directement couplé magnétiquement au résonateur mécanique 114 (représenté schématiquement) dont le balancier 116 porte (es éléments magnétiques 102 et 103. Le balancier est associé à un ressort-spiral 115. La cage 106 du tourbillon est schématisée par un bloc auquel est fixé une extrémité du ressort-spiral et qui porte le balancier 116 et le mobile 120, lesquels sont agencés pivotant dans la cage 106, respectivement autour de deux axes de rotation 8 et 28 comme dans les deux modes de réalisation précédents. Le mobile d'échappement 120 tourne de manière continue et synchrone avec l'oscillation du résonateur mécanique (c'est-à-dire que la roue d'échappement tourne d'une période angulaire prédéterminée durant chaque période d'oscillation du balancier 116). On notera que la vitesse angulaire du mobile d'échappement peut présenter une certaine variation au cours de chaque période d'oscillation, notamment selon que l'on se trouve dans une phase d'accumulation d'énergie ou une phase de transfert d'énergie.

[0045] La structure magnétique 126 est annulaire et formée alternativement de secteurs annulaires 128, dans lesquels sont agencés des aimants en répulsion magnétique avec les aimants 102 et 103 lorsqu'ils se présentent alternativement en regard de ces secteurs annulaires, et de secteurs annulaires 130 formés d'un matériau amagnétique, comme le laiton ou l'aluminium. Chaque paire de secteurs annulaires adjacents définit une période angulaire de la structure magnétique. De préférence, les aimants de la structure magnétique 126 présentent angulairement une épaisseur croissante dans le sens contraire au sens de rotation prévu pour le mobile d'échappement, de manière à avoir un entrefer qui diminue entre chacun d'eux et l'aimant 102, 103 qui passe au-dessus (lorsque le mobile d'échappement tourne) et également un flux magnétique qui s'intensifie. Pour une telle variante avantageuse, la fig. 14 représente des courbes de niveau 134 pour l'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique (constitué ici de la structure magnétique 126 et des deux aimants 102 et 103 solidaires du balancier) en fonction de la position angulaire relative d'un ou de l'autre des deux aimants 102 et 103. Lorsque le résonateur mécanique 114 oscille, ces deux aimants oscillent avec un déphasage de 180°, chacun selon un tracé représenté par la courbe 140 dans un repère de coordonnées polaires lié au mobile d'échappement.

Chaque secteur annulaire 128 définit un ensemble 128A de courbes de niveau, deux ensembles 128A successifs étant séparés par un secteur 126A d'énergie potentielle magnétique nulle défini par un secteur annulaire 126. Les courbes de niveau 134 sont croissantes vers l'intérieur de celles-ci, c'est-à-dire que la courbe extérieure présente une moindre énergie potentielle que la courbe suivante située à l'intérieur de cette dernière, et ainsi de suite. Pour d'autres variantes de réalisation, on se référera au document EP 2 891 930 qui décrit des échappements magnétiques du type sélectionné dans le cadre du troisième mode de réalisation.

[0046] Lorsque le résonateur mécanique est dans sa position neutre (position d'énergie mécanique minimale représentée à la fig. 13), les deux aimants 102, 103 sont situés sur un cercle 132 de position zéro. Lorsque le résonateur mécanique oscille, ces deux aimants pénètrent alternativement au-dessus de la structure magnétique de sorte que le balancier est constamment couplé magnétiquement à cette structure magnétique. Pour que ces deux aimants expérimentent alternativement un même couplage avec la structure magnétique, ils présentent un décalage angulaire d'un nombre impair de demi-périodes angulaires de la structure magnétique. Ainsi, le mobile d'échappement effectue une rotation d'une période angulaire déterminée à chaque période d'oscillation du balancier. De plus, de manière similaire aux modes de réalisation précédents, les deux aimants 102 et 103 subissent principalement un mouvement radial, relativement à l'axe de rotation 28 du mobile d'échappement, lorsque le balancier oscille. De préférence, leur mouvement est orienté radialement lorsqu'ils croisent le cercle de position zéro 132 (correspondant au cercle extérieur de la structure magnétique). Comme mentionné, dans la variante proposée ici, les deux aimants 102 et 103 sont alternativement couplés à la structure magnétique de sorte qu'ils subissent successivement un couplage magnétique avec un des secteurs annulaires magnétisés 128. Ainsi, l'énergie potentielle magnétique globale dans l'échappement magnétique 118 est donnée par les courbes de niveau 134 à la fig. 14.

[0047] On observe à la fig. 14 que l'échappement magnétique est agencé de manière à présenter, lors d'un fonctionnement normal du mouvement horloger, alternativement des phases d'accumulation d'énergie, provenant d'une conversion d'énergie mécanique fournie par le barillet en énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique, et des phases de transfert d'énergie accumulée dans l'échappement magnétique au résonateur magnétique. L'échappement magnétique définit des rampes angulaires montantes 136 d'accumulation d'énergie potentielle magnétique que subissent, lors de la rotation continue de la structure magnétique, alternativement les aimants 102 et 103 lors de phases d'accumulation d'énergie successives au cours desquelles ils gravissent successivement et partiellement ces rampes angulaires montantes. Comme la force d'interaction magnétique entre les aimants 102, 103 et la structure magnétique est orientée perpendiculairement aux lignes de niveau 134, ces aimants subissent alors une force magnétique qui est essentiellement perpendiculaire au rayon qu'il forme avec l'axe de rotation 28. Ainsi, la structure magnétique 126 (et donc le mobile d'échappement) subit, au cours de chaque phase d'accumulation d'énergie, un couple de force magnétique, relativement à son axe de rotation, ayant un sens opposé à celui d'un couple d'entraînement, appliqué par le barillet via la cage du tourbillon au mobile d'échappement. On remarquera que l'agencement des aimants 102, 103 et des secteurs annulaires aimantés 128 est prévu de manière que, en mode de fonctionnement normal, l'intensité du couple de force magnétique est inférieure à celle du couple d'entraînement, de sorte que le mobile d'échappement peut continuer sa rotation et tourner d'un certain angle, permettant ainsi une accumulation d'énergie potentielle dans l'échappement magnétique.

[0048] L'échappement magnétique définit également des rampes radiales descendantes 138 d'énergie potentielle magnétique que descendent alternativement les deux aimants 102 et 103 après avoir gravi respectivement les rampes angulaires montantes 136. Comme la force magnétique qui s'exerce sur chaque aimant 102, 103, descendant une rampe radiale descendante, est orientée perpendiculairement aux lignes de niveau 134, il subit alors, au cours de phases de transfert d'énergie, principalement une force magnétique radiale, relativement à l'axe de rotation 28, au cours de chaque alternance du mouvement d'oscillation du résonateur mécanique et dans le sens de ce mouvement d'oscillation durant cette alternance, de sorte que l'échappement magnétique convertit alors en énergie mécanique de l'énergie potentielle magnétique accumulée dans la phase d'accumulation d'énergie précédente pour pouvoir entretenir l'oscillation du résonateur mécanique. La diminution d'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique résulte donc principalement d'un travail de la force magnétique radiale exercée alternativement sur chacun des deux éléments magnétiques, ce travail de la force magnétique radiale étant transmis directement au résonateur mécanique, de sorte que ce résonateur mécanique reçoit une impulsion d'énergie mécanique dans chaque alternance de son mouvement d'oscillation.

[0049] Les rampes radiales descendantes 138 s'étendent sur une certaine distance angulaire de sorte que le mouvement continu de la roue d'échappement n'a pas de répercussion quant aux caractéristiques particulières recherchées dans le cadre de la présente invention. En effet, l'important, c'est que la force radiale principale qui s'exerce alternativement sur chacun des deux aimants fixés au balancier ne dépend quasi pas d'une quelconque rotation du mobile d'échappement. En effet, on observe à la fig. 14 que l'agencement de la structure magnétique permet de générer les impulsions d'énergie pour le balancier sans rotation du mobile d'échappement. Si ce dernier s'arrêtait en fin de phase d'accumulation d'énergie, alors le balancier recevrait néanmoins sous forme d'impulsion une même quantité d'énergie que celle qu'il reçoit en subissant durant les phases de transfert d'énergie un certain mouvement de rotation. De plus, on observe que cette quantité d'énergie reste quasi constante, que la vitesse angulaire du balancier soit petite ou relativement grande, pour autant que l'échappement magnétique soit agencé de manière que, en fonctionnement normal, il n'atteigne pas le sommet des rampes angulaires montantes 136 en fin de phases d'accumulation d'énergie. Cette condition est prévue dans l'échappement magnétique selon ce troisième mode de réalisation.

[0050] Finalement, on remarquera qu'une fusée (similaire à la fusée 12 représentée dans le cadre du premier mode de réalisation) incorporée dans le mouvement horloger permet d'égaliser le couple de force fourni par le barillet à la cage de tourbillon, de sorte que le mobile d'échappement est soumis à un couple constant lors du fonctionnement normal du mouvement horloger. Dans le cadre du troisième mode de réalisation, une telle fusée permet d'obtenir une phase de fonctionnement stationnaire sur toute la plage de fonctionnement utile du mouvement horloger, avec l'amplitude d'oscillation du balancier qui demeure constante et des impulsions d'entretien qui fournissent au balancier une même quantité d'énergie mécanique. Tout le bénéfice procuré par une fusée d'égalisation du couple de force dans un mouvement horloger mécanique classique est apporté à la pièce d'horlogerie selon ce troisième mode de réalisation.

Revendications

1. Pièce d'horlogerie comprenant un mouvement horloger (2) équipé d'un tourbillon (4) comprenant une cage (6, 6A, 106) agencée tournante autour d'un axe principal, d'un barillet agencé pour accumuler de l'énergie mécanique et d'un rouage reliant cinématiquement ladite cage du tourbillon au barillet, le tourbillon portant un résonateur mécanique (14, 14B, 114), formé d'un balancier (16, 16A, 116) et d'un spiral, et un dispositif d'échappement; cette pièce d'horlogerie étant caractérisée en ce que le dispositif d'échappement est constitué par un échappement magnétique (18) qui comprend un mobile d'échappement (20, 20B, 20C, 120) formé d'un pignon d'échappement et d'au moins une structure magnétique (26, 40, 26C, 126), laquelle a une forme générale annulaire qui est centrée sur un axe de rotation (28) du mobile d'échappement, cet échappement magnétique comprenant en outre un élément magnétique ou une pluralité d'éléments magnétiques (32, 33, 32B, 32C, 33C, 102, 103), cet élément magnétique ou chaque élément magnétique de la pluralité d'éléments magnétiques étant agencé de manière à avoir un mouvement oscillant qui est synchrone avec l'oscillation du résonateur mécanique et qui présente une composante radiale non nulle relativement audit axe de rotation, ledit élément magnétique étant couplé avec ladite au moins une structure magnétique ou chaque élément magnétique de ladite pluralité d'éléments magnétiques étant couplé, au moins momentanément de manière périodique, avec ladite au moins une structure magnétique de manière que le mobile d'échappement effectue une rotation d'une période angulaire déterminée à chaque période d'oscillation du balancier; en ce que l'échappement magnétique est agencé de manière à présenter, lors d'un fonctionnement normal du mouvement horloger, alternativement des phases d'accumulation d'énergie, provenant d'une conversion d'énergie mécanique fournie par le barillet en énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique, et des phases de transfert d'énergie accumulée dans l'échappement magnétique au résonateur magnétique; et en ce que l'échappement magnétique est agencé de manière que:
 - au cours de chaque phase d'accumulation d'énergie, ladite au moins une structure magnétique subit un couple de force magnétique, relativement audit axe de rotation, ayant un sens opposé à celui d'un couple d'entraînement, appliqué par le barillet via la cage du tourbillon au mobile d'échappement, et une intensité inférieure à celle de ce couple d'entraînement, de sorte que le mobile d'échappement tourne d'un certain angle pour permettre l'accumulation d'une certaine énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique;
 - au cours de chaque phase de transfert d'énergie, ledit élément magnétique ou chaque élément magnétique d'un ensemble d'éléments magnétiques, qui parmi la pluralité des éléments magnétiques était couplé à ladite au moins une structure magnétique lors d'une phase d'accumulation d'énergie précédente, subit une force magnétique radiale, relativement audit axe de rotation, au cours d'une alternance de son mouvement oscillant et dans le sens de la composante radiale de ce mouvement oscillant durant cette alternance, de sorte que l'échappement magnétique convertit alors en énergie mécanique de l'énergie potentielle magnétique accumulée dans ladite phase d'accumulation d'énergie précédente pour pouvoir entretenir l'oscillation du résonateur mécanique.
2. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1, caractérisée en ce que ledit échappement magnétique comprend un arrêt-oir (30, 30B, 30C) qui couple momentanément, dans chaque alternance de l'oscillation du résonateur mécanique, ce résonateur mécanique au mobile d'échappement (20, 20B, 20C), l'arrêt-oir portant ledit élément magnétique ou ladite pluralité d'éléments magnétiques et subissant, lorsque le résonateur mécanique (14, 14B) oscille, un mouvement de va-et-vient entrecoupé de phases de repos où l'arrêt-oir est à l'arrêt alternativement dans deux positions de repos; en ce que ladite au moins une structure magnétique définit dans les deux positions de repos de l'arrêt-oir respectivement une première courbe d'énergie potentielle magnétique (66) et une deuxième courbe d'énergie potentielle magnétique (68), toutes deux en fonction de l'angle du mobile d'échappement et présentant chacune:
 - des portions croissantes (PC1, PC2) pour l'interaction magnétique entre ladite au moins une structure magnétique et ledit élément magnétique ou l'ensemble d'éléments magnétiques qui, parmi la pluralité des éléments magnétiques, sont couplés à ladite au moins une structure magnétique dans la position de repos correspondante de l'arrêt-oir, ces portions croissantes étant configurées de manière à pouvoir être gravies, lors dudit fonctionnement normal, cycliquement et périodiquement par cet élément magnétique ou par cet ensemble d'éléments magnétiques, et
 - des barrières magnétiques (BM1, BM2) qui suivent respectivement les portions croissantes, ces barrières magnétiques étant agencées de manière à pouvoir stopper une avance angulaire du mobile d'échappement alors que l'arrêt-oir est dans la position de repos correspondante; lesdites portions croissantes de la première courbe d'énergie potentielle magnétique étant respectivement décalées relativement aux portions croissantes de la deuxième courbe d'énergie potentielle magnétique, chaque barrière magnétique d'une des première et deuxième courbes d'énergie

potentielle magnétique étant située angulairement entre deux barrières magnétiques successives de l'autre de ces première et deuxième courbes d'énergie potentielle magnétique; l'échappement magnétique étant agencé de manière que:

- les phases d'accumulation d'énergie interviennent principalement et respectivement dans les phases de repos successives de l'arrêt,oir,
- lors de chaque phase d'accumulation d'énergie, ledit élément magnétique ou l'ensemble des éléments magnétiques, qui parmi ladite pluralité d'éléments magnétiques sont alors couplés à ladite au moins une structure magnétique, est susceptible de gravir au moins partiellement une desdites portions croissantes lors d'une certaine rotation du mobile d'échappement,
- les portions croissantes des première et deuxième courbes d'énergie potentielle magnétique peuvent, lors dudit fonctionnement normal, être respectivement et alternativement gravies au moins partiellement lors de phases d'accumulation d'énergie successives;

et en ce que l'échappement magnétique est en outre agencé de manière que:

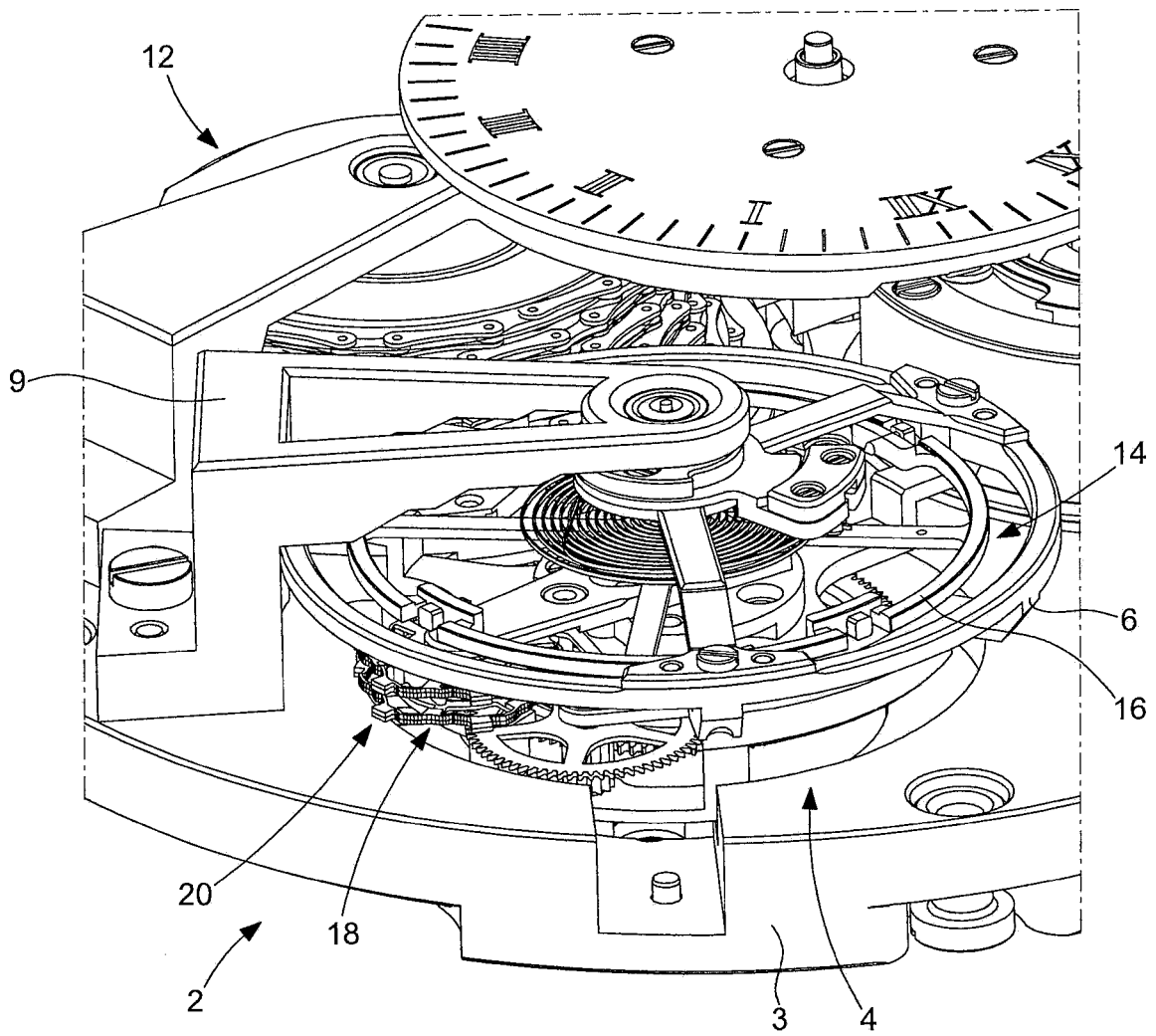
- les phases de transfert d'énergie interviennent respectivement dans les alternances successives du mouvement de va-et-vient de l'arrêt,oir,
- cet échappement magnétique subit, lors dudit fonctionnement normal, globalement une diminution d'énergie potentielle magnétique (D1, D2) lors de chacune des alternances successives du mouvement de va-et-vient de l'arrêt,oir, et
- la diminution d'énergie potentielle magnétique dans l'échappement magnétique résulte principalement d'un travail de ladite force magnétique radiale (FR1, FR2) exercée sur ledit élément magnétique ou sur chaque élément magnétique de l'ensemble des éléments magnétiques qui, parmi la pluralité d'éléments magnétiques, étaient couplés à ladite au moins une structure magnétique lors d'une phase de repos précédente, ce travail de la force magnétique radiale étant ainsi fourni à l'arrêt,oir qui est agencé pour le transmettre en majeure partie au résonateur mécanique, de sorte que ce résonateur mécanique reçoit une impulsion d'énergie mécanique dans chaque alternance du mouvement de va-et-vient de cet arrêt,oir.

3. Pièce d'horlogerie selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que le tourbillon porte en outre un mobile intermédiaire (74) dont la roue intermédiaire (76) engrène avec le pignon d'échappement (24) et dont le pignon intermédiaire (78) engrène avec une roue de seconde fixe (80) que comprend le mouvement horloger, le mobile intermédiaire étant un mobile réducteur de la fréquence de rotation du mobile d'échappement et étant agencé de sorte que ladite cage du tourbillon effectue un tour sur elle-même par minute.
4. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que la fréquence d'oscillation (F_o) du résonateur mécanique est sensiblement égale ou supérieure à six Hertz ($F_o \geq 6$ Hz).
5. Pièce d'horlogerie selon la revendication 3, caractérisée en ce que la fréquence d'oscillation (F_o) du résonateur mécanique a une valeur située entre, y compris, huit Hertz et douze Hertz ($8 \text{ Hz} \leq F_o \leq 12 \text{ Hz}$).
6. Pièce d'horlogerie selon la revendication 3 ou 5 ou la revendication 4 dépendante de la revendication 3, caractérisée en ce que la fréquence de rotation (F_{Rot}) du mobile d'échappement a une valeur située entre, y compris, un quart et un seizième de la fréquence d'oscillation (F_o) du résonateur mécanique ($F_o/4 \leq F_{Rot} \leq F_o/16$).
7. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'échappement magnétique comprend au moins deux éléments magnétiques similaires (32, 33) qui sont situés d'un même côté de ladite structure magnétique (26) et qui sont tous deux couplés simultanément à cette structure magnétique de manière que leurs couplages magnétiques respectifs s'additionnent.
8. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'échappement magnétique comprend au moins une paire d'éléments magnétiques similaires (32C, 33C) qui sont situés respectivement dessus et dessous ladite structure magnétique (26C) et qui sont tous deux couplés simultanément à cette structure magnétique de manière que leurs couplages magnétiques respectifs s'additionnent.
9. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications 1 à 7, dans laquelle ladite structure magnétique est une première structure magnétique (26); caractérisée en ce que le mobile d'échappement comprend une deuxième structure magnétique (40) qui présente une symétrie planaire avec la première structure magnétique et qui est située à distance de cette dernière de manière à permettre audit élément magnétique ou à chaque élément magnétique de ladite pluralité d'éléments magnétiques (32, 33) d'être situé, lors dudit mouvement oscillant, au moins momentanément entre les première et deuxième structures magnétiques.
10. Pièce d'horlogerie selon la revendication 9, caractérisée en ce que la première structure magnétique et la deuxième structure magnétique sont formées respectivement d'un premier aimant permanent et d'un deuxième aimant permanent qui présentent chacun une aimantation axiale et une même polarité; et en ce que ledit élément magnétique ou chaque élément magnétique de ladite pluralité d'éléments magnétiques (32, 33) est formé par un aimant permanent présentant une aimantation axiale et une polarité inversée relativement aux premier et deuxième aimants, de sorte à subir une force de répulsion magnétique lors d'un couplage magnétique avec chacune des première et deuxième structures magnétiques.

CH 715 049 A2

11. Pièce d'horlogerie selon la revendication 10, caractérisée en ce que ledit mobile d'échappement (20) porte une première structure ferromagnétique (44) et une deuxième structure ferromagnétique (46) qui recouvrent respectivement les première et deuxième structures magnétiques (26, 40) des deux côtés externes de l'ensemble de ces première et deuxième structures magnétiques, de manière à former ainsi un blindage des première et deuxième structures magnétiques et de chaque élément magnétique lorsque ce dernier est situé entre celles-ci et est ainsi couplé magnétiquement avec celles-ci.
12. Pièce d'horlogerie selon une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que le balancier (16A) est pivoté magnétiquement dans la cage (6A) du tourbillon qui comprend à cet effet deux paliers magnétiques (84, 86).

Fig. 1



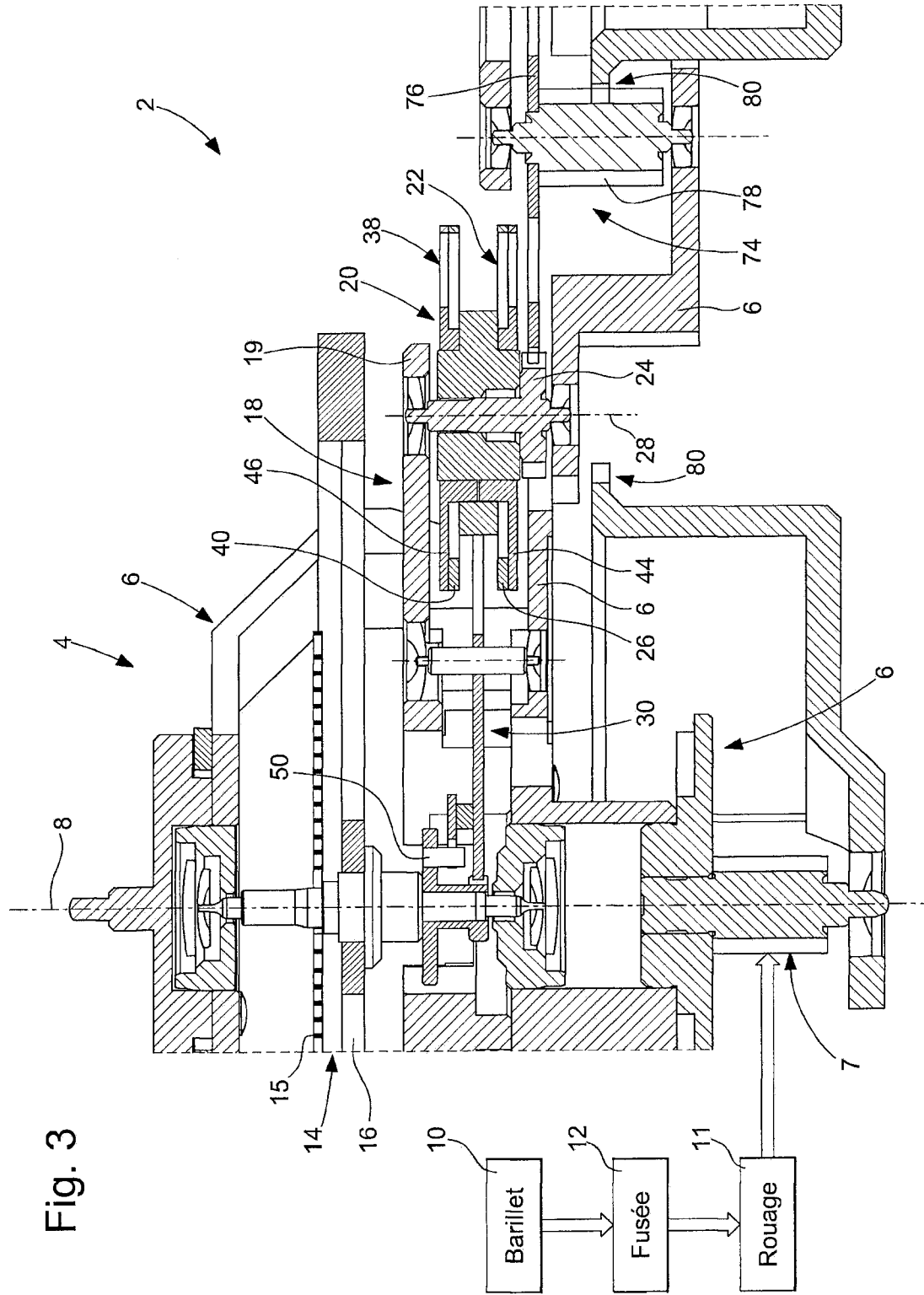


Fig. 3

Fig. 4

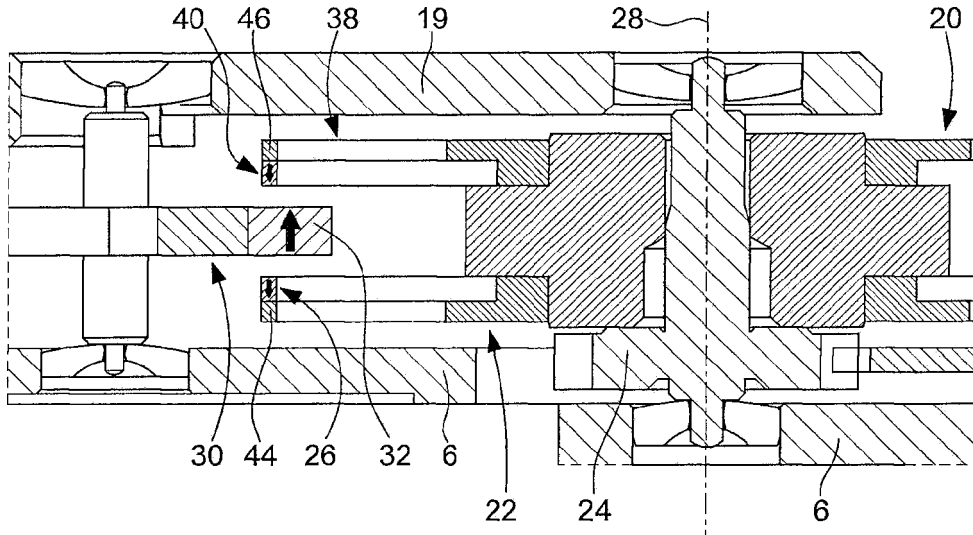


Fig. 5

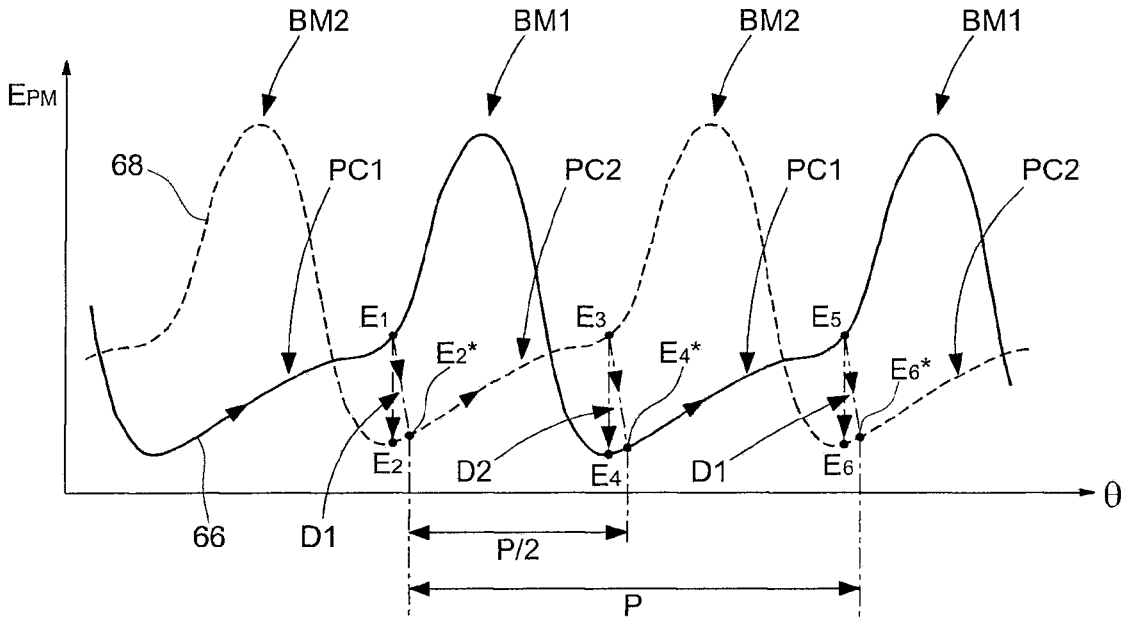


Fig. 6

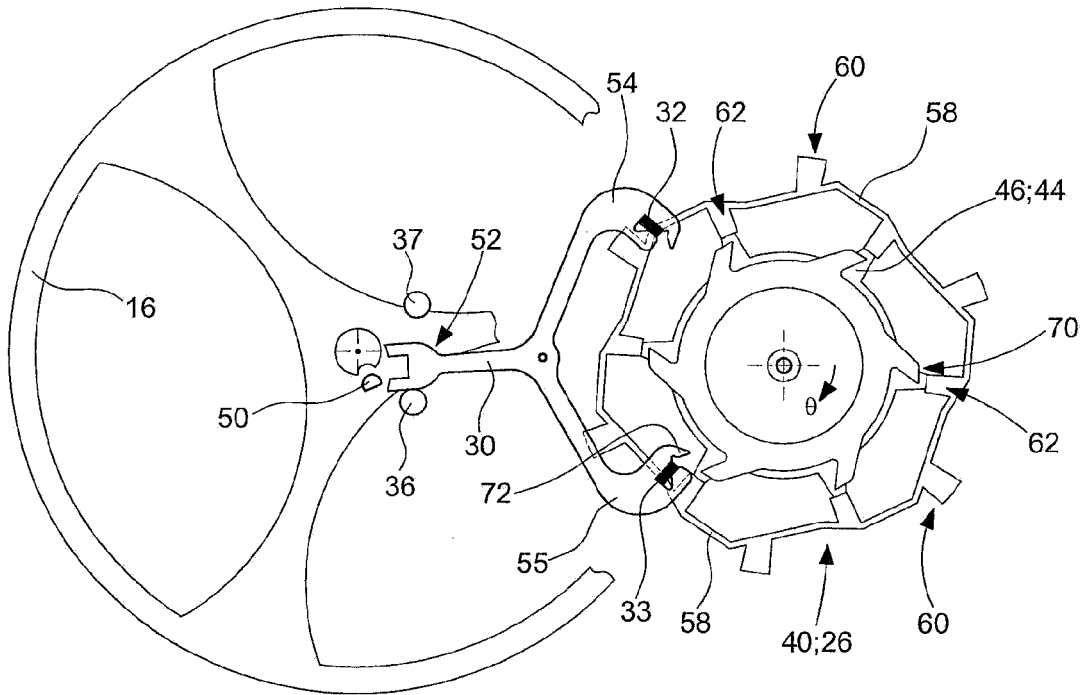


Fig. 7

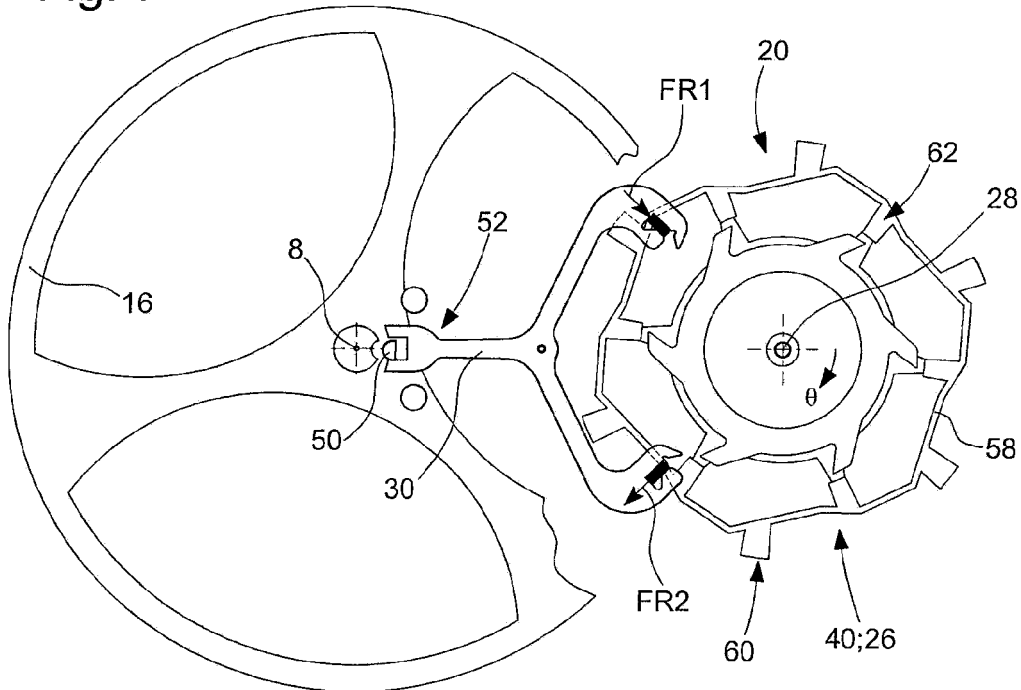


Fig. 8

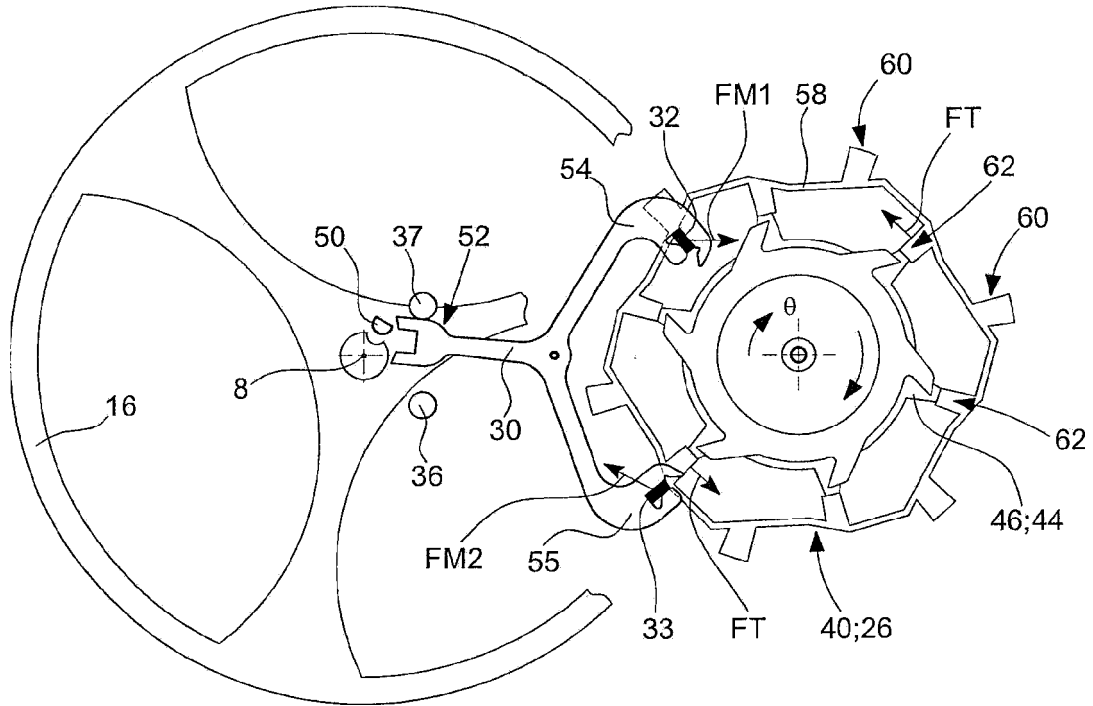
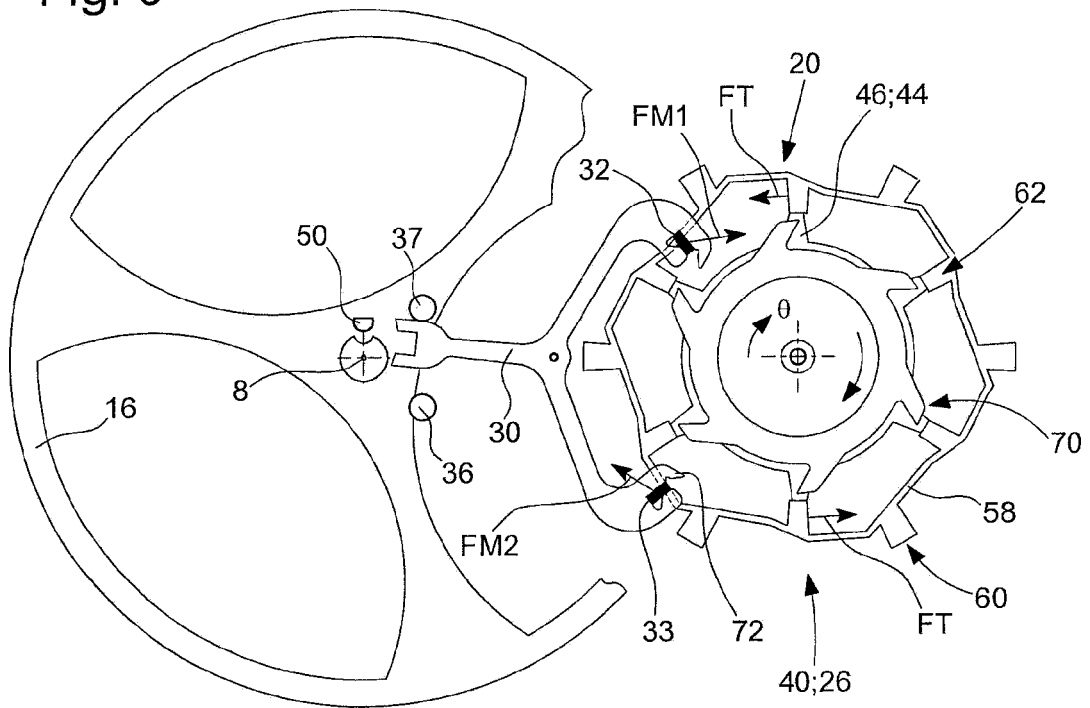


Fig. 9



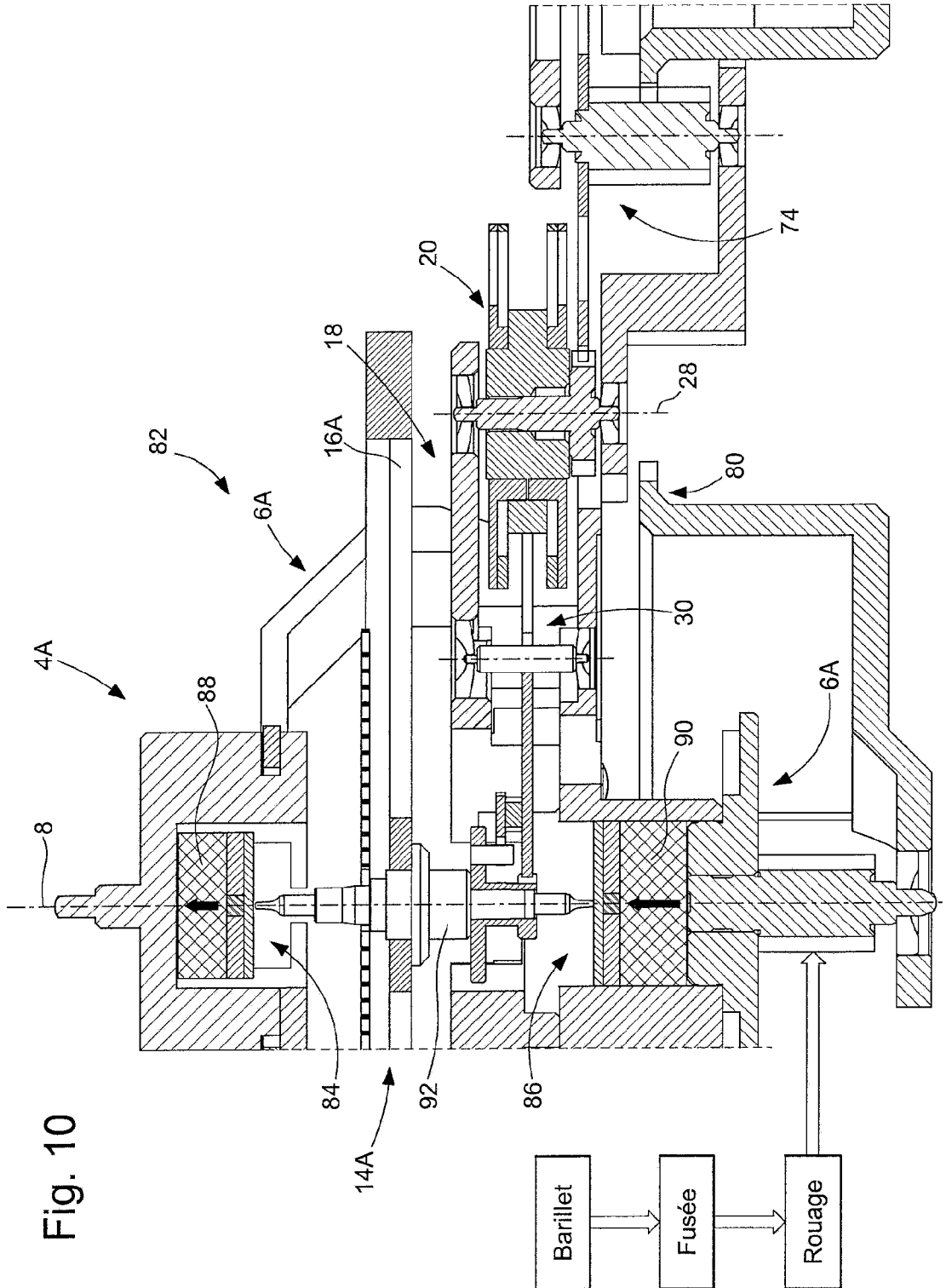


Fig. 10

Fig. 11

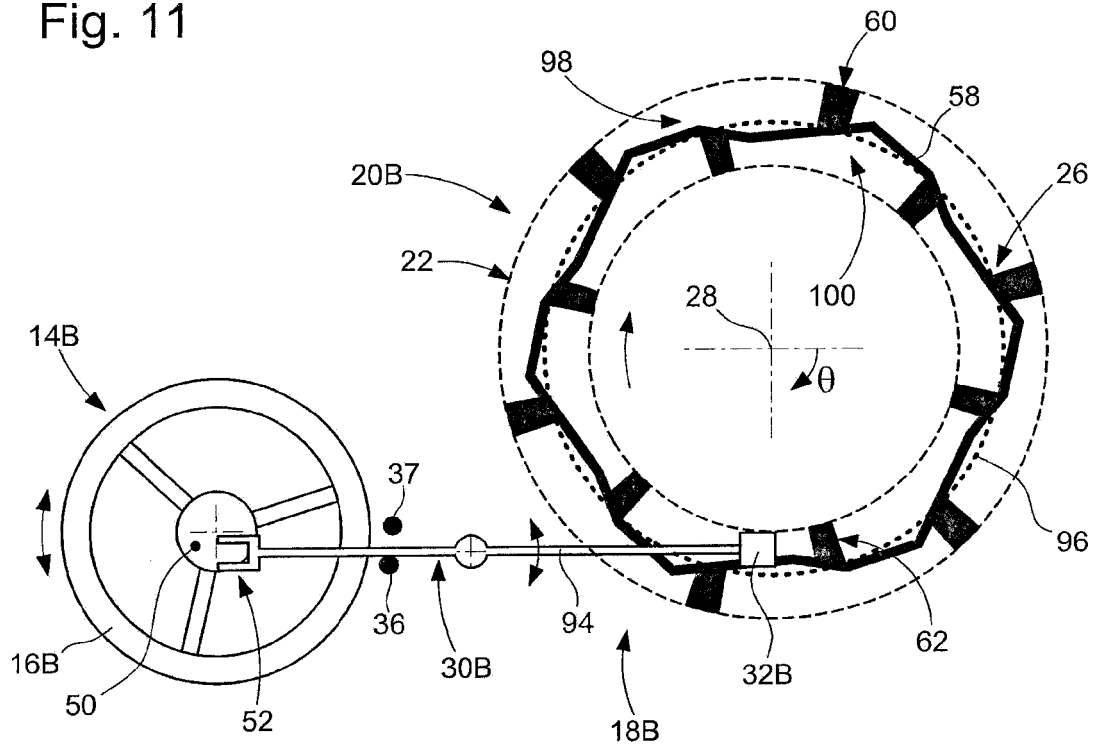


Fig. 12

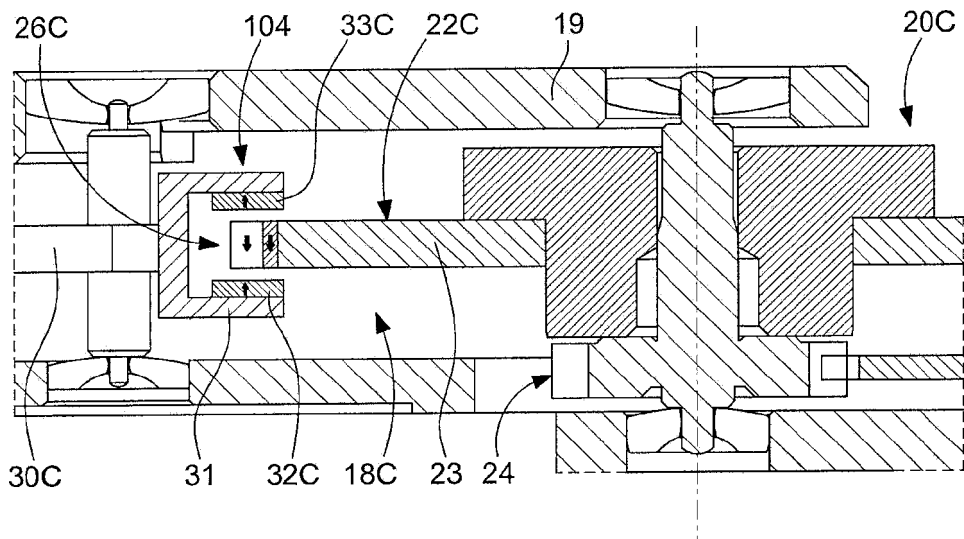


Fig. 13

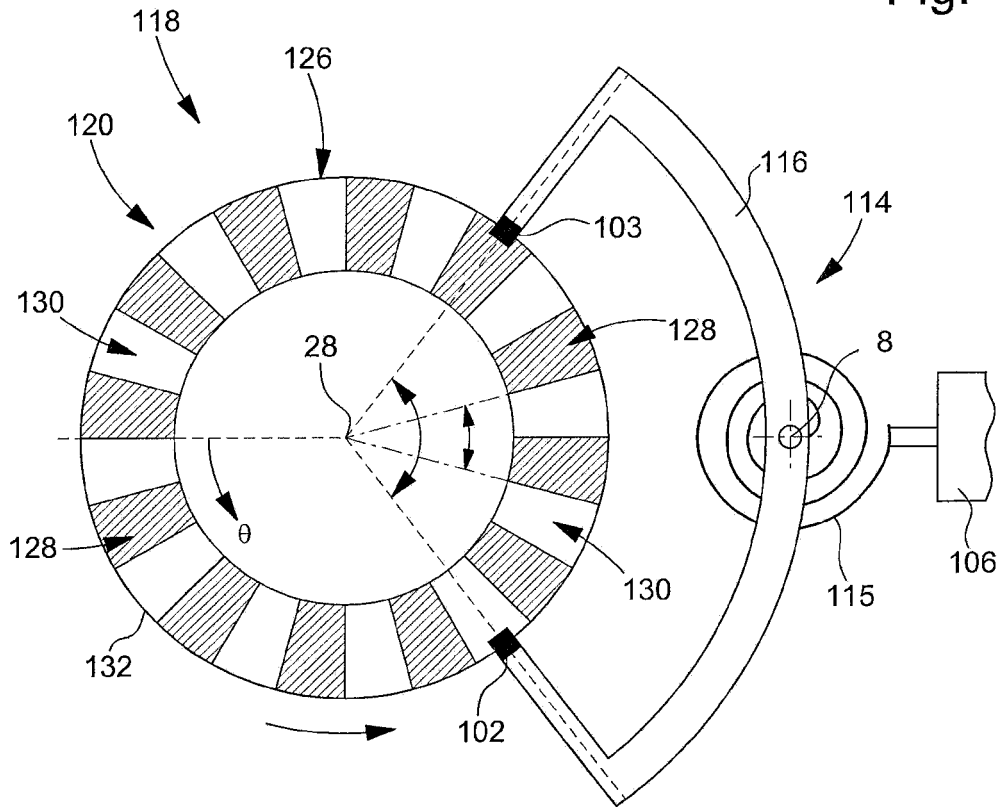


Fig. 14

