SSC
Société Suisse de Chronométrie

Mechanical Nano

Christophe Zwahlen, Florian Corneille, Fabrice Deschanel
Greubel Forsey SA
Eplatures-Grise 16, CH – 2301 La Chaux-de-Fonds
www.greubelforsey.com

Décembre 2017
23
Bulletin SSC n° 84

Depuis toujours, l'Homme a voulu comprendre et s'approprier le temps. Il commença en observant les cycles du jour et de la nuit, le changement des saisons ou en s'aidant des astres. Par la suite, il a imaginé et réalisé des instruments pour mieux l'appréhender, le décompter et finalement « l'apprivoiser » par une évolution constante des technologies.

Introduction

L'importance de l'énergie dans les montres

À la genèse de l'horlogerie, ces instruments mécaniques étaient lourds et encombrants, souvent logés dans des monuments publics ou religieux. Cette macro-mécanique a connu une incroyable miniaturisation au fil des siècles pour devenir transportable (horloges de table, chronomètres de marine ou montres gousset) et finalement être portable au poignet avec les montres mécaniques d'aujourd'hui.

Les principaux jalons dans la réduction des « formats » sont :

- Horloge d'édifice dès le XIVe siècle
- Pendule (horloge d'intérieure) dès le XVe siècle
- Montre de poche dès le XVIe siècle
- Montre-bracelet dès le début du XXe siècle
- Nano-mécanique dès le début du XXIe siècle

À quoi ressembleront les garde-temps mécaniques de demain et quel est l'avenir de la miniaturisation de leurs mouvements ? Peut-on reconsidérer la relation entre l'espace défini (fini) et l'énergie disponible ?

Pour Robert Greubel et Stephen Forsey, explorer de nouveaux territoires en créant des mécanismes inédits constitue l'essence même de leur créativité et de leur travail, comme en témoignent le Double Tourbillon 30°, ou encore le Computeur Mécanique équipant le QP à Équation.

Avec l'aide de leur laboratoire EWT (Experimental Watch Technology), ils se sont investis très tôt dans ces questions en créant des concepts neufs. Ils apportent d'ores et déjà un début de réponse pour s'affranchir des principales contraintes connues de l'horlogerie mécanique : l'espace disponible et la consommation d'énergie.

Une nouvelle ère de l'ingénierie horlogère, prodigue en perspectives extraordinaires, a vu le jour avec la « Mechanical Nano ». Cette nouvelle approche est basée sur la consommation d'une énergie à l'échelle du nanojoule (nJ) dans le but de réaliser des mécanismes horlogers. Elle permettra :

- un gain d'énergie consommée considérable ;
- la multiplication des complications dans un même espace.

Problématique

La maîtrise de l'énergie nano

Afin de maîtriser et de réduire l'énergie à une échelle nanométrique, deux pistes ont été explorées :

- la diminution de l'inertie des composants ;
- la réduction des frottements.

Application pratique

Après d'intensives recherches sur l'inertie et les frottements, Greubel Forsey a déposé des brevets fondamentaux et décidé d'appliquer cette démarche à un cas d'étude pratique : le système horloger de seconde foudroyante.

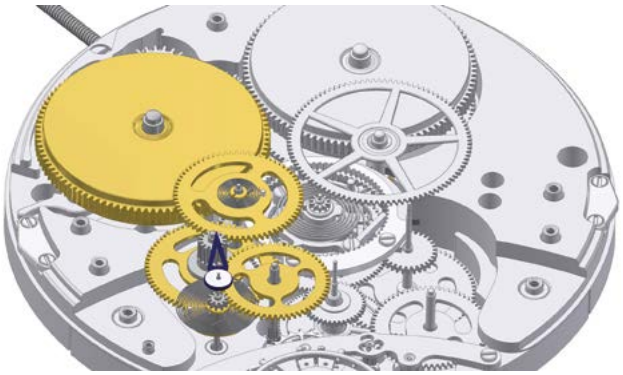

Fig. 1 : Système de foudroyante classique.

complètement l'approche constructive et a conduit à repenser entièrement les mécaniques horlogères.

Comme ce système consomme une nano-énergie, il est possible d'imaginer une construction où la foudroyante se branche directement sur la roue d'échappement.

Dans un premier temps, il a été décidé de minimiser l'influence de l'affichage dans ce un démonstrateur nommé P1. En effet, ce démonstrateur se focalise sur l'aspect énergétique et sur les gains qui en découlent.

Première exécution de la nano-foudroyante : le démonstrateur P1

L'approche par la nano-énergie conduit à repenser complètement le mécanisme de foudroyante.

Cette nouvelle construction consiste d'abord en un mobile à très faible moment d'inertie, qui prend son information sur la roue d'échappement. Grâce à ce principe, un train d'engrenage complet n'est plus nécessaire pour assurer la fonction de division de la seconde, puisque la prise de l'information est faite sur le mobile qui distribue et cadence l'énergie du mouvement.

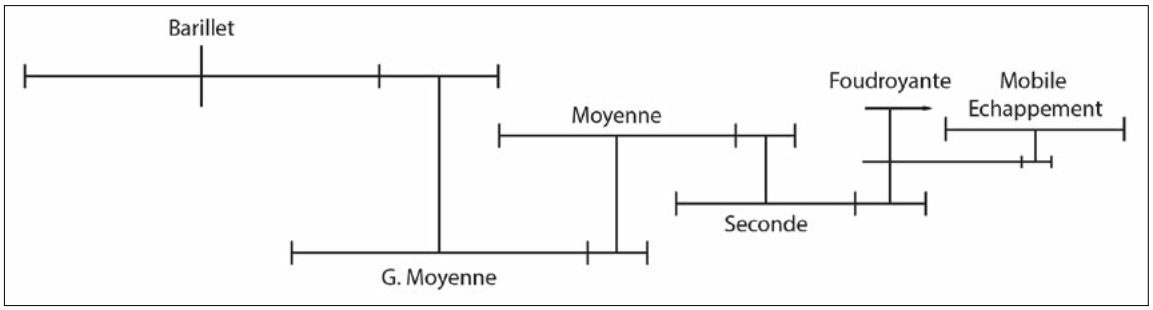

Fig. 2 : Cinématique d'un système de foudroyante classique.

Présentation du système de foudroyante classique

Afin de donner l'indication de foudroyante qui divise la seconde en fraction de seconde selon la fréquence du balancier, il est nécessaire d'intégrer, en parallèle du rouage de finissage, un deuxième train d'engrenage dédié au système de foudroyante. Ce dernier part du barillet et se synchronise au niveau de la roue d'échappement de manière intermittente afin de diviser la seconde en pas égaux, qui permettent ainsi une lecture affinée de la seconde.

Présentation du système de foudroyante novateur

L'objectif est de réduire le besoin en énergie en créant un nouveau système de foudroyante à très faible consommation d'énergie, n'excédant pas l'échelle des nanojoules. Les axes de recherche pour diminuer l'énergie consommée se concentrent sur deux pistes : la réduction des inerties et la diminution des frottements. Cette recherche révolutionne

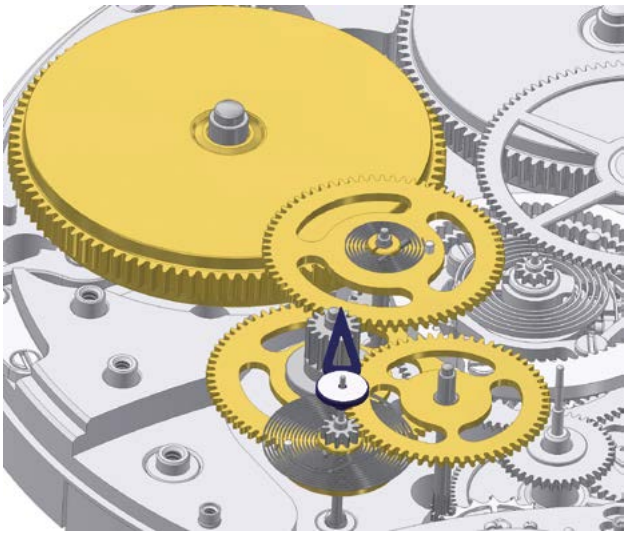

Fig. 3 : Système de foudroyante classique.

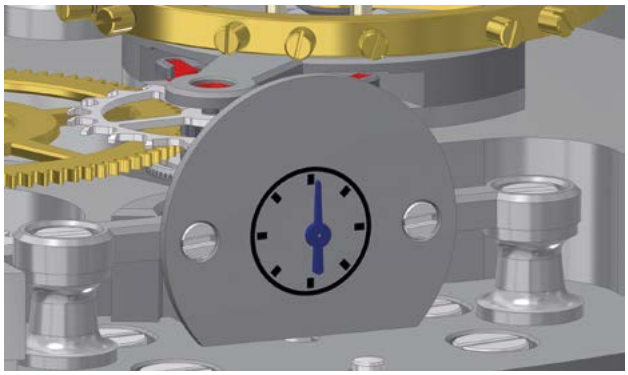

Fig. 4 : Démonstrateur P1 – Nano-foudroyante.

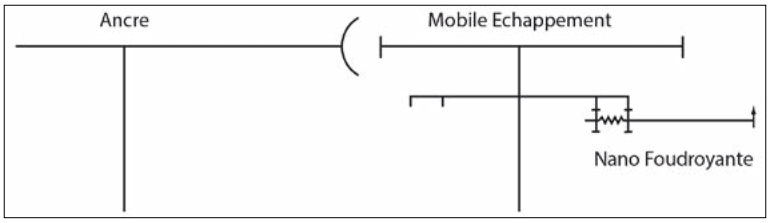

Fig. 5 : Cinématique du système de nano-foudroyante P1.

Calcul de la réduction des inerties : le démonstrateur P1

Initialement, le mobile de la roue d'échappement classique a un moment d'inertie de J_{r1} = 17.06 mg mm^2.

Avec les modifications et l'ajout de la roue à double denture conique, ce moment d'inertie passe à $Jr2$ = 17.09 mg mm^2.

Le moment d'inertie de l'ensemble (aiguille, pignon et axe) est de J_a = 8 µg mm^2. Diamètre de l'axe = 55 µm, longueur = 3.80 mm.

Le moment d'inertie perçu par la roue d'échappement est :

$$J_{r_total} = J_{r2} + r^2 \cdot J_a = 17.29 \text{ mg mm}^2$$

r = rapport d'engrenage entre la roue à double denture conique et le double pignon conique = 5.

La variation relative du moment d'inertie :

$$\frac{J_{r_total}}{J_{r1}} = 1.013$$

Le moment d'entraînement initial du mouvement était prévu avec un couple de 460 gmm. Connaissant la variation relative du moment d'inertie, et en utilisant une relation empirique développée par le laboratoire EWT et le Bureau Technique, la variation relative de couple au barillet est donnée par :

$$\Gamma = a \cdot \left(\frac{J_{r_total}}{J_{r1}} - 1 \right) + c = 1.0014$$

Où $a = 0.1025$ et $c = 1$ (ces valeurs sont expérimentales).

Pour entretenir une amplitude identique, le couple de barillet devrait passer à :

$$M_{barillet_2} = M_{barillet_1} \cdot \Gamma = 460.6 \, gmm$$

En conservant le couple de 460 gmm, le balancier va subir une perte d'amplitude. La puissance fournie par le barillet au balancier est proportionnelle à :

$$M_{barillet} \propto \frac{J_b \, \theta_0^{\,2} \, \omega^3}{2Q}$$

J_b = inertie du balancier, θ_0 = amplitude, ω = pulsation = $2\pi f$, f = fréquence, Q = facteur de qualité.

Dérivation par l'amplitude :

$$dM_{barillet} \propto 2 \frac{J_b \, \theta_0 \, \omega^3}{2Q} \, d\theta_0$$

En divisant par $M_{barillet}$: $\frac{dM_{barillet}}{M_{barillet}} = 2 \frac{d\theta_0}{\theta_0}$

Donc finalement, à $\theta_0 = 300°$, la diminution d'amplitude est donnée par :

$$\Delta\theta_0 = \frac{\theta_0}{2} \frac{\Delta M_{barillet}}{M_{barillet}} = 0.57°$$

Le passage d'une dent de l'engrenage conique doit ensuite être examiné. Pour éviter le chevrotement de l'aiguille, le ressort du double pignon conique est armé d'une dent. Les simulations montrent que le couple consommé sur la roue d'échappement est de 70 nNm.

Donc l'amplitude du balancier va diminuer de :

$$\Delta\theta_0 = \frac{\theta_0}{2} \frac{\Delta M_{barillet}}{M_{barillet}} = \frac{300°}{2} \frac{70 \, nNm}{1.9 \, \mu Nm} = 5.5°$$

Au total, l'amplitude du balancier devrait baisser de 6°. La nano-foudroyante consomme 16 nJ par saut. À titre de comparaison, un système de foudroyante classique consomme 30 microjoules (µJ) par saut.

Résultats pratiques : le démonstrateur P1 – Loupe

Dans ce premier démonstrateur, l'affichage de l'indication nano-foudroyante est assuré par une aiguille de 1.4 mm de longueur. Sa lecture est facilitée par un système optique avec un grossissement de 23 fois.

Les résultats pratiques confirment les calculs. Sur la base de ce premier démonstrateur, il apparaît que d'autres leviers d'action permettent de continuer l'optimisation des gains énergétiques.

Fig. 6 : Démonstrateur P1 – Loupe.

Fig. 7 : Démonstrateur P1.

Deuxième exécution de la nano-foudroyante : le démonstrateur P2

Après la validation des travaux sur la réduction des inerties dans la construction du premier démonstrateur P1, il a fallu aborder la réduction des frottements en réalisant un deuxième démonstrateur P2 fonctionnel doté d'un système nano-foudroyante, dont l'affichage est de taille standard.

Dans le second démonstrateur P2, tous les paramètres ont été optimisés pour compenser l'inertie plus grande de l'aiguille et du mobile d'échappement. Ceci concerne notamment l'utilisation du brevet GF Palier Diamant (US 2011/0044141 A1), (le démonstrateur P1 ayant des paliers traditionnels).

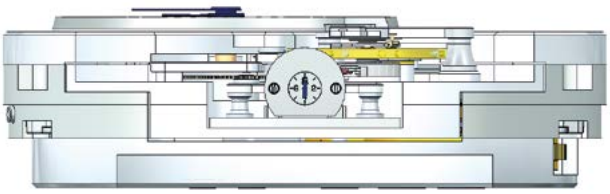

Fig. 8 : Démonstrateur P1.

Fig. 9 : Démonstrateur P2.

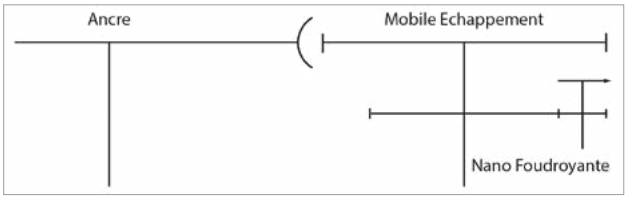

Fig. 10 : Cinématique du système nano-foudroyante P2.

Les paliers en diamant ont un coefficient de frottement de 0.03 au lieu de 0.1 pour un palier acier-rubis. Ils permettent de s'affranchir de la lubrification, et de ce fait d'éliminer le couple de frottement lié à la viscosité.

Calcul de la réduction des inerties : le démonstrateur P2

Le mobile d'échappement a un moment d'inertie de $J_{r3} = 5.53\,\text{mg mm}^2$.

Le moment d'inertie de l'aiguille avec son pignon est de $J_a = 292\,\mu\text{g mm}^2$. Avec un rapport d'engrenage $r = 60/9$, le moment d'inertie perçu par la roue d'échappement est :

$$J_{r_total} = J_{r3} + r^2 \cdot J_a = 18.5\ \text{mg mm}^2$$

La variation relative d'inertie est :

$$\frac{J_{r_total}}{J_{r1}} = 1.085$$

Le couple initial du barillet est de 460 g mm. Pour conserver la même amplitude avec le système de foudroyante, la relation empirique donne la variation de couple relatif :

$$\Gamma = a \cdot \left(\frac{J_{r_total}}{J_{r1}} - 1 \right) + c = 1.087$$

Ainsi, le couple du barillet devrait passer à 464 g mm. En restant avec un couple de 460 g mm, l'amplitude du balancier va diminuer de 1.2° (ce qui n'influence pas la chronométrie du mouvement). Cette perte d'amplitude correspond à une consommation de 5 nJ par saut. Ceci confirme l'optimisation du mécanisme, qui compense largement l'inertie de l'affichage.

Pour ce démonstrateur P2, l'engrenage entre le pignon et la roue n'a pas d'élément ressort pour éviter le chevrotement de l'aiguille. En éliminant la tension entre le pignon et la roue, le démonstrateur P2 va consommer moins d'énergie. Le gain entre les deux démonstrateurs est de 3.5 fois.

Conclusion – Bénéfices

Rappel des Gains

Une foudroyante classique consomme environ 30 µJ par saut, le premier démonstrateur P1 consomme 16 nJ par saut, soit environ 1'800 fois moins. Le second démonstrateur P2 consomme, quant à lui, 5 nJ par saut, soit 6'000 fois moins. Le volume occupé par ce mécanisme nano est 25 fois moins important qu'un mécanisme traditionnel.

L'ensemble de ces recherches a permis de réaliser un nouveau mécanisme de foudroyante qui exploite au mieux la consommation énergétique et l'espace à disposition dans le mouvement d'un garde-temps mécanique. Cette nouvelle architecture des fonctions ne perturbe en aucune manière le bon fonctionnement et la chronométrie de base.

Ce premier déploiement est une confirmation du concept et démontre que le potentiel de développement est inestimable. Nous nous tenons à l'orée de cette nouvelle ère, celle de la « Mechanical Nano ».■

Références

[1] Vermot Michel, Bovay Philippe, Prongué Damien, Dordor Sébastien, Beux Vincent, *Traité de construction horlogère*, PPUR (Presses Polytechniques et Universitaires Romandes), 2011.

[2] Reymondin Charles-André, *Théorie d'horlogerie*, Éditions de la Fédération des écoles techniques, 1998.

[3] Lecoultre François, *Les Montres Compliquées*, A. Simonin, 2004.

[4] Greubel Robert et Forsey Stephen Edward Methuen, 2011. *Pivot organ.* Demande US20110044141 (A1). 24 février 2011.

Publicité