

## Un nouveau régulateur mécanique pour une réserve de marche exceptionnelle

F. Barrot, O. Dubochet, S. Henein (à l'EPFL depuis nov. 2012), P. Genequand, L. Giriens, I. Kjelberg, P. Renevey, P. Schwab  
CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA, rue Jaquet-Droz 1, CH-2002 Neuchâtel

F. Ganny, T. Hamaguchi  
VMF Vaucher Manufacture Fleurier SA, chemin du Righi 2, CH-2114 Fleurier

### Résumé

«Voyager, c'est bien utile, ça fait travailler l'imagination» (Céline). C'est à l'occasion d'un voyage en train entre Neuchâtel et Genève que Pierre Genequand, alors ingénieur au CSEM, eut l'idée d'associer les avantages des structures flexibles et les caractéristiques attrayantes du silicium pour la conception d'un nouveau régulateur mécanique aux performances exceptionnelles. Le concept, fondé sur deux domaines d'expertises du CSEM, mûrit progressivement ; suite aux premiers dimensionnements et à sa validation théorique, la réalisation d'une maquette fonctionnelle à l'échelle 5:1 constitua le premier grand défi de cette aventure et permit de confirmer la justesse de la conception ainsi que le bienfondé de l'idée originale. C'est à la vue de ce premier prototype que Vaucher Manufacture Fleurier (VMF), fidèle à sa politique d'innovation et d'intégration de nouvelles technologies dans le respect de la tradition horlogère, décida de participer à l'aventure avec le CSEM, ce qui mènera à la réalisation de ce nouveau régulateur en silicium à l'échelle 1:1. Une première campagne de validation expérimentale menée par VMF, confirme le fort potentiel d'innovation de ce nouveau concept et permet d'envisager la fabrication de mouvements mécaniques disposant d'une réserve de marche d'au moins un mois.

### De l'espace à l'horlogerie : genèse d'une idée

La réserve de marche des montres mécaniques est fortement limitée par les pertes d'énergie dues aux frottements et aux chocs localisés au niveau de l'oscillateur et de l'échappement. Un régulateur mécanique classique constitué d'un balancier, d'un ressort spiral et d'un échappement à ancre suisse, a l'essentiel de ses pertes par frottement localisées au niveau des pivots du balancier et de l'ancre tandis que ses pertes par chocs sont principalement localisées au niveau des interfaces entre l'ancre, la roue de l'échappement et le balancier. Supprimer ces frottements et diminuer les pertes lors de ces chocs permet de diminuer l'énergie nécessaire à l'entretien des oscillations du balancier. La réserve de marche en est alors grandement augmentée.

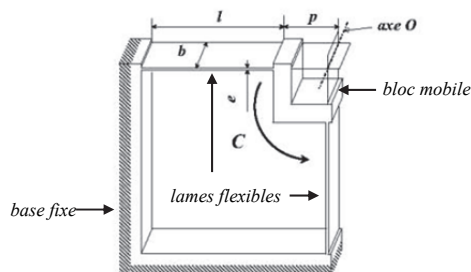


Fig. 1 : Guidage en rotation sur lames flexibles : pivot RCC dont l'axe de rotation  $O$  correspond à l'intersection des plans des deux lames flexibles [1].

Supprimer les frottements pour réaliser des guidages dans des mécanismes de grande précision est le type même de défis qu'a relevé le physicien Pierre Genequand tout au long de sa carrière au CSEM. Pour ce faire, la clef réside dans l'utilisation d'articulations et de structures flexibles [2] qui étaient jusqu'alors essentiellement utilisées pour la conception de mécanismes de haute précision à vocation

opto-mécanique pour les applications astronomiques ou spatiales (Fig. 1). Une des caractéristiques communes à tous ces mécanismes est la très grande précision exigée pour le positionnement d'éléments optiques. De plus, ces mécanismes fonctionnent souvent dans le vide, à des températures cryogéniques et sans aucune possibilité de maintenance. Les structures sur guidages flexibles sont donc particulièrement adaptées pour effectuer ces mouvements précis sans frottement, sans utilisation de lubrifiant et sans usure.

Convaincu que les avantages de ces structures flexibles pouvaient être mis au service de la micromécanique de précision horlogère, Pierre Genequand (Fig. 2) élaborait un concept novateur de régulateur mécanique horloger utilisant les structures flexibles tant au niveau de l'ancre que de l'oscillateur. L'objectif visé est de disposer d'une réserve de marche de 30 jours sur un mouvement mécanique horloger.

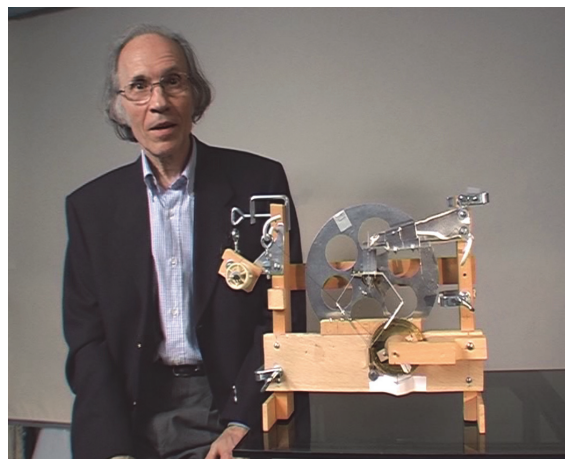


Fig. 2 : Pierre Genequand et le premier prototype de son régulateur mécanique sur guidages flexibles (échelle 20:1).

## L'échappement Genequand à la croisée des chemins

Après un premier prototype à l'échelle 20:1 réalisé par notre inventeur, le CSEM, convaincu par le potentiel de cette idée, mit les moyens pour développer en interne un prototype à l'échelle 5:1 ; il n'en fallu pas moins pour que Vaucher Manufacture Fleurier (VMF) et le CSEM, l'horloger, le motoriste et le scientifique décident de mobiliser leurs équipes sur la concrétisation et l'intégration d'un échappement à contact permanent dans un mouvement.

### Un mouvement à la performance exceptionnelle

La perspective d'un calibre ayant une réserve de marche d'au moins 30 jours au lieu de 7 grâce à l'invention de Pierre Genequand est tout à fait envisageable. 12 remontages par an au lieu de 52. VMF mise sur l'innovation pour offrir à ses clients un calibre mécanique toujours plus performant. Elle privilégie l'emploi du silicium principalement dans cette perspective et avec la volonté de ne pas l'utiliser pour des composants qui peuvent se réaliser de manière traditionnelle. Une véritable prouesse technique au service de l'inlassable quête du mouvement mécanique perpétuel.

### Un saut dans le temps

Si les techniques de microstructuration du silicium avaient été disponibles avant l'invention de l'échappement à ancre suisse et de la montre à remontage automatique, nous aurions sans doute écrit l'histoire horlogère autrement. Quelle aurait été l'évolution de la montre mécanique ? Le remontage manuel aurait sans doute pris le pas sur l'automatique. En toute certitude, le système Genequand, grâce au silicium, rendra la montre mécanique bien plus autonome. Douze remontages par an, une économie de tours de remontoir ; le défi est lancé, celui de tendre vers 0.

### Une invention à transplanter dans un corps horloger

Le régulateur Genequand a été développé comme un cœur exogène qui doit intégrer son corps et fonctionner dans un ensemble. Le savoir-faire horloger de VMF et l'expertise scientifique du CSEM travaillent sur des prototypes afin de proposer un nouveau mouvement pour la société sœur de VMF, la marque Parmigiani Fleurier qui bénéficiera d'une période d'exclusivité. Le système Genequand sera ensuite adaptable à d'autres calibres et accessible aux autres marques clientes de la manufacture fleurissante.

### Le « système Genequand' » : un concept novateur pour augmenter la réserve de marche des montres mécaniques

L'augmentation de la réserve de marche des montres mécaniques est un des sujets de recherche les plus étudiés en horlogerie.

Avec le concept qu'il propose, Pierre Genequand vise une réserve de marche de 30 jours. Le principe consiste à diminuer fortement l'énergie nécessaire pour entretenir les oscillations du balancier en minimisant la dépense énergétique de l'oscillateur et de l'échappement.

Comme nous le verrons plus en détail par la suite, la mise en œuvre du système Genequand dans un calibre de montre repose sur deux idées complémentaires :

- l'utilisation des structures flexibles pour minimiser les pertes d'énergie tant au niveau de l'oscillateur qu'au niveau de l'échappement
- l'utilisation du silicium associé aux techniques de micro-structuration par gravure DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) pour réaliser des pièces micromécaniques de grande précision tirant profit des excellentes propriétés mécaniques du silicium.

Vu l'originalité de l'approche proposée, ce développement a conduit au dépôt de quatre brevets par le CSEM.

### L'oscillateur du « Système Genequand »

Pour espérer augmenter d'un facteur dix la réserve de marche d'une montre mécanique classique, il faut s'attaquer au plus grand consommateur d'énergie de ce système : l'oscillateur qui est constitué, dans son implémentation classique, d'un balancier associé à un ressort spiral. A chaque alternance, l'oscillateur perd de l'énergie qu'il convient de lui restituer afin d'entretenir ses oscillations. Ce transfert d'énergie se fait depuis la roue d'échappement par l'intermédiaire de l'ancre. Minimiser l'énergie perdue par l'oscillateur à chaque alternance permet par conséquent de minimiser l'énergie nécessaire à l'entretien des oscillations et donc, pour une fréquence d'oscillation donnée, d'augmenter la réserve de marche du système. En d'autres termes, il s'agit d'augmenter fortement le facteur de qualité de l'oscillateur qui est inversement proportionnel à la quantité d'énergie perdue par l'oscillateur entre chaque alternance. Or, dans une montre classique, la perte d'énergie de son oscillateur est principalement causée par la friction du pivot supportant le balancier.

Partant de cette constatation, la première révolution proposée dans le « système Genequand » consiste à utiliser un pivot basé sur des articulations flexibles en lieu et place d'un palier traditionnel. D'une part, un pivot flexible est intrinsèquement exempt de tout frottement – hormis les frottements internes à la matière et les frottements de l'air – et cumule avantageusement les fonctions de guidage en rotation et, de par son élasticité, de ressort de rappel. Il remplace alors le pivot sur palier à rubis ainsi que le ressort spiral.

En choisissant en outre le silicium comme matériau de base de ce nouvel oscillateur, il est alors possible de réaliser une pièce monolithique extrêmement précise. Cette dernière combine à elle seule les fonctions de balancier, de pivot et de ressort de rappel tout en bénéficiant de surcroît des propriétés mécaniques exceptionnelles du silicium cristallin [3] [4].

Le silicium dispose en effet des caractéristiques suivantes qui en font un candidat idéal pour la réalisation d'un oscillateur horloger sur pivot flexible à haut facteur de qualité :

- comportement élastique idéal avec absence d'hystérèse mécanique
- limite de rupture élevée
- précision micrométrique de la structuration par DRIE
- faible coefficient de friction pour des contacts Si/Si
- amagnétisme
- résistance à la corrosion
- faible densité

Les pivots flexibles ont cependant deux limitations qu'il est nécessaire de prendre en compte pour la conception d'un oscillateur horloger. D'une part les amplitudes d'oscillations sont limitées (typiquement 20° max) par rapport à des pivots classiques ; d'autre part, le centre de rotation instantané est affecté de déplacements parasites d'amplitude plus ou moins importante suivant l'implémentation choisie.

Du point de vue énergétique, la limitation de l'amplitude des oscillations d'un balancier sur pivot flexible est un avantage. En effet, le balancier oscillant sur une plus petite course, ses pertes entre chaque alternance seront d'autant plus faibles (ex : frottements dans l'air) et, *in fine*, l'énergie nécessaire pour entretenir chaque alternance sera également d'autant plus faible. Cependant, la limitation d'amplitude d'un oscillateur sur pivot flexible augmente la sensibilité du système aux perturbations extérieures. Cet inconvénient est ici contrebalancé par une augmentation de fréquence, passant de 4 Hz pour un oscillateur classique à typiquement 12 Hz dans notre cas. Ce choix diminue légèrement la réserve de marche du fait que les pertes par unité de temps croissent avec une augmentation de fréquence,

mais le très bon facteur de qualité attendu avec ce type d'oscillateur permet de s'autoriser cette liberté sans compromettre les trente jours de réserve de marche visés au final.

$$E_b = \frac{T I \theta^2 \omega^3}{\eta 2Q} \quad (1)$$

$E_b$  : énergie du ressort de barillet

T : réserve de marche

I : inertie du balancier

$\theta$  : amplitude du balancier

$\omega = 2\pi f$  : vitesse angulaire

Q : facteur de qualité

$\eta$  : rendement du rouage et de l'échappement

Enfin, afin de minimiser les déplacements (translations parasites) du centre de rotation, et donc les perturbations sur la marche, une implémentation de type pivot Wittrick [5] est choisie. L'intersection du plan des deux lames définit un axe de pivotement virtuel stable autour duquel le balancier oscille. Cette configuration particulière permet, entre autre, de rendre la fréquence d'oscillation indépendante de l'orientation du balancier par rapport à la gravité.

Les figures 3 et 4 montrent respectivement l'implémentation proposée pour l'oscillateur du « système Genequand » ainsi que les déplacements attendus de son centre de rotation en fonction de l'amplitude d'oscillation.

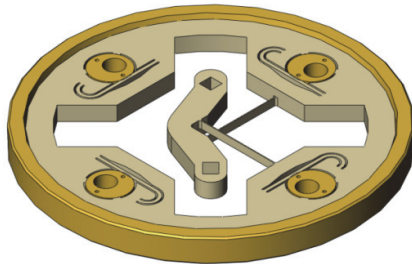


Fig. 3 : L'oscillateur du "système Genequand" : une pièce monolithique en silicium guidée en rotation par un pivot sur lames flexibles de type Wittrick.

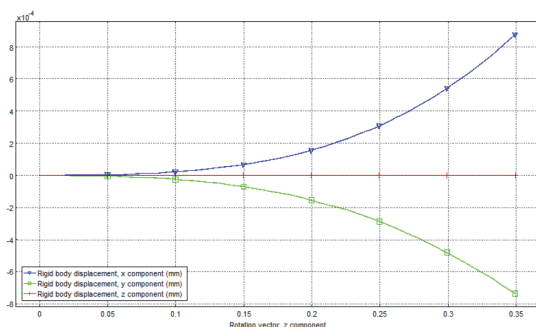


Fig. 4 : Mouvement du centre de rotation (< 1 micron) en fonction de l'amplitude d'oscillation (< 20 deg) du balancier Wittrick (bleu et vert : déplacements x et y dans le plan du balancier, rouge : déplacement z hors plan).

Combinant les avantages des structures flexibles et du silicium, l'oscillateur du « système Genequand » se caractérise par une absence de tout frottement et de toute hystérèse mécanique au niveau de son pivot virtuel. Il constitue

ainsi la première pièce maîtresse du « système Genequand » en permettant au final:

- D'obtenir des facteurs de qualité beaucoup plus élevés que les oscillateurs sur pivots classiques.
- D'envisager des réserves de marches beaucoup plus importantes que dans les systèmes classiques.
- D'éviter les problèmes de vieillissement de l'huile en se passant de toute lubrification.
- D'éviter les problèmes d'usure par friction des matériaux en contact et en mouvement relatifs. En particulier les problèmes de fiabilité provenant de l'augmentation progressive des jeux au niveau des paliers ne se posent plus. L'oscillateur proposé aura donc un facteur de qualité très élevé et une très grande stabilité dans le temps.
- D'envisager une fiabilité à long terme plus élevée que celle des oscillateurs sur pivots classiques.

### L'échappement du « système Genequand »

Dans une montre mécanique, l'énergie d'entretien de l'oscillateur est fournie par l'intermédiaire de l'échappement. Afin de ne pas perdre tous les bénéfices de l'oscillateur Genequand, et en particulier la grande réserve de marche envisageable, il est nécessaire de l'accoupler avec un échappement lui-même très peu gourmand en énergie. Il s'agit donc de minimiser également les pertes au niveau de l'échappement. Par ailleurs, l'énergie nécessaire à chaque alternance pour entretenir la marche de l'oscillateur Genequand est très faible (grand facteur de qualité). L'échappement proposé doit donc être à la fois peu énergivore et capable de fonctionner correctement en transférant le peu d'énergie nécessaire à l'entretien des oscillations de l'oscillateur Genequand.

Rappelons tout d'abord que deux grandes familles d'échappements coexistent : les échappements à contact périodique et les échappements à contact permanent. L'échappement proposé appartient à cette seconde famille. Plus précisément on peut l'associer à l'échappement sauteur de Harrison dont il constitue une amélioration avec :

- l'utilisation de palettes flexibles de l'ancre
- et l'utilisation d'un pivot sur lames flexibles de type RCC (*Remote Compliance Center*) en lieu et place du pivot sur palier classique pour guider les oscillations de l'ancre.

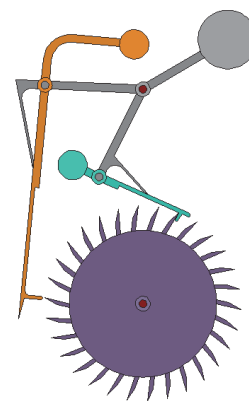


Fig. 5 : L'échappement sauteur de Harrison [6].

Ainsi, tandis que dans le système proposé par Harrison, la force de désengrènement des palettes est réalisée par l'utilisation de contrepoids, l'échappement Genequand utilise la force de déformation élastique de palettes flexibles pour réaliser la même fonction. Cette différence permet de rendre le fonctionnement de l'échappement Genequand indépendant de la gravité, ce qui n'est pas le cas de l'implémentation proposée par Harrison puisque le désengrènement des palettes n'est possible que lorsque l'ancre

est disposée verticalement (action de la gravité sur le contrepoids).

Par ailleurs, l'utilisation d'un pivot sur articulations flexibles en lieu et place d'un pivot classique, permet de supprimer la source de frottement présente dans un échappement à ancre classique ainsi que dans l'échappement proposé par Harrison.

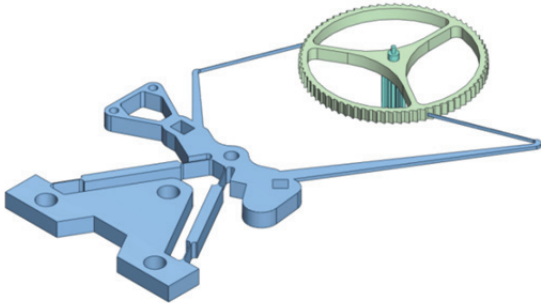


Fig. 6 : L'ancre sur pivot RCC du « système Genequand » engrenée avec la roue d'échappement (pièces en silicium).

L'échappement du « système Genequand » est conçu et interfacé avec l'oscillateur Genequand de la façon suivante :

L'ancre de l'échappement Genequand oscille autour d'un pivot virtuel de type RCC dont la partie fixe est solidaire de la base du mouvement tandis que la partie mobile porte les palettes flexibles interagissant avec la roue d'échappement. L'oscillateur du « système Genequand » est quant à lui solidarisé à l'ancre par la partie mobile de cette dernière ; cet interfaçage est réalisé de telle sorte que les axes des pivots virtuels de l'ancre et du balancier Wittrick sont confondus : ils définissent alors l'axe d'oscillation du « système Genequand ». Afin de minimiser la dépense énergétique entre chaque alternance d'engrènement/désengrènement, le rapport de rigidité de ces deux pivots flexibles montés en série est choisi de sorte que les amplitudes d'oscillations des palettes soient beaucoup plus faibles que celles du balancier (elles-mêmes limitées à 20°). Bien sûr, l'amplitude d'oscillation de l'ancre doit être suffisante pour permettre les alternances d'engrènement/désengrènement tout en tenant compte des tolérances de fabrication et d'assemblage des différentes pièces constituant le « système Genequand ». L'utilisation des articulations flexibles permet alors d'une part de s'affranchir des pertes par frottement et des imprécisions introduites par le jeu des pivots classiques et, d'autre part, de minimiser l'amplitude d'oscillation des palettes de l'ancre. Tout ceci contribue à réduire drastiquement la dépense d'énergie au niveau de l'échappement et à maximiser l'énergie transmise au balancier à chaque alternance, ce qui permet au final d'envisager une grande réserve de marche. Bien sûr, de même que pour l'oscillateur Genequand, l'échappement du système Genequand est également réalisé en silicium afin de bénéficier de tous les atouts de ce matériau.

Le principe de fonctionnement de l'échappement Genequand est le suivant :

À chaque alternance d'oscillation du balancier, une des deux palettes flexibles de l'ancre s'engrène avec la roue d'échappement, la faisant dans un premier temps très légèrement reculer (grâce à l'inertie communiquée par le balancier). Ce léger mouvement de recul de la roue d'échappement permet à l'autre palette flexible de s'échapper. Dans un deuxième temps, la palette engrenée reprend l'effort de la roue d'échappement et le transmet au balancier, jusqu'à ce qu'elle puisse à son tour s'échapper à la prochaine alternance au moment même où l'autre palette entrera à son tour en contact avec la roue d'échappement.

Notons que la roue d'échappement est également réalisée en silicium avec une denture optimisée pour l'interaction avec les palettes flexibles de l'ancre de l'échappement Genequand. Cette configuration permet de tirer profit de la précision de structuration de la gravure DRIE, du bon coefficient de friction silicium/silicium et de la faible densité du silicium. La masse et le moment d'inertie de la roue d'échappement sont alors fortement minimisés, de même que les pertes par frottement qui apparaissent au moment du glissement des palettes de l'ancre sur les faces des dents (phases d'engrènement et de désengrènement) ce qui permet *in fine* d'augmenter l'énergie transmise au balancier.

Combiné avec l'oscillateur sur pivot flexible du « système Genequand », l'échappement Genequand constitue la deuxième pièce maîtresse du « système Genequand » et permet donc de proposer un régulateur mécanique dont les principales causes de frottement sont réduites et fonctionnent avec peu d'énergie.

### Le correcteur d'isochronisme mis en œuvre dans le « système Genequand »

L'échappement horloger a pour but d'entretenir et de compter les oscillations de l'organe régulateur d'une horloge ou d'une montre. Idéalement il doit assurer ses deux fonctions en dissipant un minimum d'énergie et en influençant le moins possible l'isochronisme du régulateur, c'est-à-dire l'absence de variation de fréquence en fonction de l'amplitude de l'oscillation.

Dans le régulateur Genequand, tout a été fait pour minimiser l'énergie et les pertes de fonctionnement afin d'envisager une réserve de marche d'au moins un mois. Il reste cependant un dernier défi à relever : les problèmes d'isochronisme. Ces derniers sont induits par l'échappement à contact permanent et par la faible variation de la constante de rappel du pivot Wittrick en fonction de l'amplitude d'oscillation.

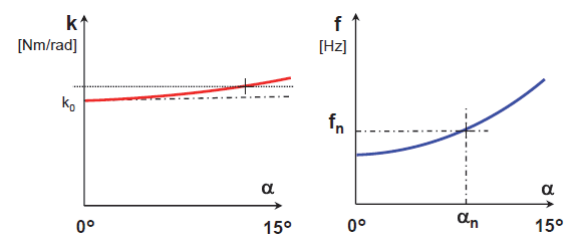


Fig. 7 : Représentation de la variation de rigidité du balancier sur pivot Wittrick en fonction de l'amplitude de l'oscillation (gauche) et de son effet sur la fréquence (droite) (N.B. : cas sans correcteur d'isochronisme).

La rigidité du pivot Wittrick augmente légèrement avec l'amplitude d'oscillation de ce dernier. La fréquence d'oscillation du balancier sera donc également dépendante de son amplitude d'oscillation. Si cette variation de rigidité, bien que très faible, n'est pas compensée, elle sera la cause d'un défaut d'isochronisme en cas de variation de l'amplitude d'oscillation du balancier (ex : variation du couple d'entraînement en fonction de la décharge du barillet).

Par ailleurs, comme l'échappement Genequand est à contact permanent, à chaque instant, l'ancre est en contact avec la roue d'échappement par l'intermédiaire de l'une de ses palettes, transmettant directement (et en permanence) au balancier toute variation de la force d'entretien de ses oscillations. Cependant, par rapport à un mouvement classique, la force d'impulsion que l'on doit transmettre est faible dans le cas du « système Genequand ». En effet, de par le facteur de qualité très élevé de son oscillateur et sa conception générale minimisant les pertes ainsi que l'énergie nécessaire à son fonctionnement, le régulateur



Genequand est caractérisé par une énergie d'entretien des oscillations beaucoup plus faible que dans les systèmes classiques. Par conséquent, les défauts d'isochronisme introduits par ce contact permanent seront beaucoup plus faibles que dans les mouvements classiques à contact permanent.

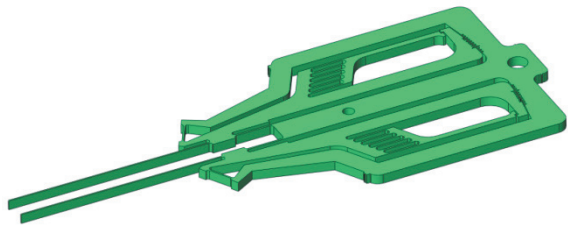


Fig. 8 : Le correcteur d'isochronisme du « système Genequand ».

Ces problèmes d'isochronisme ont été résolus en introduisant une pièce supplémentaire dans le mécanisme (Fig.8). Cette pièce a pour rôle d'introduire un moment correcteur au niveau de l'ancre. Ce moment dépend de l'amplitude d'oscillation de l'ancre et sa valeur est réglable dans une plage prédéterminée. Cette pièce supplémentaire en silicium est conçue de façon à compenser entièrement d'une part la faible variation de rigidité du balancier Wittrick et d'autre part la faible non-linéarité apportée par les fluctuations de l'impulsion d'entretien de l'oscillation du balancier. Cette pièce supplémentaire joue ainsi le rôle de correcteur d'isochronisme en rendant la fréquence d'oscillation indépendante de l'amplitude d'oscillation du balancier. Ce correcteur constitue ainsi la troisième pièce maîtresse du « système Genequand ».

### Réalisation pratique et intégration du « système Genequand » dans un mouvement

Les pièces constituant le « système Genequand » ont été produites en silicium dans la fonderie MEMS du CSEM qui s'est illustrée par sa maîtrise des procédés de gravure profonde du silicium pour des applications optiques, spatiales et horlogères.

Dans le régulateur Genequand, les pièces les plus complexes à produire sont l'oscillateur sur pivot Wittrick et l'ancre sur pivot RCC. La finesse des lames, la tolérance de verticalité de leurs flancs et l'élanement important des palettes constituent un premier lot de défis à relever. Mais c'est surtout le fait de devoir réaliser ce type de détails dans la géométrie sur deux niveaux de ces pièces qui a constitué le principal défi de fabrication. Pour ce faire les substrats utilisés sont des substrats SOI (*Silicon On Insulator*) dont la face avant puis la face arrière ont été structurées successivement. Au final, chaque pièce a été fabriquée avec un taux de réussite élevé tout en garantissant des tolérances de +/-1 microns.



Fig. 9 : Le balancier Wittrick réalisé en silicium, ici représenté assemblé avec une serge en platine.

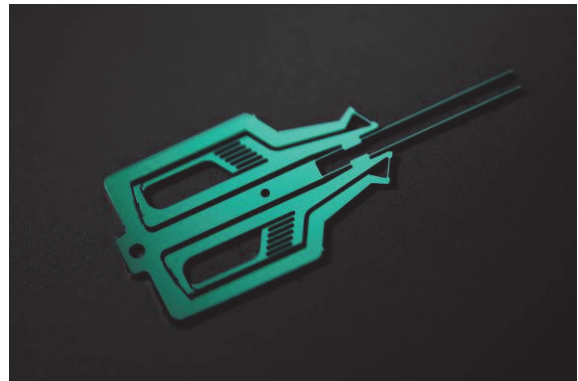


Fig. 10 : Le correcteur d'isochronisme réalisé en silicium.

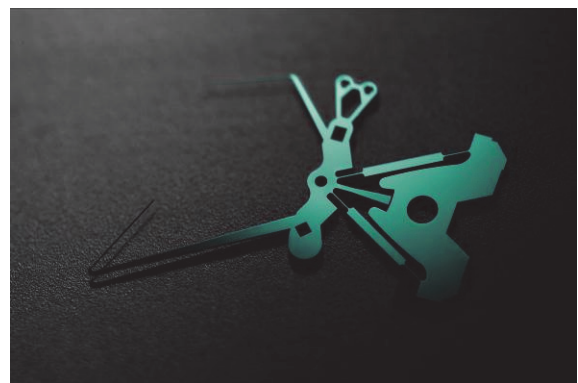


Fig. 11 : L'ancre réalisée en silicium.

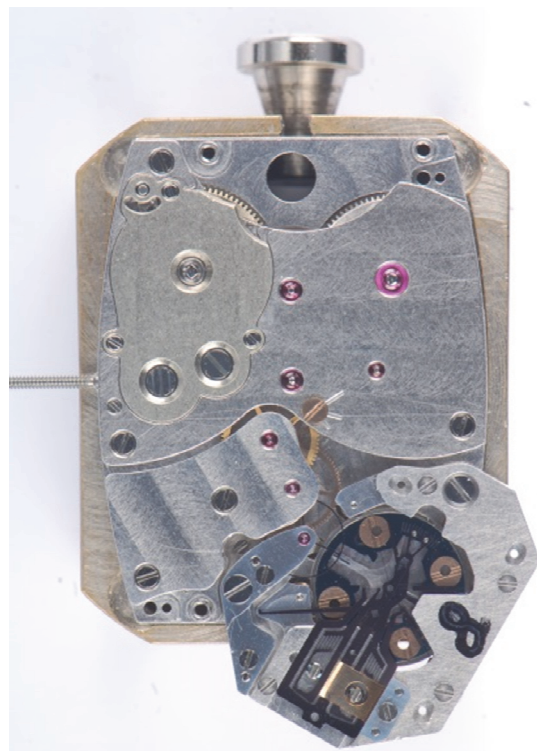


Fig. 12 : Prototype du régulateur mécanique sur structures flexibles – « système Genequand » – à l'échelle 1:1.

## Premiers résultats expérimentaux

Le « système Genequand » est intégré au calibre VMF 6000 qui est adapté pour l'occasion. Le rouage de finissage est adapté à la fréquence et au couple nécessaire pour un tel système. La caractérisation des composants du « système Genequand » est faite sur cinq mouvements. Parallèlement à cela, nous avons un mouvement « démonstrateur » fonctionnant en continu. Les mesures de caractérisation consistent en la confirmation d'un haut facteur de qualité et une détermination des différents paramètres impactant la marche et l'isochronisme.

Les mesures faites sur l'oscillateur ont montré que le facteur de qualité varie très peu entre la position horizontale et les positions verticales. Le facteur de qualité avoisine la valeur de 1'000 pour cette première itération de prototype et le système présente encore un potentiel d'amélioration.

La caractérisation du compensateur d'isochronisme met en évidence la régulation de la marche et donc de la fréquence sur la plage d'amplitude de fonctionnement du balancier Wittrick. La figure 13 montre un graphique comparatif de mesure de marche entre le « système Genequand » sans et avec compensateur d'isochronisme.

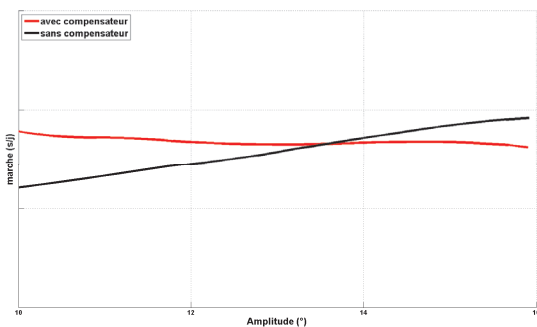


Fig. 13 : Mesure de la marche du « système Genequand » en fonction de l'amplitude d'oscillation avec et sans compensateur d'isochronisme sur la plage fonctionnelle.

Le couple mesuré nécessaire au fonctionnement du « système Genequand » est nettement inférieur à celui correspondant à un échappement classique, d'un rapport d'environ 10. L'énergie minimale ainsi nécessaire pour entretenir les oscillations est de 10 nJ. C'est entre autres cette confirmation d'une consommation réduite qui nous permet d'estimer une réserve de marche d'au moins un mois pour un calibre dont la réserve de marche initiale est de 7 jours avec un oscillateur classique.

## Conclusions et perspectives

Un régulateur mécanique permettant d'atteindre une réserve de marche d'un mois a été conçu.

Constitué par l'association d'un échappement et d'un oscillateur dont la conception générale minimise les pertes ainsi que l'énergie nécessaire à leur fonctionnement, ce nouveau régulateur repose sur deux concepts clefs : l'utilisation de structures flexibles en lieu et place de pivots classiques et l'utilisation du silicium avec ses qualités mécaniques exceptionnelles associées aux techniques de micro-structuration par gravure DRIE.

L'utilisation de structures flexibles a permis de réduire drastiquement les pertes et l'énergie nécessaire au fonctionnement du système. D'autre part, les pivots sur guidages flexibles, garantissent une grande précision de guidage exempt de tout phénomène d'usure et ne nécessitent pas l'utilisation de lubrifiant. Ils assurent donc une grande stabilité au régulateur mécanique proposé tout en

simplifiant son entretien par rapport à un régulateur classique.

Suite à la conception et à la réalisation d'un premier lot de pièces, le nouvel échappement et le nouvel oscillateur proposés ont été intégrés dans un mouvement. Des premiers tests de fonctionnement et de caractérisation ont été effectués sur un premier prototype. Les premiers résultats sont prometteurs et confirment le facteur de qualité exceptionnel de l'oscillateur. Des tests complémentaires sont nécessaires afin d'analyser en détail le comportement de ce nouveau régulateur et de valider son fonctionnement.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier particulièrement les personnes suivantes qui ont grandement contribué au développement du « système Genequand » :

- CSEM : Laurent Balet, Laurent Beynon, Florent Cosandier, Serge Droz, Wayne Gletting et Grégory Musy pour leur engagement, leur perspicacité et leur ingéniosité face aux défis de conception inhérents à ce concept novateur. Ainsi que l'ensemble de l'équipe travaillant dans les salles blanches et dans les laboratoires de caractérisation pour avoir su relever les nombreux défis de fabrication.
- VMF : Guillaume Deroze, Julien Harlé, Karl Iten, Franck Kwiatek, Olivier Laesser, Pedro Nunes Marques, Daniel Otth, Katia Della Pietra ainsi que toutes les personnes ayant contribué à la réalisation des prototypes pour leur engagement et leur persévérance pour intégrer la technologie Silicium à la montre mécanique.
- Atokalpa : Nicolas Golay pour son enthousiasme.

## Références

- [1] S. HENEIN, *Conception des guidages flexibles*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001.
- [2] P. GENEQUAND, M. BOGDANSKI, I. KJELBERG, *Eléments flexibles usinés pour applications microtechniques*, *Bulletin SSC* 33, 2000.
- [3] A. PERRET, *Le silicium comme matériau dans la fabrication de pièces mécaniques*, *Bulletin SSC* 38, 2001.
- [4] S. JEANNERET, A. DOMMANN, N. F. DE ROOIJ, *Procédés de micro-fabrication avec application horlogère, développements récents*, *Actes de la Journée d'Etude SSC*, 2008.
- [5] W. H. WITTRICK, *The theory of Symmetrical Crossed Flexure Pivots*, *Australian Journal of Scientific Research, Series A : Physical Sciences*, vol. 1, p.121, June 1948.
- [6] Wikipedia, John Harrison Grasshopper Escapement, 2014.