

Mouvement d'horlogerie à balancier-spiral

La présente invention concerne un mouvement d'horlogerie comprenant un oscillateur de type balancier-spiral et un échappement, plus particulièrement un tel mouvement dont l'isochronisme est amélioré. Par isochronisme on entend les variations de la marche en fonction de l'amplitude d'oscillation du balancier et en fonction de la position de la montre.

Pendant les oscillations du balancier d'un oscillateur balancier-spiral traditionnel, le spiral se développe de manière excentrique en raison du fait que son centre de gravité n'est pas sur l'axe de l'oscillateur et se déplace. Ce développement excentrique génère des forces de rappel importantes entre les pivots de l'arbre de l'oscillateur et les paliers dans lesquels ils tournent, forces qui en outre varient en fonction de l'amplitude d'oscillation. Ces forces de rappel perturbent les oscillations du balancier et génèrent des variations de marche de l'oscillateur en fonction de l'amplitude d'oscillation. Pour remédier à ce problème, la présente demanderesse a proposé dans son brevet EP 1473604 un oscillateur balancier-spiral dont la spire extérieure du spiral comporte une portion rigidifiée agencée pour rendre le développement du spiral concentrique.

On sait cependant que la concentricité du développement d'un spiral n'est pas le seul facteur qui influence l'isochronisme. Monté dans un mouvement, l'oscillateur est perturbé par l'échappement, qui, notamment dans le cas d'un échappement à ancre suisse, induit un retard de marche. En effet, pendant la phase de dégagement, l'oscillateur subit un couple résistant avant la ligne des centres, ce qui provoque un retard. Pendant la phase d'impulsion, l'oscillateur subit un couple moteur d'abord avant la ligne des centres, ce qui provoque une avance, puis après la ligne des centres, ce qui provoque un retard. Globalement, l'échappement produit ainsi un retard de marche et cette perturbation causée par l'échappement est plus grande aux petites amplitudes d'oscillation du balancier qu'aux grandes.

Les deux phénomènes mentionnés ci-dessus, développement excentrique du spiral et retard de marche dû à l'échappement, sont indépendants ou quasiment indépendants de la position de la montre. A ces deux phénomènes s'ajoute l'effet de la gravité, qui produit un écart de marche entre les positions horizontale et verticale de la montre, et entre ses différentes positions verticales.

La présente invention vise à améliorer encore l'isochronisme d'un mouvement d'horlogerie et propose à cette fin un mouvement d'horlogerie comprenant un oscillateur balancier-spiral et un échappement coopérant avec l'oscillateur, la spire extérieure du spiral comprenant une portion rigidifiée, caractérisé en ce que la portion rigidifiée est agencée pour compenser au moins partiellement la variation de la marche du mouvement en fonction de l'amplitude d'oscillation du balancier due à l'échappement, et en ce que le spiral comprend en outre au moins l'une des caractéristiques suivantes :

- a) une distance entre l'extrémité intérieure du spiral et le centre de rotation du spiral inférieure à 400 μm , par exemple égale à environ 300 μm ,
- b) une courbe Grossmann définie par la spire intérieure du spiral,
- c) une portion rigidifiée définie par la spire intérieure du spiral.

Il a été constaté avec surprise qu'en jouant sur l'agencement de la portion rigidifiée de la spire extérieure du spiral, par exemple sa position, son étendue ou son épaisseur, et qu'en y ajoutant l'une des caractéristiques a), b) et c) ci-dessus, l'isochronisme global du mouvement, tenant compte à la fois de la perturbation due à la non concentricité du spiral, de la perturbation due à l'échappement et de la perturbation due à la gravité, pouvait être nettement amélioré par rapport à l'oscillateur décrit dans le brevet EP 1473604.

Avantageusement, la portion rigidifiée de la spire extérieure est agencée pour que le spiral produise un écart de marche, typiquement une avance de marche, dû au défaut de concentricité du développement du spiral d'au moins 2 s/j, ou d'au moins 4 s/j, ou encore d'au moins 6 s/j, ou encore d'au moins 8 s/j, à

une amplitude de 150° par rapport à une amplitude de 300° , compensant au moins partiellement ladite variation de marche due à l'échappement.

Selon un premier mode de réalisation, la portion rigidifiée de la spire extérieure est plus proche de l'extrémité extérieure du spiral qu'une portion rigidifiée théorique qui rendrait le développement du spiral sensiblement parfaitement concentrique, l'épaisseur et l'étendue de la portion rigidifiée pouvant être sensiblement identiques à celles de ladite portion rigidifiée théorique.

Selon un deuxième mode de réalisation, la portion rigidifiée de la spire extérieure est moins épaisse qu'une portion rigidifiée théorique qui rendrait le développement du spiral sensiblement parfaitement concentrique, la position et l'étendue de la portion rigidifiée pouvant être sensiblement identiques à celles de ladite portion rigidifiée théorique.

Selon un troisième mode de réalisation, la portion rigidifiée de la spire extérieure est moins étendue qu'une portion rigidifiée théorique qui rendrait le développement du spiral sensiblement parfaitement concentrique, la position et l'épaisseur de la portion rigidifiée pouvant être sensiblement identiques à celles de ladite portion rigidifiée théorique.

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée suivante faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 montre un spiral à portion de spire extérieure rigidifiée selon la technique antérieure, une virole associée à ce spiral étant montrée schématiquement par un trait pointillé ;
- la figure 2 montre une courbe d'isochronisme obtenue par simulation numérique des déplacements du centre de rotation du spiral illustré à la figure 1, l'oscillateur dont fait partie ce spiral étant considéré comme libre, c'est-à-dire non soumis à l'action d'un échappement ;

- la figure 3 montre des résultats de mesure d'isochronisme global obtenus sur un mouvement réel comportant un spiral tel qu'illustré à la figure 1 ;
- la figure 4 montre un spiral du type de celui de la figure 1 mais dont la
5 portion de spire extérieure rigidifiée a été déplacée ;
- la figure 5 montre une courbe d'isochronisme obtenue par simulation numérique des déplacements du centre de rotation du spiral illustré à la figure 4, l'oscillateur dont fait partie ce spiral étant considéré comme libre, c'est-à-dire non soumis à l'action d'un échappement ;
- la figure 6 montre des résultats de mesure d'isochronisme global
10 obtenus sur un mouvement réel comportant un spiral tel qu'illustré à la figure 4 ;
- la figure 7 montre un spiral du type de celui de la figure 1 mais dont l'épaisseur de la portion de spire extérieure rigidifiée a été modifiée ;
- la figure 8 montre une courbe d'isochronisme obtenue par simulation
15 numérique des déplacements du centre de rotation du spiral illustré à la figure 7, l'oscillateur dont fait partie ce spiral étant considéré comme libre, c'est-à-dire non soumis à l'action d'un échappement ;
- la figure 9 montre un spiral du type de celui de la figure 1 mais dont
20 l'étendue angulaire de la portion de spire extérieure rigidifiée a été modifiée ;
- la figure 10 montre une courbe d'isochronisme obtenue par simulation numérique des déplacements du centre de rotation du spiral illustré à la figure 9, l'oscillateur dont fait partie ce spiral étant considéré comme
25 libre, c'est-à-dire non soumis à l'action d'un échappement ;
- la figure 11 montre des courbes d'isochronisme correspondant à différentes positions horizontale et verticales d'un spiral à portion de spire extérieure rigidifiée ;

- la figure 12 montre le spiral dont les courbes d'isochronisme sont représentées à la figure 11 ;
- la figure 13 montre un spiral à portion de spire extérieure rigidifiée et à petit diamètre de virole constituant un exemple de réalisation de l'invention ;
- la figure 14 montre des courbes d'isochronisme correspondant à différentes positions horizontale et verticales du spiral illustré à la figure 13 ;
- la figure 15 montre un spiral à portion de spire extérieure rigidifiée, à petit diamètre de virole et à courbe intérieure Grossmann constituant un autre exemple de réalisation de l'invention ;
- la figure 16 montre des courbes d'isochronisme correspondant à différentes positions horizontale et verticales du spiral illustré à la figure 15 ;
- la figure 17 montre un spiral à portion de spire extérieure rigidifiée, à petit diamètre de virole et à portion de spire intérieure rigidifiée constituant encore un autre exemple de réalisation de l'invention ;
- la figure 18 montre des courbes d'isochronisme correspondant à différentes positions horizontale et verticales du spiral illustré à la figure 17 ;
- la figure 19 montre schématiquement un mouvement dans lequel peut être intégré un spiral tel qu'illustré à la figure 13, 15 ou 17.

La figure 1 montre un spiral plan du type de celui décrit dans le brevet EP 1473604, pour un oscillateur balancier-spiral d'un mouvement d'horlogerie. Ce spiral, désigné par le repère 1, est en forme de spirale d'Archimède et est fixé par son extrémité intérieure 2 à une virole 3 montée sur l'arbre du balancier et par son extrémité extérieure 4 à un piton (non représenté) monté sur une pièce fixe du mouvement telle que le coq. L'ensemble spiral 1 – virole 3 peut être réalisé en une seule pièce, dans une matière cristalline telle que le silicium ou le diamant, par

une technique de micro-gravure. La spire extérieure 5 du spiral 1 comporte localement une portion 6 de plus grande épaisseur e que le reste de la lame formant le spiral. Cette épaisseur e , qui peut être variable le long de la portion 6 comme représenté, rigidifie la portion 6 et la rend ainsi sensiblement inactive pendant le développement du spiral. La position et l'étendue de la portion rigidifiée 6 sont choisies pour que le centre de déformation du spiral, correspondant sensiblement au centre de gravité de la partie du spiral autre que la portion rigidifiée 6, soit sensiblement confondu avec le centre de rotation O du spiral et de la virole 3, qui coïncide avec le centre géométrique du spiral. De la sorte, le développement du spiral est concentrique ou quasi concentrique. En pratique, la portion rigidifiée 6 se termine avant l'extrémité extérieure 4 du spiral. Cette extrémité extérieure 4, plus précisément une partie terminale 7 de la spire extérieure 5 incluant la portion rigidifiée 6, est écartée radialement vers l'extérieur par rapport au tracé de la spirale d'Archimède pour garantir que l'avant-dernière spire 8 reste libre radialement, c'est-à-dire ne touche aucun élément tel que le piton, la spire extérieure ou une goupille de raquette, pendant le fonctionnement du mouvement. L'écart entre la partie terminale 7 et l'avant-dernière spire 8 doit être supérieur à celui d'un spiral traditionnel, car du fait du développement concentrique du spiral, l'avant-dernière spire 8 se déplace radialement davantage vers le piton lors de l'expansion du spiral. La partie terminale 7 est en forme d'arc de cercle de centre C . L'étendue angulaire θ de la portion rigidifiée 6 et sa position angulaire α (définie par exemple par la position angulaire du centre de la portion rigidifiée 6 par rapport à la position angulaire de l'extrémité extérieure 4) sont définies depuis ce centre C . L'épaisseur e est mesurée le long d'un rayon partant de ce centre C . Dans l'exemple représenté, le spiral a 14 spires plus une portion de spire s'étendant sur 30° , les valeurs θ et α sont respectivement égales à $85,9^\circ$ et 72° et le maximum de l'épaisseur e est égal à $88,7 \mu\text{m}$. L'épaisseur e_0 de la lame formant le spiral (mesurée selon un rayon partant du centre de rotation O du spiral), à l'exception de la portion rigidifiée 6, est égale à $32,2 \mu\text{m}$. Le rayon R de

la virole 3, ou distance entre l'extrémité intérieure 2 du spiral et le centre de rotation O du spiral, est défini comme étant le rayon du cercle (montré en pointillés) de centre O et passant par le milieu (à la moitié de l'épaisseur e_0) de l'extrémité intérieure 2 du spiral. Dans l'exemple représenté, ce rayon R est égal à 565 μm .

La figure 2 est un diagramme d'isochronisme obtenu avec le spiral illustré à la figure 1 par simulation numérique. Plus précisément, le diagramme de la figure 2 est obtenu en considérant l'extrémité extérieure 4 fixe et l'arbre sur lequel sont fixés la virole 3 et le balancier libre (c'est-à-dire non monté dans des paliers), en calculant par éléments finis le déplacement du centre de rotation O du spiral lors des oscillations du balancier, puis en interpolant et intégrant la courbe de déplacement en fonction de l'amplitude d'oscillation. Des équations analytiques reliant le déplacement du centre de rotation O du spiral à la marche en fonction de l'amplitude d'oscillation du balancier sont proposées par exemple dans l'ouvrage « *Traité de construction horlogère* » de M. Vermot, P. Bovay, D. Prongué et S. Dordor, édité par les Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011. En abscisses du diagramme de la figure 2 est portée l'amplitude d'oscillation du balancier exprimée en degrés par rapport à la position d'équilibre et en ordonnées est portée la marche en secondes par jour. Ce diagramme représente ainsi la variation de marche du spiral due au défaut de concentricité du développement du spiral. Cette variation de marche s'applique de la même manière dans toutes les positions de la montre. Comme on peut le voir à la figure 2, l'écart de marche entre une amplitude d'oscillation de 150° et une amplitude d'oscillation de 300° avec le spiral illustré à la figure 1 est de l'ordre de 1 s/j, ce qui est excellent. Toutefois, ce diagramme ne tient pas compte des perturbations dues à l'échappement ni des perturbations dues à la gravité.

Des mesures ont été faites sur vingt mouvements de conception identique équipés du spiral tel qu'illustré à la figure 1 et d'un échappement à ancre suisse traditionnel. Pour chaque mouvement, dans chacune de six positions différentes

(VH : verticale haute, VG : verticale gauche, VB : verticale basse, VD : verticale droite, HB : horizontale basse et HH : horizontale haute), la marche du mouvement a été mesurée pendant la décharge de son ressort moteur et les mesures ont été reportées dans un graphe. A titre d'exemple, le graphe obtenu

5 pour l'un de ces mouvements est montré à la figure 3. En ordonnées est portée la marche en s/j et en abscisses l'amplitude d'oscillation du balancier, qui diminue progressivement entre l'état complètement remonté et l'état dévidé du ressort moteur du mouvement en raison de la diminution de la force du ressort moteur. Comme on peut le voir, la marche diminue progressivement au fur et à mesure

10 que l'amplitude d'oscillation diminue, ceci dans toutes les positions de la montre, et il existe en outre un écart de marche entre les différentes positions verticales. Pour chaque position de chaque mouvement une courbe a été interpolée et l'écart de marche entre l'amplitude d'oscillation de 150° et l'amplitude d'oscillation de 300° a été déterminée. La moyenne des écarts de marche sur toutes les positions

15 et tous les mouvements a été d'environ 6,7 s/j entre lesdites amplitudes. En d'autres termes, la marche à 150° a été en moyenne inférieure d'environ 6,7 s/j à la marche à 300° . Cette diminution de la marche, ou retard aux petites amplitudes par rapport aux grandes amplitudes, est essentiellement due à l'échappement.

Le présent inventeur a observé que la diminution de la marche due à

20 l'échappement pouvait, en partie au moins, être compensée en modifiant l'agencement de la portion rigidifiée 6, à savoir par exemple sa position α et/ou son étendue θ et/ou son épaisseur e , par rapport à l'agencement de la figure 1 qui confère aux spires du spiral une concentricité parfaite ou quasi-parfaite.

Il a notamment été découvert qu'un paramètre de la portion rigidifiée 6

25 ayant une influence particulière sur l'isochronisme est sa position α . En déplaçant la portion rigidifiée 6 vers l'extrémité extérieure 4 du spiral, on crée une avance de marche aux petites amplitudes par rapport aux grandes amplitudes d'oscillation du balancier. Ainsi, un écart de marche d'environ 6,7 s/j, mais de signe opposé par rapport à l'écart de marche mesuré moyen susmentionné, peut être obtenu entre

les amplitudes de 150° et de 300° en déplaçant la portion rigidifiée 6 à la position $\alpha' = 62^\circ$ et en conservant constantes les autres caractéristiques de la portion rigidifiée 6 (étendue, épaisseur). La variation de la marche due à l'échappement peut ainsi être sensiblement entièrement compensée. La figure 4 montre le nouveau spiral obtenu, avec sa portion de spire extérieure rigidifiée désignée par le repère 6'. Le déplacement de la portion rigidifiée 6 modifie bien entendu le développement du spiral, qui n'est plus aussi concentrique. Mais, d'une part, cette modification est faible, le spiral se développant encore de manière plus concentrique qu'un spiral traditionnel (c'est-à-dire un spiral sans portion rigidifiée), et, d'autre part, cette modification contribue à améliorer l'isochronisme global du mouvement, le défaut de concentricité créé servant à compenser un autre défaut. Dans le diagramme de la figure 5 a été dessinée la courbe d'isochronisme I4 du spiral illustré à la figure 4, obtenue selon la même méthode qu'à la figure 2. On voit que l'augmentation de la marche entre l'amplitude de 300° et l'amplitude de 150° est sensiblement linéaire et de pente inverse de la pente de la variation de la marche due à l'échappement. On a également reporté sur cette figure 5 la courbe d'isochronisme I1 du spiral illustré à la figure 1 à titre de comparaison. A la figure 6 sont représentés des résultats de mesure de la marche d'un mouvement identique à celui sur lequel les mesures de la figure 3 ont été effectuées, mais équipé du spiral illustré à la figure 4 au lieu de celui de la figure 1. Ces résultats montrent que la variation de la marche a été significativement réduite par le déplacement de la portion rigidifiée à la position α' , en particulier dans la plage d'amplitudes allant de 180° à 300° où l'allure générale du graphe est plate.

Un autre paramètre de la portion rigidifiée 6 ayant une influence sur l'isochronisme est son épaisseur e . En diminuant l'épaisseur e , on crée une avance de marche aux petites amplitudes par rapport aux grandes amplitudes d'oscillation du balancier. Ainsi, par exemple, un écart de marche d'environ 6,4 s/j, mais de signe opposé par rapport à l'écart de marche mesuré moyen mentionné en relation avec la figure 3, peut être obtenu entre les amplitudes de 150° et de

300° en diminuant le maximum de l'épaisseur e de la portion rigidifiée 6 (et le reste de l'épaisseur en proportion) à la valeur $e' = 44,2 \mu\text{m}$ et en conservant constantes les autres caractéristiques de la portion rigidifiée (position, étendue). La figure 7 montre le spiral obtenu, avec sa portion de spire extérieure rigidifiée désignée par le repère 6'', et la figure 8 montre la courbe d'isochronisme 17 correspondant à un tel spiral.

Encore un autre paramètre de la portion rigidifiée ayant une influence sur l'isochronisme est son étendue θ . En diminuant l'étendue θ , on crée une avance de marche aux petites amplitudes par rapport aux grandes amplitudes d'oscillation du balancier. Ainsi, par exemple, un écart de marche d'environ 6,9 s/j, mais de signe opposé par rapport à l'écart de marche mesuré moyen mentionné en relation avec la figure 3, peut être obtenu entre les amplitudes de 150° et de 300° en diminuant l'étendue angulaire θ de la portion rigidifiée à la valeur $\theta' = 43,9^\circ$ et en conservant constantes les autres caractéristiques de la portion rigidifiée (position, épaisseur ou maximum d'épaisseur). La figure 9 montre le spiral obtenu, avec sa portion de spire extérieure rigidifiée désignée par le repère 6''', et la figure 10 montre la courbe d'isochronisme 19 correspondant à un tel spiral.

Dans des variantes, on pourra bien entendu combiner les principes exposés ci-dessus, c'est-à-dire modifier au moins deux des paramètres α , e et θ .

En référence de nouveau à la figure 6, on constate que la modification apportée à la portion rigidifiée a un effet de compensation de la variation de marche due à l'échappement, mais qu'elle n'a pas ou peu d'effet sur l'écart de marche entre les différentes positions verticales de la montre. Ceci est valable quel(s) que soi(en)t le(s) paramètre(s) α , e , θ que l'on choisit de modifier. La figure 11 représente des courbes d'isochronisme, désignées par J1 à J5, d'un spiral dont la spire externe comporte une portion rigidifiée agencée pour compenser la variation de marche due à l'échappement, comme décrit ci-dessus. La courbe J1 représente l'isochronisme du spiral en position horizontale, c'est-à-dire les variations de marche dues au développement non concentrique du spiral, et est

obtenue de la même manière que les courbes des figures 2, 5, 8 et 10. Comme on peut le voir, la portion rigidifiée de la spire extérieure du spiral est agencée pour que le spiral produise une avance de marche de 5,3 s/j à l'amplitude de 150° par rapport à l'amplitude de 300°. Les courbes J2 à J5 représentent l'isochronisme du spiral dans les quatre positions verticales VG, VH, VB et VD respectivement, et sont obtenues en tenant compte à la fois du développement non concentrique du spiral et de l'effet de la gravité, en d'autres termes en additionnant les variations de marche dues au développement non concentrique du spiral et à la gravité. Pour déterminer la variation de marche due à la gravité, dans une position verticale donnée, on peut calculer par éléments finis le déplacement du centre de gravité du spiral sous l'effet des oscillations du spiral (le centre de rotation du spiral étant fixe), puis utiliser des équations analytiques reliant ce déplacement et la position du spiral à la marche en fonction de l'amplitude. De telles équations analytiques sont proposées par exemple dans l'ouvrage précité « Traité de construction horlogère ». L'effet statique d'affaissement des spires dû à la gravité est négligé dans la présente invention, de même que l'effet du balourd du balancier, ce balourd pouvant être minimisé par des moyens connus.

On constate à la figure 11 que l'écart de marche entre les positions verticales est de 3,2 s/j à une amplitude d'oscillation du balancier de 250°. Pour diminuer cet écart de marche, il est proposé selon la présente invention de modifier la partie intérieure du spiral, à savoir la distance entre l'extrémité intérieure du spiral et le centre de rotation du spiral et/ou la forme de la spire intérieure.

Le spiral correspondant aux courbes d'isochronisme J1 à J5 représentées à la figure 11 est montré à la figure 12. Il comprend 14 spires. L'étendue angulaire et la position angulaire de sa portion rigidifiée 9 (mesurées de la même manière que pour les spiraux des figures 1, 4, 7 et 9) sont respectivement de 60° et de 75°. Le rayon R de sa virole, ou distance entre l'extrémité intérieure du spiral et le centre de rotation dudit spiral, mesuré de la même manière qu'à la figure 1, est égal à

565 μm . Il a été constaté qu'en diminuant le rayon R à une valeur R' , l'écart de marche entre les positions verticales était réduit. Le rayon R' est avantageusement choisi inférieur à 400 μm . La figure 14 représente les courbes d'isochronisme d'un spiral (illustré à la figure 13) similaire à celui de la figure 12
5 mais ayant un rayon de virole R' égal à 300 μm (et un pas et une épaisseur de spire adaptés en conséquence). Comme cela apparaît sur la figure 14, l'écart de marche entre les positions verticales à une amplitude de 250° est de 1,1 s/j, donc bien inférieur aux 3,2 s/j du spiral de la figure 12. Toutefois, pour obtenir une avance de marche entre les amplitudes d'oscillation de 150° et de 300°
10 comparable à celle du spiral de la figure 12, la portion rigidifiée, désignée par 9', doit être adaptée. A la figure 13, l'étendue angulaire et la position angulaire de la portion rigidifiée 9' sont ainsi de 50° et de 75° respectivement.

Une autre manière de diminuer l'écart de marche entre les positions verticales est de conformer la spire intérieure du spiral selon une courbe
15 Grossmann ou de rigidifier une portion de la spire intérieure. Une telle modification de la spire intérieure peut même être combinée à la diminution du rayon R de la virole pour réduire encore davantage l'écart de marche. Ainsi, la figure 15 montre un spiral dont le rayon de virole R' est égal à 300 μm et dont la spire intérieure 10 est conformée selon une courbe Grossmann. A la figure 16, on peut voir que
20 l'écart de marche entre les positions verticales pour ce spiral est de seulement 0,6 s/j à une amplitude d'oscillation de 250° . De façon comparable, un spiral à portion rigidifiée 11 sur la spire intérieure tel que représenté à la figure 17 (la portion rigidifiée intérieure 11 ayant, comme la portion rigidifiée extérieure 9'', une plus grande épaisseur que le reste des spires) permettra l'obtention d'un écart de
25 marche entre les positions verticales de 0,6 s/j à une amplitude d'oscillation de 250° (figure 18). Dans le cas du spiral de la figure 15, la portion rigidifiée 9'' de la spire extérieure est agencée pour que le spiral produise une avance de marche due au défaut de concentricité du développement du spiral de 4,2 s/j entre les amplitudes de 150° et 300° , pour compenser un retard de marche dû à

l'échappement de même ordre de grandeur. Dans le cas du spiral de la figure 17, la portion rigidifiée 9''' de la spire extérieure est agencée pour que le spiral produise une avance de marche due au défaut de concentricité du développement du spiral de 5,4 s/j entre les amplitudes de 150° et 300°, pour compenser un retard de marche dû à l'échappement de même ordre de grandeur.

Bien que la combinaison d'une courbe Grossmann ou d'une portion de spire intérieure rigidifiée avec un petit rayon de virole R' soit particulièrement avantageuse, on notera que la courbe Grossmann 10 ou la portion de spire intérieure rigidifiée 11 pourrait aussi être utilisée avec une virole de plus grand rayon R. On pourrait aussi combiner un petit rayon de virole R', une courbe Grossmann et une portion de spire intérieure rigidifiée. Dans tous les cas, la portion de spire extérieure rigidifiée pourra être agencée selon l'un quelconque des principes exposés en relation avec les figures 4, 7 et 9 ou selon une combinaison de ces principes. Par ailleurs, il va de soi que l'on pourrait appliquer lesdits principes à un mouvement dont l'échappement produirait une avance de marche au lieu d'un retard de marche. Pour compenser une telle avance de marche on pourrait ainsi, par exemple, éloigner la portion de spire extérieure rigidifiée de l'extrémité extérieure du spiral ou augmenter l'étendue angulaire de la portion de spire extérieure rigidifiée.

Les spiraux décrits ci-dessus sont chacun destinés à faire partie d'un oscillateur d'un mouvement horloger du type du mouvement 12 illustré sous la forme d'un bloc-diagramme à la figure 19. Outre l'oscillateur, désigné par 16, le mouvement 12 comprend, de manière traditionnelle, un organe moteur 13 tel qu'un barillet, un rouage 14, un échappement 15 et un affichage 17.

REVENDICATIONS

1. Mouvement d'horlogerie comprenant un oscillateur balancier-spiral (16)
5 et un échappement (15) coopérant avec l'oscillateur (16), la spire
extérieure du spiral comprenant une portion rigidifiée (9' ; 9'' ; 9'''),
caractérisé en ce que la portion rigidifiée (9' ; 9'' ; 9''') est agencée pour
compenser au moins partiellement la variation de la marche du
mouvement en fonction de l'amplitude d'oscillation du balancier due à
10 l'échappement, et en ce que le spiral comprend en outre au moins l'une
des caractéristiques suivantes :
- a) une distance (R') entre l'extrémité intérieure du spiral et le centre
de rotation du spiral inférieure à 400 μm ,
 - b) une courbe Grossmann (10) définie par la spire intérieure du
15 spiral,
 - c) une portion rigidifiée (11) définie par la spire intérieure du spiral.
2. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 1, caractérisé en ce que
la portion rigidifiée (9' ; 9'' ; 9''') de la spire extérieure est agencée pour
20 que le spiral produise un écart de marche dû au défaut de concentricité
du développement du spiral d'au moins 2 s/j à une amplitude de 150°
par rapport à une amplitude de 300°, compensant au moins
partiellement ladite variation de marche due à l'échappement.
- 25 3. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 2, caractérisé en ce que
la portion rigidifiée (9' ; 9'' ; 9''') de la spire extérieure est agencée pour
que le spiral produise un écart de marche dû au défaut de concentricité
du développement du spiral d'au moins 4 s/j à une amplitude de 150°

par rapport à une amplitude de 300°, compensant au moins partiellement ladite variation de marche due à l'échappement.

4. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 3, caractérisé en ce que la portion rigidifiée (9' ; 9'' ; 9''') de la spire extérieure est agencée pour que le spiral produise un écart de marche dû au défaut de concentricité du développement du spiral d'au moins 6 s/j à une amplitude de 150° par rapport à une amplitude de 300°, compensant au moins partiellement ladite variation de marche due à l'échappement.

5. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 4, caractérisé en ce que la portion rigidifiée (9' ; 9'' ; 9''') de la spire extérieure est agencée pour que le spiral produise un écart de marche dû au défaut de concentricité du développement du spiral d'au moins 8 s/j à une amplitude de 150° par rapport à une amplitude de 300°, compensant au moins partiellement ladite variation de marche due à l'échappement.

6. Mouvement d'horlogerie selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que ledit écart de marche est une avance de marche.

7. Mouvement d'horlogerie selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que la portion rigidifiée (6') de la spire extérieure est plus proche de l'extrémité extérieure (4) du spiral qu'une portion rigidifiée théorique (6) qui rendrait le développement du spiral sensiblement parfaitement concentrique.

8. Mouvement d'horlogerie selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la portion rigidifiée (6'') de la spire extérieure

est moins épaisse qu'une portion rigidifiée théorique (6) qui rendrait le développement du spiral sensiblement parfaitement concentrique.

- 5 9. Mouvement d'horlogerie selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que la portion rigidifiée (6''') de la spire extérieure est moins étendue qu'une portion rigidifiée théorique (6) qui rendrait le développement du spiral sensiblement parfaitement concentrique.
- 10 10. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 7, caractérisé en ce que l'épaisseur (e) et l'étendue (θ) de la portion rigidifiée (6'') de la spire extérieure sont sensiblement identiques à celles de ladite portion rigidifiée théorique (6).
- 15 11. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 8, caractérisé en ce que la position (α) et l'étendue (θ) de la portion rigidifiée (6'') de la spire extérieure sont sensiblement identiques à celles de ladite portion rigidifiée théorique (6).
- 20 12. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 9, caractérisé en ce que la position (α) et l'épaisseur (e) de la portion rigidifiée (6''') de la spire extérieure sont sensiblement identiques à celles de ladite portion rigidifiée théorique (6).
- 25 13. Mouvement d'horlogerie selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que le spiral comporte la caractéristique a).
14. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 13, caractérisé en ce que ladite distance (R') est d'environ 300 μm .

15. Mouvement d'horlogerie selon la revendication 13 ou 14, caractérisé en ce que le spiral comporte en outre la caractéristique b).

5

16. Mouvement d'horlogerie selon l'une quelconque des revendications 13 à 15, caractérisé en ce que le spiral comporte en outre la caractéristique c).