

Une horlogerie mécanique sans tic-tac

Simon Henein et Ilan Vardi

Le mécanisme à échappement des montres mécaniques, utilisé depuis la Renaissance, devient-il obsolète ?

Un nouveau principe d'oscillateur promet des mouvements horlogers plus efficaces. Et plus silencieux...

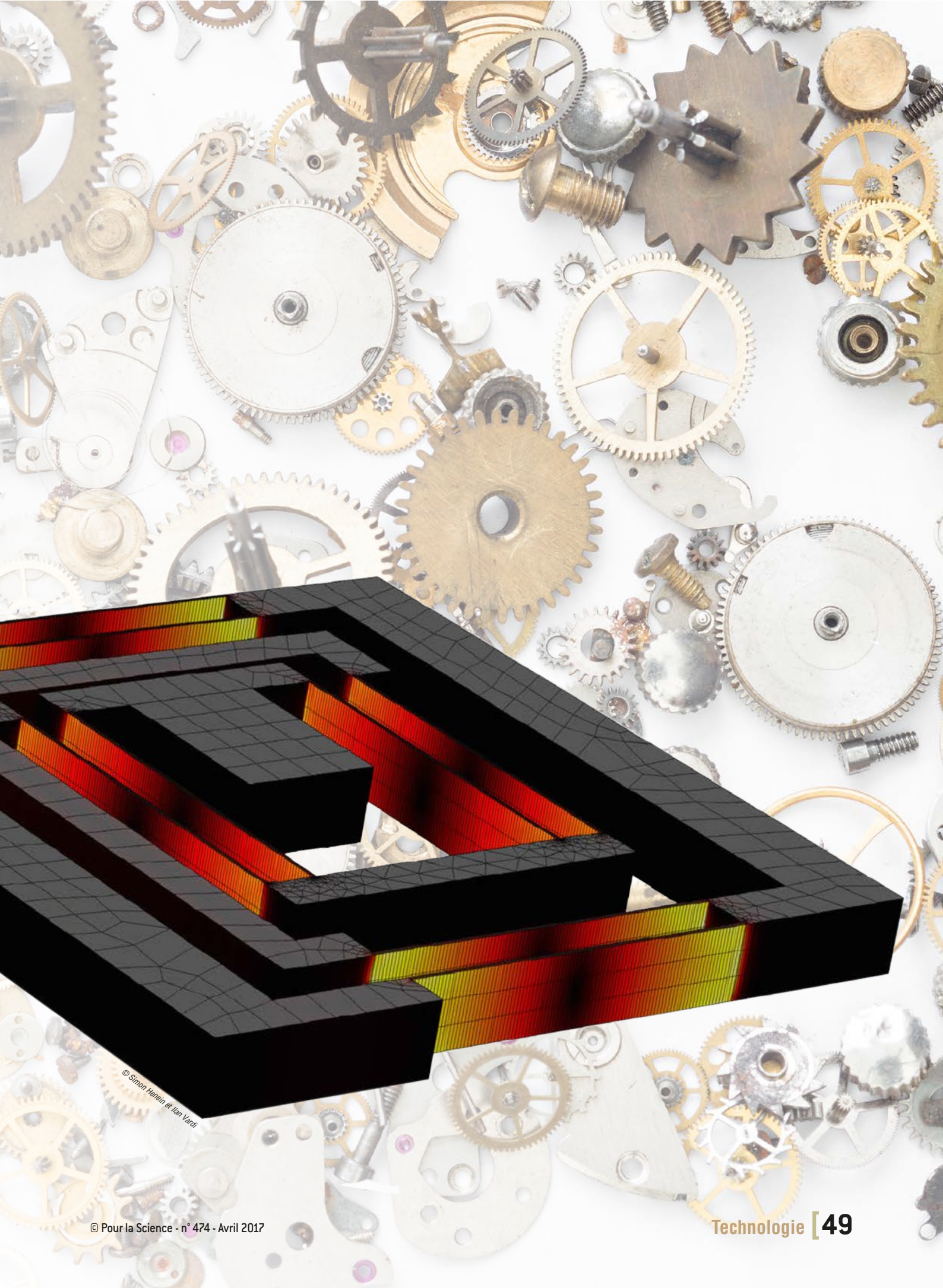
L'ESSENTIEL

- Les montres mécaniques sont moins précises que les montres à quartz, mais restent très appréciées.
- Leur concept de base – celui du mouvement à échappement – n'a pas varié depuis la Renaissance.
- Les mouvements isochrones imaginés par Newton ont inspiré un nouveau principe de mouvement horloger.
- En Suisse, une équipe a construit un prototype prometteur d'horloge sans échappement, donc sans tic-tac.

En 2015, les horlogers ont vendu pour quelque 38,5 milliards d'euros de montres dans le monde. À elle seule, la Suisse en a vendu pour 19 milliards d'euros, dont 80% de montres mécaniques – lesquelles ne représentent que 2% des montres vendues dans le monde... De son côté, la France a vendu pour 1,3 milliard d'euros de montres mécaniques, dont les mécanismes, le plus souvent, sont... suisses. C'est dire le succès pérenne des montres de luxe. Un succès paradoxal dans la mesure où leur utilité comme garde-temps est compromise par les montres à quartz, plus précises et moins onéreuses, ainsi que par les omniprésents téléphones portables. Dès lors, une idée reçue est que les mécanismes horlogers auraient cessé d'évoluer et qu'il n'y aurait plus rien à découvrir ni à inventer dans ce domaine. Notre vision, celle du laboratoire de conception micromécanique et horlogère de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, à Neuchâtel, est tout autre: nous avons entrepris de transformer fondamentalement la montre mécanique, dont le principe est resté inchangé depuis... deux siècles!

Nous travaillons ainsi sur plusieurs nouveaux principes de mécanismes horlogers. Notre projet phare est *IsoSpring*, une

L'ISOSPRING est un oscillateur composé de deux chariots emboîtés et attachés à des lames flexibles. Son principe, qui assure un mouvement cyclique continu et unidirectionnel, pourrait remplacer celui du balancier-spiral des montres mécaniques actuelles.



© Simon Henin et Ivan Vardi

■ LES AUTEURS



Simon HENEIN et Ilan VARDI sont respectivement professeur de microtechnique et mathématicien au sein du laboratoire Instant-Lab de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse.

nouvelle base de temps qui élimine le dispositif à l'origine du fameux tic-tac des montres mécaniques actuelles : l'échappement. Cet organe a pourtant été la grande avancée qui a permis le développement de l'horlogerie mécanique au Moyen Âge. L'objectif d'*IsoSpring* est d'aboutir à une montre mécanique au mouvement intrinsèquement continu, plus précis, plus autonome et d'une réalisation plus simple.

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 ; les quelque 30 jours du mois au cycle lunaire ; les 365 jours de l'année au cycle des saisons. Dès l'Antiquité, on a cherché à s'affranchir de ces phénomènes. Plusieurs principes de garde-temps ont été inventés, tels le sablier ou encore l'horloge à eau. Celle que construisit le savant chinois Su Song au XI^e siècle avait des performances chronométriques impressionnantes et comportait d'ailleurs déjà une forme d'échappement.

En Europe, c'est au Moyen Âge qu'a été inventé l'échappement, un mécanisme qui discrétise le temps, en d'autres termes qui le hache. Dans les montres-bracelets, sa forme commune d'aujourd'hui est l'échappement à ancre, du nom d'une pièce à deux bras terminés par des doigts – nommés palettes. Du fait du mouvement de va-et-vient du balancier-spiral – l'oscillateur qui donne la base de temps à la montre – les palettes libèrent puis arrêtent régulièrement une roue dentée, la roue d'échappement (voir l'encadré page 52).

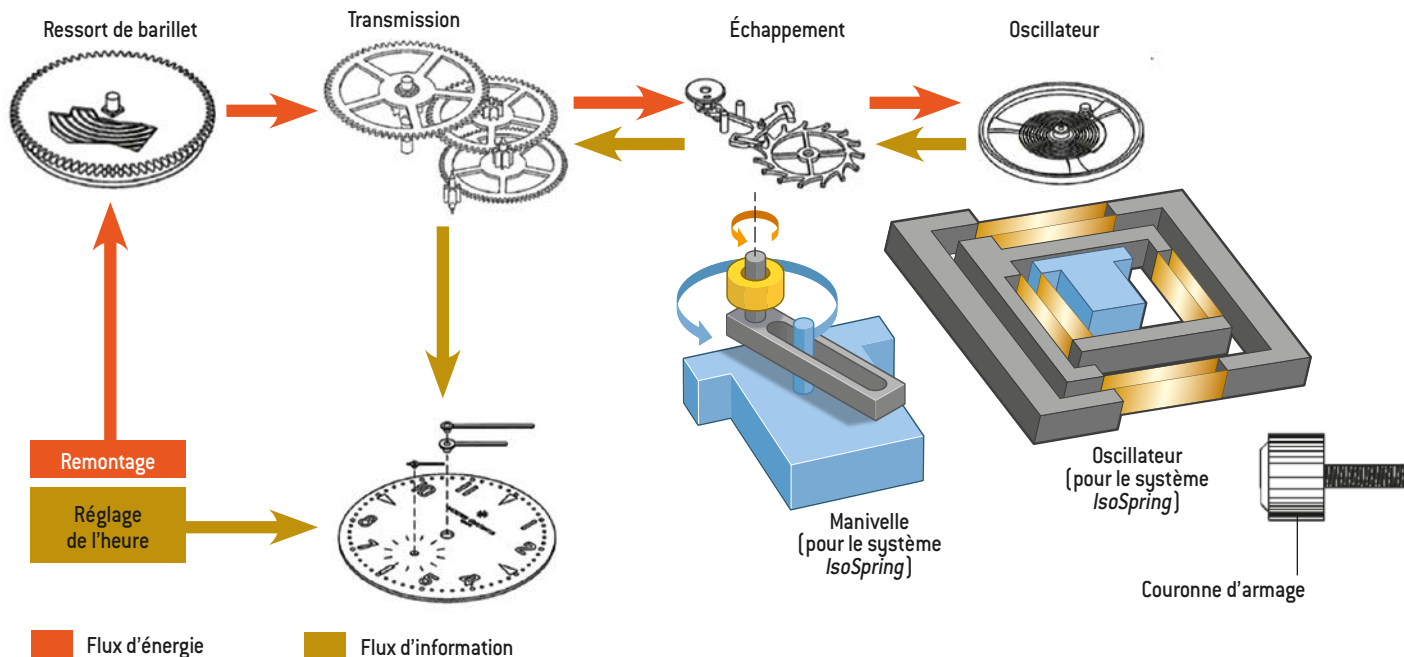
L'échappement, cause du tic-tac

Ainsi, l'échappement arrête le mouvement puis le relâche par à-coups. Les artisans ont affiné son fonctionnement au fil des siècles jusqu'à parvenir à des mouvements dotés d'une précision chronométrique de quelques minutes par jour. Pour autant, l'efficacité de l'échappement est limitée

LE FONCTIONNEMENT DE LA MONTRE MÉCANIQUE

Dans les horloges et montres mécaniques, l'énergie, fournie par un ressort armé ou une masse suspendue, est transmise à un échappement dont la cadence est contrôlée par un régulateur. Jusqu'au XVII^e siècle, le régulateur était un foliot, un balancier qui, par le biais du train d'engrenage, est accéléré de manière alternée par la force du ressort ou du poids. L'inconvénient de ces horloges anciennes était que leur précision dépendait directement de l'intensité de la force motrice. Huygens

a remplacé le foliot par un oscillateur beaucoup plus précis : le pendule. Dans une montre mécanique, l'oscillateur est un balancier-spiral. Toutes les horloges et montres mécaniques dépendent de l'échappement qui entretient les oscillations du régulateur et permet de les compter pour afficher l'heure. Dans le nouveau mécanisme développé par l'équipe des auteurs, l'échappement et le balancier-spiral sont remplacés par une manivelle et un oscillateur à deux chariots (*en couleur*).



par les frottements des palettes et par son fonctionnement intermittent.

Une grandeur nommée facteur de qualité permet d'apprécier à quel point le frottement limite le mouvement d'un oscillateur horloger. Ce facteur est défini comme le nombre d'oscillations qu'effectue un oscillateur libre (découplé du ressort qui le meut normalement) avant que son amplitude angulaire ne représente plus que 4,3% de l'amplitude d'origine. L'oscillateur horloger d'une montre-bracelet est son balancier-spiral, dont le facteur de qualité est de seulement 200. À titre de comparaison, le facteur de qualité d'une banale montre à quartz valant moins de 10 euros dépasse les 100 000 et celui de l'horloge de clocher la plus précise du monde, le Big Ben de Londres, est de 9 300...

En outre, après la création de premières montres mécaniques à la Renaissance, une très longue évolution a été nécessaire avant d'atteindre le niveau de performance des montres-bracelets actuelles. Retraçons-la

brèvement, afin de bien saisir le principe à l'origine d'*IsoSpring*. La plus grande révolution horlogère est l'introduction par le physicien néerlandais Christiaan Huygens, en 1656, de l'oscillateur comme base de temps. Huygens a mis en application le concept d'isochronisme découvert par Galilée en 1609, à savoir que la période d'un pendule dépend très peu de l'amplitude de ses oscillations quand celles-ci sont petites.

Huygens avait aussi découvert le principe de l'oscillateur harmonique, un cas d'oscillateur idéal pour lequel la force de rappel est proportionnelle au déplacement, ce qui, dans le cas du pendule gravitaire, n'est approximativement vrai que pour les petites oscillations. Or l'Anglais Robert Hooke a montré, de son côté, que des forces de rappel proportionnelles au déplacement apparaissent lors des déformations élastiques de la matière. Cette observation s'applique en particulier aux lames élastiques, ce qui a conduit au ressort spiral d'horlogerie (inventé par Huygens et par Hooke), qui ramène le balancier vers sa position d'équilibre à la fin de chaque période.

Du temps solaire au temps mécanique

La mise à profit des oscillateurs en horlogerie a fait passer la précision chronométrique de 15 minutes par jour (soit une précision d'environ 1%) pour le mouvement sans ressort régulateur employé auparavant, à 10 secondes par jour (précision d'environ 0,01%) pour les oscillateurs. En d'autres termes, on a amélioré la précision d'un facteur 100. Les horloges sont ainsi devenues plus précises que le suivi du Soleil, qui produit des jours dont la durée varie de plus ou moins 30 secondes selon les périodes de l'année.

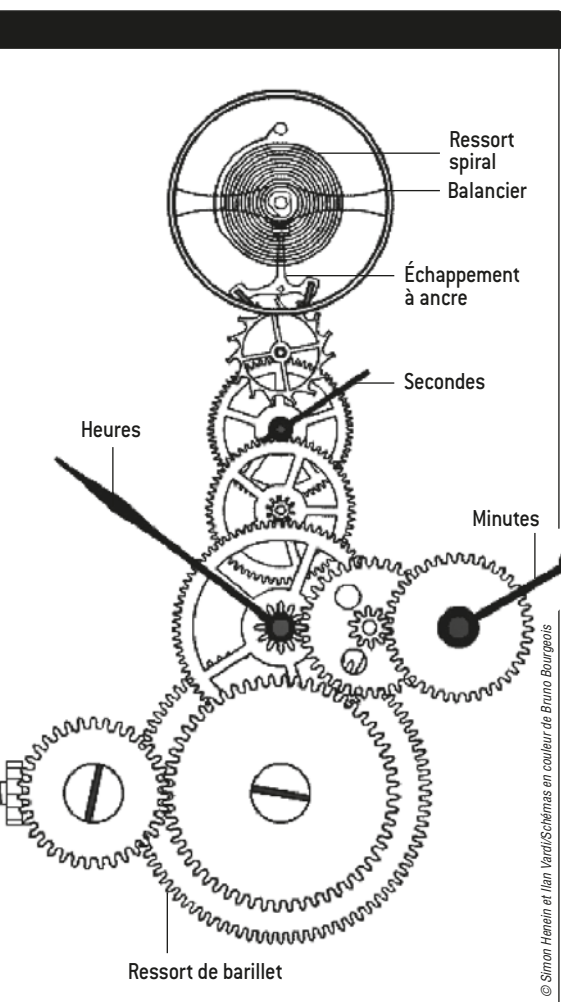
Sans une théorie scientifique du temps – à savoir l'équation de l'oscillateur et sa solution mathématique –, il est clair que cette avancée majeure de l'horlogerie n'aurait pas été possible. Et en introduisant un temps civil, désormais découplé des cycles naturels, l'horlogerie a acquis un rôle capital dans la société.

Le va-et-vient des oscillateurs du XVII^e siècle nécessitait des échappements performants et fiables. Les échappements à détente et à ancre ont été inventés et perfectionnés au XVIII^e siècle par les horlogers

Le commerce des montres

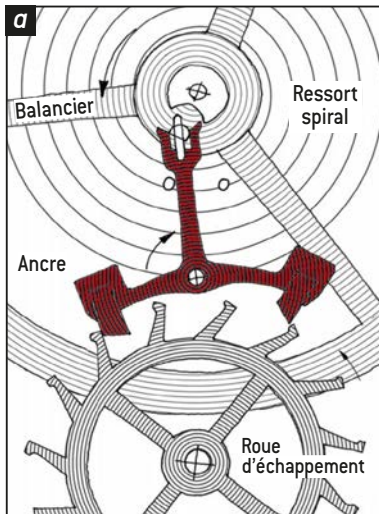
La montre mécanique, considérée par beaucoup comme désuète depuis l'avènement des montres électroniques, se porte pourtant bien sur le plan commercial. Si la Suisse ne produit qu'environ 2 % des montres en nombre de pièces, elle encaisse plus de la moitié des revenus mondiaux grâce aux montres mécaniques haut de gamme, dont le prix est des milliers de fois supérieur à celui d'une montre à quartz.

Cette dernière, inventée à Neuchâtel en 1967, est plus précise que la montre mécanique, mais elle ne séduit pas les amateurs de produits de luxe. Ceux-ci cherchent un objet plus artisanal, avec lequel ils pourront créer un lien émotionnel.

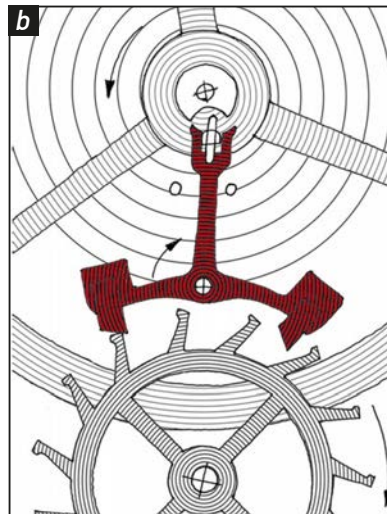


L'ÉCHAPPEMENT À ANCRE

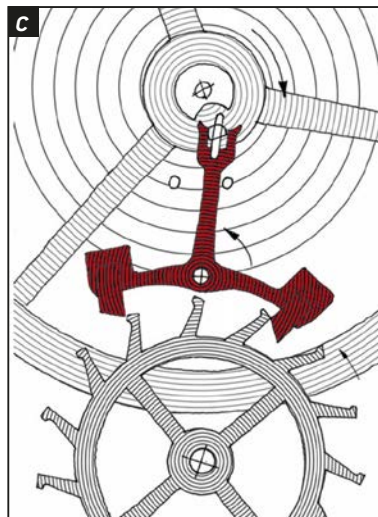
L'échappement à ancre est utilisé dans la majorité des montres mécaniques. Il a été imaginé en 1769 par l'horloger britannique Thomas Mudge. Il fonctionne en arrêtant complètement le train d'engrenage de la montre. Les rouages de la montre sont ainsi immobilisés 90 % du temps ! Toutefois, huit fois par seconde, le balancier libère le mouvement, qui reçoit une impulsion, puis l'arrête à nouveau. Le mouvement s'effectue donc par chocs successifs qui produisent le son caractéristique du tic-tac des montres et horloges mécaniques. Les entrées en contact répétées de l'ancre avec les dents de la roue d'échappement induisent des frottements, d'où l'imperfection intrinsèque du principe de l'échappement. En raison des pertes d'énergie associées, le rendement mécanique des échappements d'aujourd'hui ne dépasse pas 35 %.



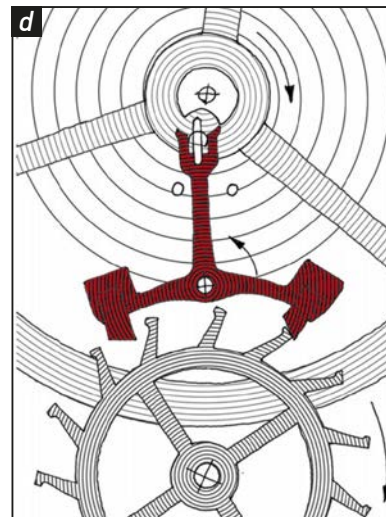
L'ANCRE bloque la roue d'échappement que, sinon, le ressort moteur (non visible sur l'image) propulserait dans le sens horaire.



LA ROTATION DU BALANCIER-SPIRAL dans le sens antihoraire déverrouille l'ancre, qui bascule et libère ainsi la roue d'échappement. Celle-ci, mue par le ressort moteur, tourne alors dans le sens horaire.



L'ANCRE vient à nouveau bloquer la roue d'échappement après que celle-ci a parcouru dans le sens horaire un angle égal à un demi-pas interdentaire.



LE BALANCIER-SPIRAL revient de son oscillation, cette fois dans le sens horaire, et libère la roue d'échappement, qui avance à nouveau d'un angle égal à un demi-pas interdentaire.

anglais John Arnold, Thomas Earnshaw et Thomas Mudge, ainsi que par les horlogers français et suisses tels que Pierre Le Roy, Ferdinand Berthoud et Abraham-Louis Breguet. Les avancées ont été telles que leur concept de montre mécanique est toujours employé aujourd'hui, même si sa mise au point culmina en 1800 ! Pour autant, de nombreux progrès de détail ont rendu les montres mécaniques actuelles plus précises et plus fiables.

Une limitation majeure subsiste toutefois : l'échappement, notamment celui à ancre, le plus utilisé, reste un organe mécanique complexe dont le rendement énergétique ne dépasse pas 35 % environ. C'est nettement en deçà des performances des transmissions mécaniques usuelles. D'où notre approche, qui consiste à remettre en cause l'échappement. Comment ?

Des ellipses isochrones

Nous sommes revenus à 1687, année où Isaac Newton a publié ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Il y démontre que des lois simples expliquent la mécanique céleste. L'un de ses résultats les plus importants est la démonstration des lois de Kepler du mouvement planétaire, dont la première est que les planètes parcourent des trajectoires elliptiques dont le Soleil est un foyer.

Newton a formulé sa loi de la gravitation universelle et prouvé qu'elle conduit aux lois de Kepler. Par esprit de systématique, il a aussi recherché quelles autres lois d'attraction entre corps célestes produiraient des trajectoires elliptiques. Il a ainsi découvert que c'est le cas d'une attraction proportionnelle à la distance séparant une planète de son soleil (le centre d'attraction), ce qui rejoint la loi de Hooke, d'après laquelle la force de rappel d'un ressort est proportionnelle à l'allongement de celui-ci.

La loi de la gravitation universelle et la loi linéaire de Hooke ont toutefois des implications différentes. Selon la première, le point d'attraction se trouve sur l'un des foyers de l'ellipse, tandis que selon la seconde, il se situe en son centre. La loi de la gravitation universelle implique que la durée de l'année est d'autant plus longue que la planète est éloignée de son soleil (troisième loi de Kepler), alors que selon la loi linéaire, cette durée est indépendante de la distance entre la planète et son soleil.

© Simon Henin et Ivan Vardi

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 rebrousse 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:

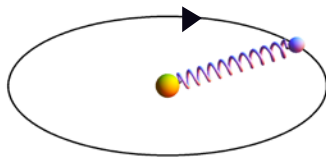
- 1) La « planète », c'est-à-dire le corps de l'oscillateur, subit une force de rappel variant linéairement avec la distance.
- 2) Cette force est centrale, c'est-à-dire orientée vers un point fixe unique.
- 3) Cette force est isotrope (intensité indépendante de la direction).
- 4) Le corps de l'oscillateur 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

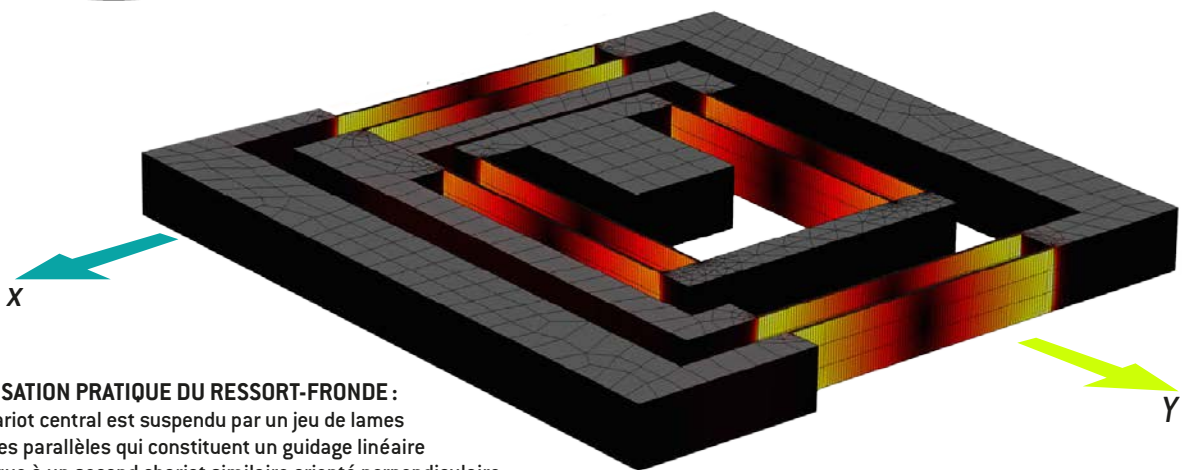
UN OSCILLATEUR CONÇU POUR ÉCHAPPER À L'ÉCHAPPEMENT

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 translater 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.

© Simon Henin et Ian Vardi



© Alain Harzog, 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. ■

HISTOIRE DES SCIENCES
Winston Churchill
et les extraterrestres

NEUROSCIENCES
Des minicerveaux
fabriqués *in vitro*

ASTROPHYSIQUE
Les supernovæ
de l'extrême

■ POUR LA

SCIENCE

Édition française de Scientific American

Avril 2017 - n° 474

www.pourla**science**.fr

Guerre de TROIE

Le mythe
à l'épreuve
de l'archéologie



M 02687 - 474S - F: 6,50 € - RD



BEL : 7,2 € - CAN : 10,95 \$ CAD - DOM/S : 7,3 € - Réunion/A : 9,3 € - ESP : 7,2 €
Gr : 7,2 € - ITA : 7,2 € - LUX : 7,2 € - MAR : 60 MAD - TOM : 980 XPF
PORT.CONT. : 7,2 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 8,6 TND