

En d'autres termes, le système solaire décrit par la loi d'attraction de Hooke est isochrone: si la loi de la gravitation était du type de celle de Hooke, la durée de l'année serait identique pour toutes les planètes de même masse, quelles que soient leurs orbites.

Cette dernière propriété est le point de départ de notre invention d'une nouvelle base de temps pour remplacer le pendule et les oscillateurs classiques. Les trajectoires isochrones découvertes par Newton sont exactement ce que cherche l'horloger. Ces mouvements sont en outre continus et unidirectionnels, puisque les planètes ne s'arrêtent jamais et ne changent pas de sens, contrairement au pendule et au balancier-spiral qui rebroussent chemin deux fois par cycle.

Afin d'élaborer un mécanisme réalisant les hypothèses requises par les orbites

Les mouvements orbitaux décrits par Newton sont isochrones, mais aussi unidirectionnels et continus

isochrones de Newton, nous avons établi le cahier des charges suivant:

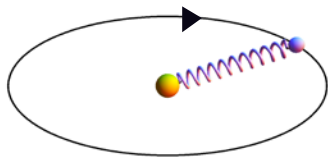
- 1) La «planète», c'est-à-dire le corps de l'oscillateur, subit une force de rappel variant linéairement avec la distance.
- 2) Cette force est centrale, c'est-à-dire orientée vers un point fixe unique.
- 3) Cette force est isotrope (intensité indépendante de la direction).
- 4) Le corps de l'oscillateur se comporte comme une masse ponctuelle située en son centre de masse.
- 5) Le dispositif devra pouvoir être rendu aussi insensible à la pesanteur que possible.

Les points (1) et (2) décrivent un ressort dont la force de rappel est toujours dirigée vers le centre d'attraction (nommé soleil): c'est un «ressort central». Nous l'avons réalisé en adoptant la solution d'une table à deux degrés de liberté en translation. Elle est constituée d'un chariot primaire

UN OSCILLATEUR CONÇU POUR ÉCHAPPER À L'ÉCHAPPEMENT

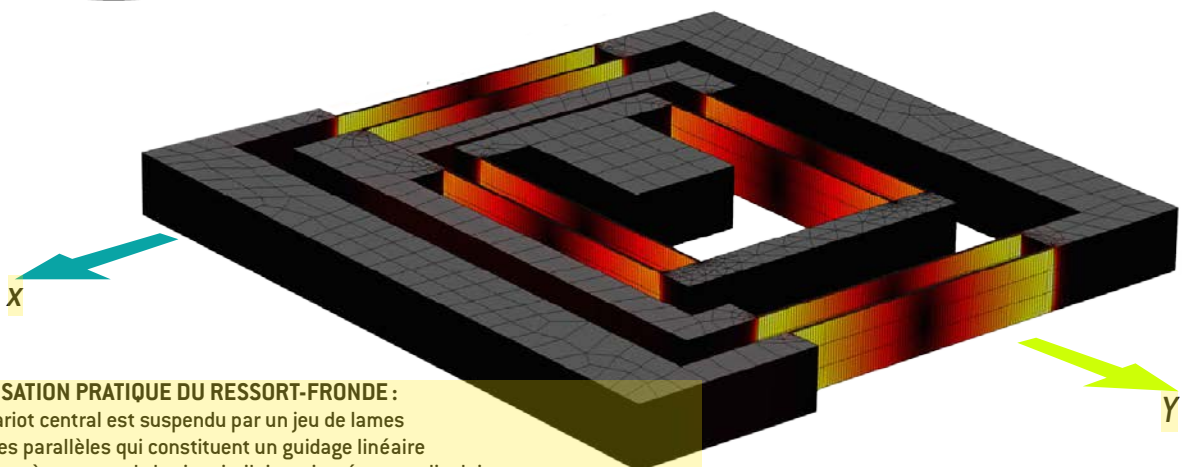
Alors que la réalisation, même précise, d'un échappement – un casse-tête technique pour les ingénieurs – produit un mouvement isochrone saccadé, l'oscillateur *IsoSpring*, de conception moins complexe, produit un mouvement isochrone continu. Ce dernier est en outre bien plus facile à entretenir car il est moins sujet aux frottements. Son principe

fait passer des bases de temps classiques, dotées d'un seul degré de liberté (comme une masselotte oscillant linéairement au bout d'un ressort) à des bases de temps à deux degrés de liberté, à la façon d'une masselotte qui glisserait sur le plan au bout d'un ressort dont l'autre extrémité est fixée en un point et qui décrirait ainsi une ellipse centrée sur ce point.



PRINCIPE DU RESSORT-FRONDE :

une masselotte est reliée par un ressort de rappel attaché à un point fixe [centre de force]. Une fois lancée, la masselotte décrit une ellipse centrée sur ce point.



RÉALISATION PRATIQUE DU RESSORT-FRONDE :

un chariot central est suspendu par un jeu de lames flexibles parallèles qui constituent un guidage linéaire élastique à un second chariot similaire orienté perpendiculairement. Comme la masselotte du ressort-fronde, le chariot central est libre de se déplacer dans le plan. Il subit une force de rappel toujours dirigée vers le centre de force et proportionnelle à son écartement. Une fois lancé, le chariot central décrit alors une ellipse avec une période indépendante de la forme de l'ellipse.



© Alain Harzon, en haut : Simon Henein

imbriqué dans un chariot secondaire, les deux soutenus par des systèmes de lames. Un déplacement Δx du chariot primaire dans la direction X se traduit par une force de rappel proportionnelle à Δx et entraîne aussi le chariot secondaire; de même, le déplacement Δy du chariot secondaire dans la direction Y perpendiculaire à X se traduit par une force de rappel proportionnelle à Δy (voir l'encadré page précédente). Ces lames sont dimensionnées de telle sorte que le chariot secondaire est rappelé avec la même force par unité de longueur (la même constante de ressort) dans la direction X et dans la direction Y , de sorte qu'il parcourt les ellipses attendues.

Le système ainsi construit est linéaire et isotrope : il respecte les conditions du cahier des charges et constitue une matérialisation du système solaire isochrone imaginé par Newton suffisamment fidèle pour constituer une base de temps horlogère. Le concept d'isotropie est à l'origine du nom *IsoSpring* que nous avons donné à cet oscillateur, par contraction des mots anglais *isotropic* (« isotrope ») et *spring* (« ressort »).

Le mouvement des chariots est une pure translation, donc ils ne changent pas d'orientation durant leur déplacement : le système se comporte comme si la « planète » (la masse mobile centrale, c'est-à-dire le chariot primaire) était une masse ponctuelle. Les lames sont en outre naturellement très rigides dans

LA BASE DE TEMPS *IsoSpring* a été mise à profit pour réaliser le prototype d'un mouvement d'horloge énergétiquement beaucoup plus efficace qu'un mouvement d'horloge à échappement. Il reste à le miniaturiser pour le faire entrer dans le boîtier d'une montre-bracelet.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Rubbert et al., **Isotropic springs based on parallel flexure stages**, *Precision Engineering*, vol. 43, pp. 132-145, 2016.

S. Henein et al., ***IsoSpring : vers la montre sans échappement***, actes de la Journée d'étude de la SSC (Société suisse de chronométrie), pp. 49-58, 2014.

C.-P. Sesin, **Mesure du temps**, *Dossier Pour la Science* n° 37 [« La science au Moyen Âge »], pp. 114-115, octobre-janvier 2003.

L. Defossez, **Les savants du XVII^e siècle et la mesure du temps**, éditions du Journal Suisse d'Horlogerie et de Bijouterie, 1946.

la direction verticale, de sorte qu'elles contraignent le mouvement à rester dans le plan d'oscillation. Ainsi, lorsque le mécanisme est placé horizontalement, la gravité reste toujours perpendiculaire au mouvement et n'affecte donc pas la dynamique du système.

Par ailleurs, le mouvement de l'oscillateur est entretenu par une manivelle télescopique reliée au ressort de barillet, c'est-à-dire au ressort moteur du mécanisme d'horlogerie. Ce dispositif remplace l'échappement en restituant de manière continue à l'oscillateur l'énergie qu'il perd par frottement. La consommation énergétique du mouvement est considérablement réduite pour deux raisons. D'une part, l'utilisation de ressorts à lames, qui évite l'emploi d'axes susceptibles de frotter, augmente le facteur de qualité d'un ordre de grandeur (c'est-à-dire le multiplie par 10). D'autre part, le remplacement de l'échappement par une simple manivelle télescopique (voir l'encadré page précédente) se traduit par un rendement de cet étage de transmission de l'ordre de 80 % à 95 %, à comparer aux 35 % des échappements classiques...

Un mécanisme horloger continu et silencieux

En 2015, notre équipe a construit un prototype d'horloge fonctionnelle dotée d'un oscillateur *IsoSpring* à deux chariots oscillants dont la performance chronométrique et le rendement sont prometteurs (voir la figure à gauche ci-dessus). Sur le plan conceptuel, le projet *IsoSpring* se résume à passer des oscillateurs horlogers classiques, tous à un degré de liberté (l'oscillation porte sur une seule variable angulaire), à des oscillateurs à deux degrés de liberté (l'oscillation porte sur deux variables indépendantes). Ceux-ci produisent des trajectoires cycliques, unidirectionnelles et continues, et rendent ainsi l'échappement caduc.

Nous poursuivons le projet en testant diverses architectures. Nous avons par exemple construit un prototype d'horloge dont l'oscillateur est une sphère, dont le mouvement promet d'être moins sensible à la gravité. Tout cela présage un saut quantitatif de la réserve de marche et de la précision chronométrique des horloges, grâce à l'univers isochrone de Newton qui nous a inspiré un microcosme horloger continu et silencieux. ■