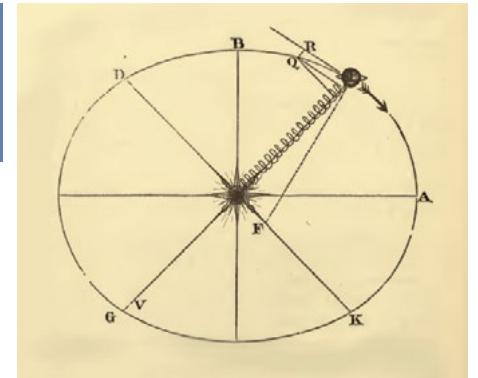


Horloge neuchâteloise du XXI^e siècle équipée de

l'oscillateur IsoSpring®



Le premier prototype de l'horloge neuchâteloise du XXI^e siècle imaginé et réalisé à Neuchâtel par les chercheurs de l'EPFL est une horloge mécanique traditionnelle où le pendule est remplacé par un oscillateur d'un genre nouveau baptisé *IsoSpring*: «ressort isotrope». Grâce à cette nouvelle base de temps fondamentalement différente de tous les oscillateurs utilisés en horlogerie, le temps redevient silencieux et continu: cet oscillateur fonctionne sans échappement et donc sans le fameux «tic-tac». Il peut en outre être réalisé avec des guidages flexibles éliminant les pertes par frottement des paliers. Cette invention laisse envisager des garde-temps mécaniques plus simples à réaliser et dotés de performances inégalées en termes de réserve de marche et de précision chronométrique.



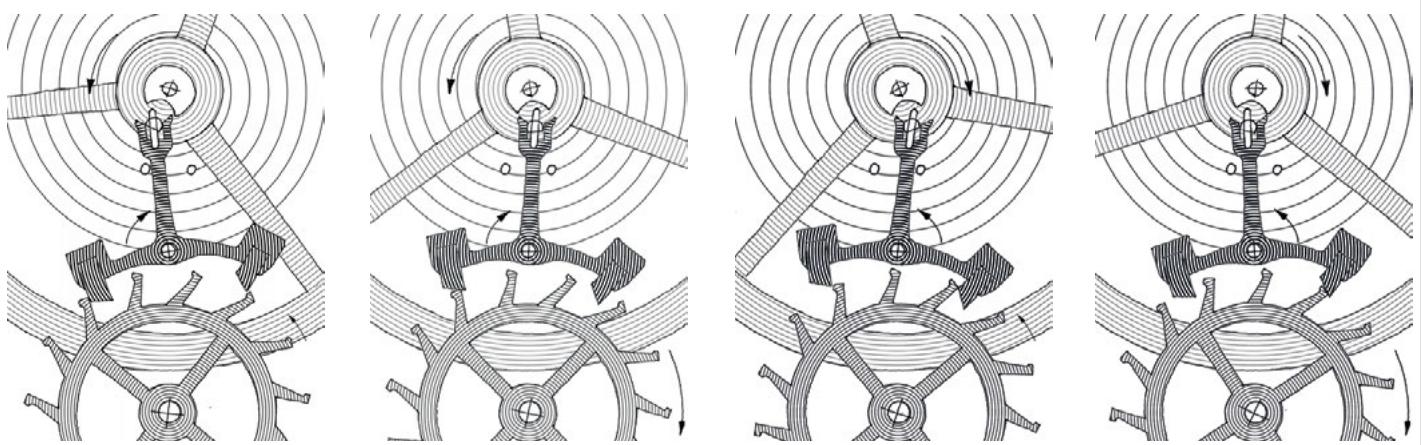
Le mécanisme *IsoSpring* est un microcosme continu et silencieux de l'univers dont il s'inspire (figure tirée de *Principia Mathematica* d'Isaac Newton, 1687, retouchée par les auteurs).

Neuchâtel, creuset de la recherche horlogère

En 1919, Adrien Jacquierod, recteur de l'Université de Neuchâtel, lance un appel à la Suisse pour qu'elle organise sa recherche horlogère, face à la concurrence étrangère. En 1939, le Laboratoire Suisse de Recherche Horlogère (LSRH) est fondé à Neuchâtel et en juillet 1967, la première montre à quartz y est inventée. Dans les années 80, les grands acteurs de la recherche horlogère que sont le CSEM (Centre suisse d'électronique et de microtechnique), l'ASRH (Association suisse pour la recherche horlogère) et la FSRM (Fondation suisse pour la recherche en microtechnique) sont fondés à Neuchâtel. En 2014, une antenne de l'EPFL s'établit dans le bâtiment Microcity mis à disposition par le canton de Neuchâtel. C'est en son sein que les chercheurs du laboratoire de conception micromécanique et horlogère (Instant-Lab) ont inventé, conçu et réalisé l'horloge équipée de l'oscillateur *IsoSpring*.



Exemples de pendules neuchâteloises du début du XX^e siècle (tiré de *Histoire de la pendulerie neuchâteloise*, A. Chapuis, 1917).



Inventé en 1769 par Thomas Mudge, l'échappement à ancre est utilisé dans la majorité des montres mécaniques. Il arrête complètement le train d'engrenage de la montre, de manière intermittente: les rouages sont immobiles 90 % du temps! Huit fois par seconde, le balancier libère le mouvement, reçoit une impulsion, et l'arrête à nouveau. C'est ainsi que le mouvement s'effectue par à-coups, source du caractéristique «tic-tac». Les pertes d'énergie associées font que le rendement mécanique des échappements d'aujourd'hui ne dépasse pas 35 %.

Le temps discret

La mesure du temps a son origine dans les cycles naturels: les 24 heures d'une journée correspondent au mouvement apparent du Soleil autour de la Terre, la durée des mois a son origine dans le cycle lunaire, et celle de l'année dans le retour des saisons. Pour s'affranchir de la dépendance de ces phénomènes dont l'observation requiert une météo clément, des garde-temps sont inventés dès l'Antiquité, tels que le sablier ou l'horloge à eau.

Le Moyen-Âge voit naître les premières horloges mécaniques grâce à l'invention de l'échappement, le mécanisme produisant le fameux «tic-tac» des horloges et montres mécaniques. Ce bruit de chocs répétés est la manifestation sonore de la discréttisation du temps par l'échappement. Ce mécanisme arrête le mouvement de l'horloge pour ne laisser le temps s'écouler que par à-coups. Il a été raffiné au fil des siècles par les artisans jusqu'à atteindre une précision chronométrique acceptable pour la vie de tous les jours. Son efficacité énergétique est toutefois restée faible en raison de son fonctionnement intermittent. Les premières montres sont créées au début de la Renaissance et leur mécanisme suit le même principe que celui des horloges.

Le temps scientifique

Une grande révolution horlogère est l'introduction de l'oscillateur comme base de temps par Christiaan Huygens en 1656. Il a appliqué le principe d'isochronisme formulé par Galilée en 1609: les oscillations du pendule ont une période pratiquement indépendante de leur amplitude. Le pendule optimisé par Huygens a un rythme propre et la précision de l'horloge devient indépendante des inévitables fluctuations de la force motrice. Huygens a également découvert le principe de l'oscillateur harmonique, où une force de rappel proportionnelle au déplacement (le pendule, sous l'effet de la gravité, veut toujours retourner à son point mort) mène à un mouvement isochrone. Robert Hooke a découvert qu'une force de rappel proportionnelle au déplacement apparaît lors de la déformation élastique de la matière. Ainsi, des lames flexibles peuvent faire office de base de temps portative. Ceci mène Huygens et Hooke, vers 1675, à la découverte du spiral: lame élastique très longue enroulée sur elle-même, qui régule toutes les montres mécaniques depuis lors.

L'utilisation d'oscillateurs véritablement isochrones améliore la précision chronométrique de deux ordres de grandeur: elle passe de 15 minutes par jour

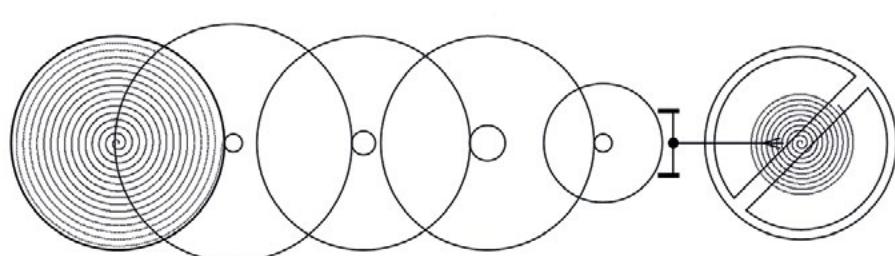
$(15/(24 \times 60) = 1\%)$ à 10 secondes par jour
 $(10/(24 \times 60 \times 60) = 0,01\%)$.

Il s'agit d'une réelle conquête du temps, puisque les garde-temps deviennent plus précis que le Soleil qui produit des jours dont la durée varie de plus ou moins 30 secondes selon les périodes de l'année. Il en résulte une révolution sociale, puisque le temps n'est plus dépendant des phénomènes naturels, mais basé sur une référence artificielle: l'horloge. L'établissement d'une théorie du temps n'a été possible qu'après que l'équation du mouvement de l'oscillateur, ainsi que les mathématiques requises pour la résoudre ont été maîtrisées. C'est par ce cheminement que l'horlogerie est devenue une science.

Le temps technologique

Le mouvement de va-et-vient des oscillateurs du XVII^e siècle nécessite des échappements performants et fiables, les échappements à détente et à ancre furent inventés et perfectionnés au XVIII^e siècle par les horlogers anglais John Arnold, Thomas Earnshaw et Thomas Mudge, ainsi que par les horlogers d'origine neuchâteloise Ferdinand Berthoud et Abraham-Louis Breguet. Leurs avancées sont telles que la montre mécanique d'aujourd'hui est restée conceptuellement similaire à celle de 1800.

Les horloges et montres mécaniques fonctionnent grâce à un réservoir d'énergie constitué d'un ressort armé, ou d'une masse suspendue, dont l'écoulement est freiné par un échappement, qui lui-même, voit sa cadence contrôlée par une base de temps. Jusqu'au XVII^e siècle la base de temps est un foliot: un balancier qui, par le biais du train d'engrenage et de l'échappement, est accéléré de manière alternée par la force du ressort ou du poids. La vitesse des aiguilles de ces horloges dépend directement de la force motrice. Huygens remplace le foliot par des bases de temps



beaucoup plus précises: le pendule dans l'horloge et le balancier-spiral dans la montre. Toutes les horloges et montres mécaniques

dépendent de l'échappement qui entretient les oscillations de la base de temps et compte ses oscillations pour afficher l'heure.

Echapper à l'échappement

Si la montre mécanique actuelle est conceptuellement identique à celle de 1800, l'effet cumulatif d'avancées incrémentales est tel que la montre est devenue beaucoup plus précise et fiable. C'est un objet de détail: il y a 86'400 secondes par jour, donc pour atteindre une précision d'une seconde par jour, la précision d'une montre doit être de l'ordre de 0,001 %!

A la recherche du temps continu

L'approche choisie par Instant-Lab a été de remettre en question la nécessité de l'échappement et de la discrétisation du temps intrinsèque à toutes les montres mécaniques existantes.

Ses chercheurs sont remontés au XVI^e siècle: l'une des plus grandes révolutions scientifiques est la publication en 1687 par Isaac Newton de *Principia Mathematica*, où il démontre que des principes très simples expliquent la mécanique céleste. L'un de ses résultats les plus importants est la preuve des lois de Kepler du mouvement planétaire: la première loi exprime que les planètes suivent une orbite elliptique autour du Soleil.

Newton a démontré que l'ellipse est une conséquence de la loi d'attraction gravitationnelle, selon laquelle la force d'attraction diminue de manière

inversement proportionnelle au carré de la distance au Soleil. Mais Newton, n'étant pas sûr de cette loi, effectue une recherche pour trouver l'ensemble des lois produisant des ellipses. Il a prouvé que la loi de Hooke, où la force d'attraction est proportionnelle à la distance de la planète au Soleil, produit, elle aussi, des orbites elliptiques.

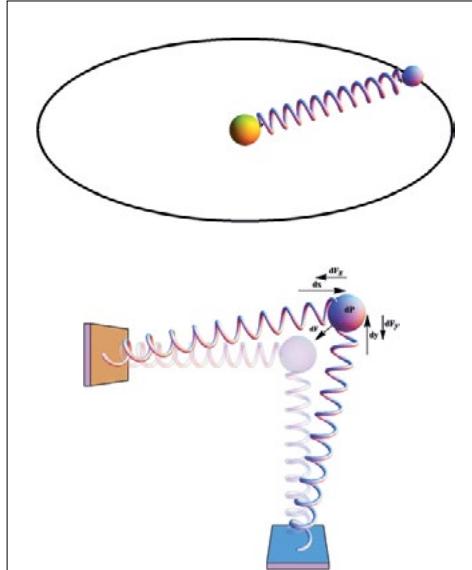
Ces deux lois d'attraction ont toutefois des implications différentes: la loi de gravité prédit que plus les planètes sont éloignées du Soleil, plus leur année est longue (troisième loi de Kepler); tandis qu'avec la loi de Hooke, l'année a la même durée pour toutes les planètes, quelles que soient leurs orbites.

Cette dernière propriété est le point de départ de l'invention d'*IsoSpring*: l'égalité des années pour toute orbite correspond exactement à la définition de l'isochronisme. Newton a décrit un système solaire isochrone, c'est exactement ce que cherche l'horloger! Il se trouve que dans le système solaire isochrone de Newton, le mouvement orbital est unidirectionnel: les planètes ne changent pas de sens! Riches de cette observation, les inventeurs font disparaître le mouvement de va-et-vient des bases de temps horlogères classiques que sont le pendule et le balancier-spiral. Ce mouvement unidirectionnel permet de s'affranchir de l'échappement: l'entretien se fait par la rotation continue d'une manivelle de propulsion.

Cor. 1. La force est donc comme la distance du corps au centre de l'ellipsoïde; & réciproquement, si la force est comme la distance, le corps décrira ou une ellipse dont le centre sera le même que le centre des forces, ou le cercle dans lequel l'ellipsoïde peut se changer.

Cor. 2. Les temps périodiques des révolutions qui se font autour du même centre sont égaux dans toutes les ellipsoïdes; car ces temps sont égaux dans les ellipsoïdes semblables (par les Cor. 3. & 8. de la Prop. 4.); mais dans les ellipsoïdes qui ont le grand axe commun, ils sont les uns aux autres directement comme les aires elliptiques totales, & inversement comme les parties de ces aires décrées en temps égal, c'est-à-dire directement comme les petits axes, & inversement comme les vitesses des corps dans les sommets principaux, ou directement comme les petits axes, & inversement comme les ordonnées au même point de l'axe commun. Mais ces deux raisons directes & inverses qui composent la raison des temps sont alors égales; donc les temps sont égaux.

Corollaires à la Proposition X, Livre I, de *Principia Mathematica*, Isaac Newton (1687).

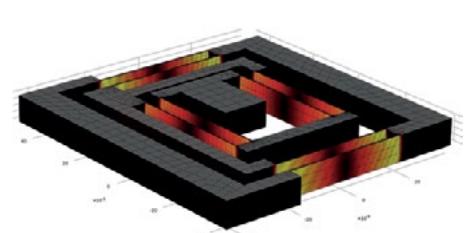
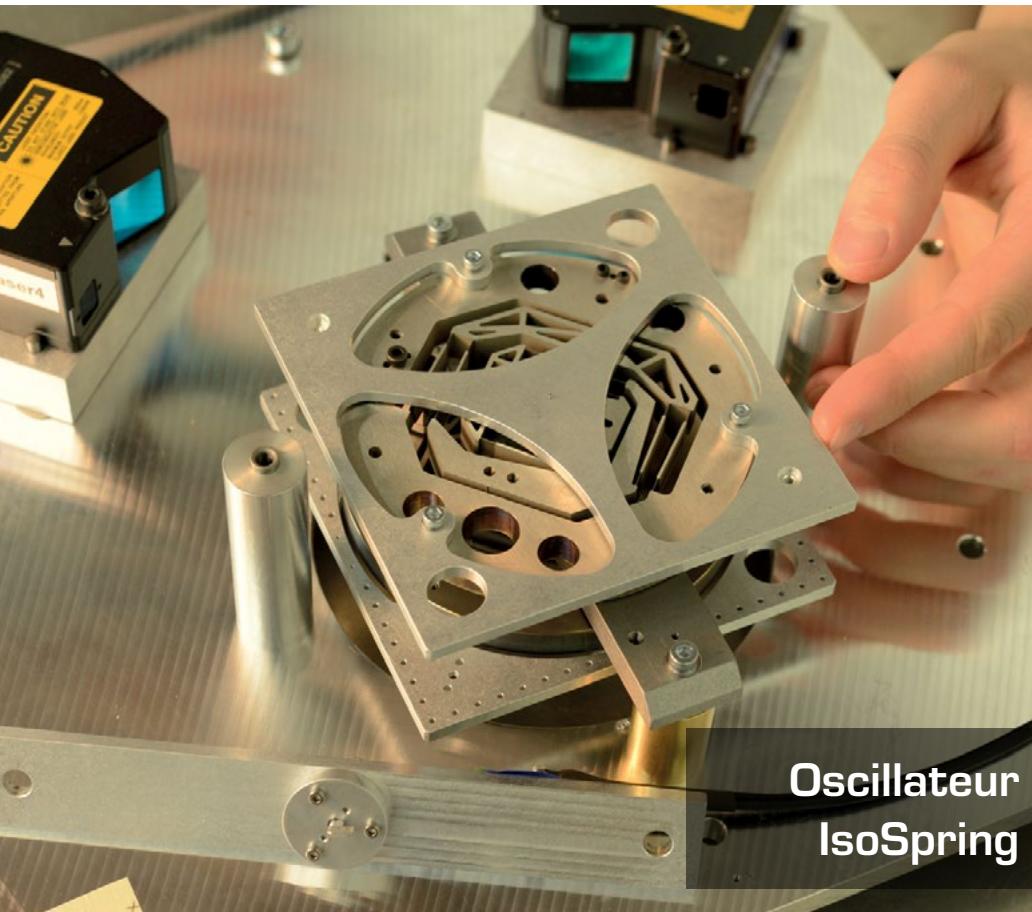


Concept ressort fronde tournant et concept ressorts orthogonaux matérialisant le système solaire isochrone de Newton.

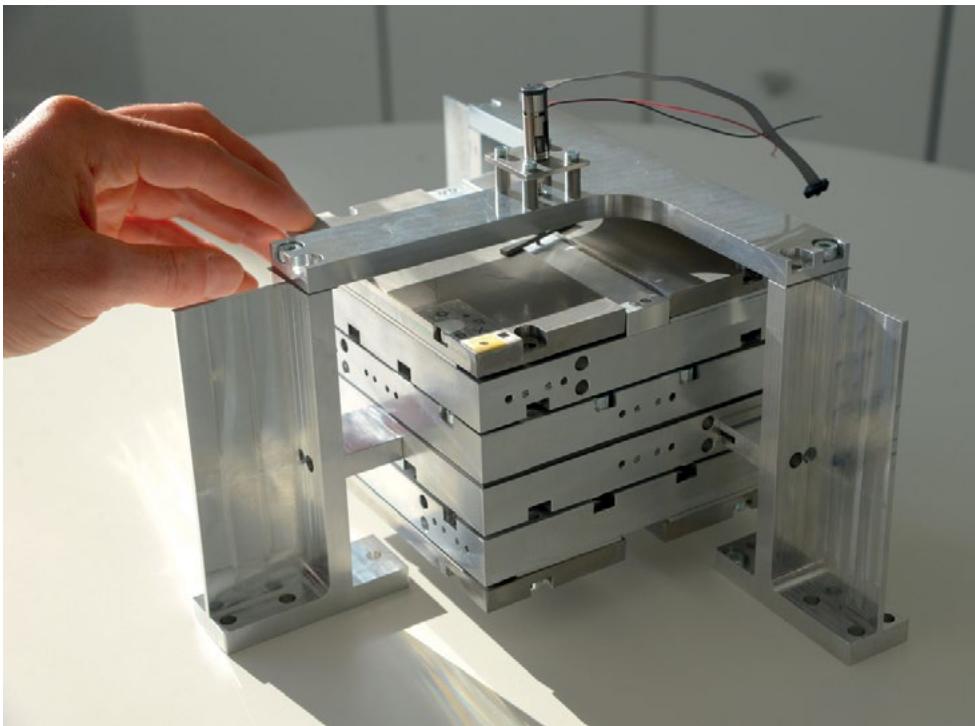
Cahier des charges du mécanisme matérialisant le système solaire isochrone imaginé par Newton:

IsoSpring

- Centre de force unique
- Force de rappel linéaire
- Force de rappel isotrope
- Masse ponctuelle
- Insensibilité à la gravité



Ressort IsoSpring à guidages flexibles utilisés dans l'horloge.



Premier démonstrateur de l'oscillateur *IsoSpring* présenté publiquement par Instant-Lab le 6 février 2014.

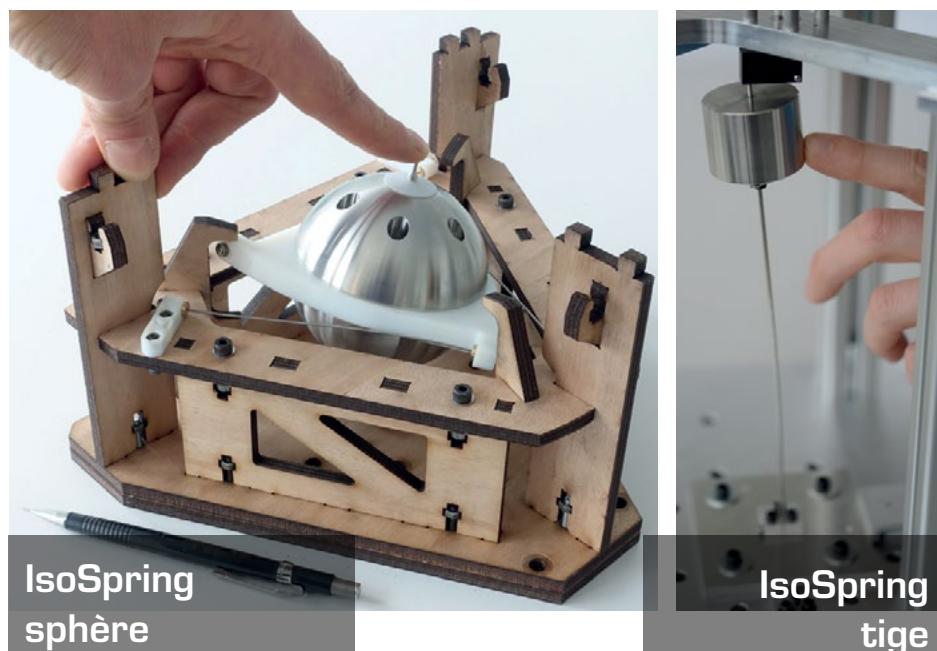
Un nouveau degré de liberté

La loi d'attraction linéaire peut être implémentée par un simple ressort. La force d'attraction du système solaire de Newton est donc réalisée à l'aide d'un ressort central où la force de rappel est toujours orientée vers le Soleil.

Le ressort doit être isotrope, ce qui veut dire que la loi d'attraction centrale doit être identique dans toutes les directions, d'où le nom d'*IsoSpring*.

Le recours aux guidages flexibles permet de réaliser, en une seule pièce, le ressort central isotrope et la suspension nécessaire au support de la masse mobile. Diverses architectures ont été élaborées, dont le ressort à guidages flexibles orthogonaux utilisé dans l'horloge.

Le concept *IsoSpring* nous fait passer des bases de temps traditionnelles dotées d'un seul degré-de-liberté et donc d'un mouvement alterné, à des bases de temps dotées de deux degrés-de-liberté aux trajectoires unidirectionnelles. Grâce au concept des coordonnées généralisées introduit par Lagrange, il est possible de faire abstraction de la situation exacte décrite par Newton. La porte s'ouvre alors sur un vaste champ d'oscillateurs fondamentalement nouveaux qui restent à imaginer et concevoir.



Contact

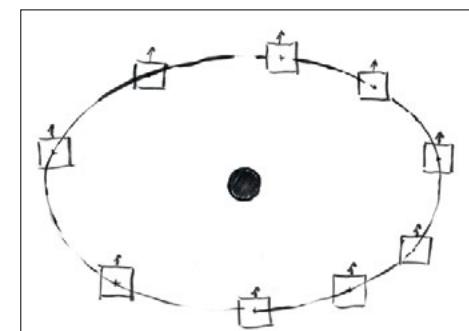
Laboratoire de conception micromécanique et horlogère

EPFL STI IMT INSTANT-LAB, Microcity,
Rue de la Maladière 71b, 2000 Neuchâtel

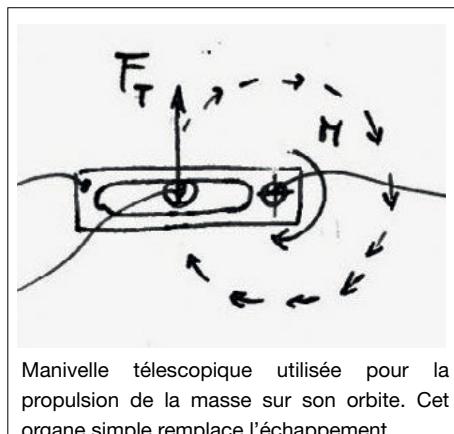
L'équipe dirigée par le Prof. S. Henein qui a conçu et réalisé ce prototype est la suivante: R. Bitterli, A. Crottini, N. Ferrier, R. Gillet, S. Henein, M. Kahrobaiyan, A. Maurel, B. Nussbaumer, L. Rubbert, E. Thalmann et I. Vardi.

Références

- [1] S. Henein, I. Vardi, L. Rubbert, R. Bitterli, N. Ferrier, S. Fifanski, D. Lengacher, «IsoSpring: vers la montre sans échappement», *Actes de la Journée d'Etude de la SSC 2014*, 49-58.
- [2] S. Henein, I. Vardi et L. Rubbert, *XY isotropic harmonic oscillator and associated time base without escapement or with simplified escapement*, brevet européen EP2894521, 16 juillet 2015.
- [3] S. Henein, I. Vardi et L. Rubbert, *General 2 degree of freedom isotropic harmonic oscillator and associated time base without escapement or with simplified escapement*, brevet européen EP2894521, 16 juillet 2015.
- [4] L. Rubbert, R. Bitterli, N. Ferrier, S. Fifanski, I. Vardi et S. Henein, «Isotropic springs based on parallel flexure stages», *Precision Engineering*, vol. 43 (2016), 132-145.



Pour que la planète se comporte comme une masse ponctuelle, il faut qu'elle se déplace en translation, sans tourner sur elle-même, telle une planète où les durées du jour et de l'année seraient identiques! Contrairement aux ressorts frondes, le ressort *IsoSpring* est doté de cette propriété remarquable.



Manivelle télescopique utilisée pour la propulsion de la masse sur son orbite. Cet organe simple remplace l'échappement.

Graphisme: B. Tora

Crédits photo: S. Henein

Date de publication: 08.12.2016