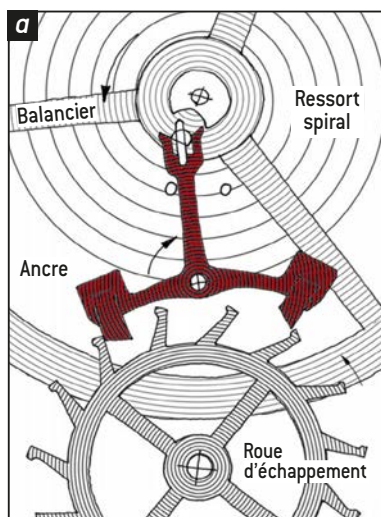
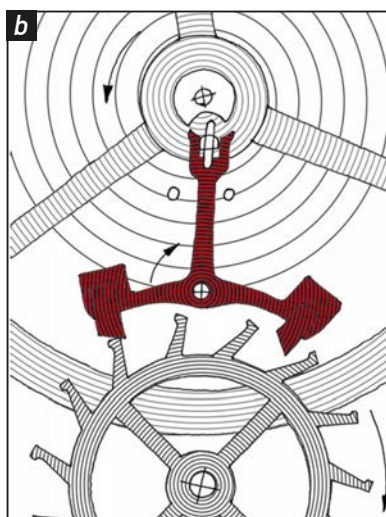


L'ÉCHAPPEMENT À ANCRE

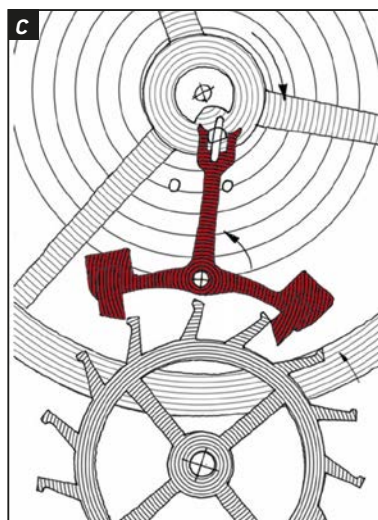
L'échappement à ancre est utilisé dans la majorité des montres mécaniques. Il a été imaginé en 1769 par l'horloger britannique Thomas Mudge. Il fonctionne en arrêtant complètement le train d'engrenage de la montre sont ainsi immobilisés 90 % du temps ! Toutefois, huit fois par seconde, le balancier libère 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 %.



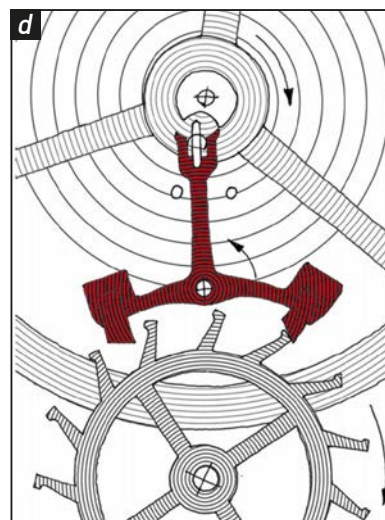
L'ANCRE bloque la roue d'échappement que, sinon, le ressort moteur (non visible sur l'image) propulserait dans le sens horaire.



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:

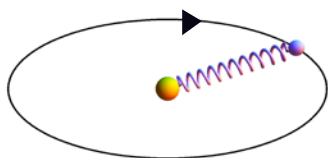
- 1) La « planète », c'est-à-dire le corps de l'oscillateur, subit une force de rappel variant linéairement avec la distance.
- 2) Cette force est centrale, c'est-à-dire orientée vers un point fixe unique.
- 3) Cette force est isotrope (intensité indépendante de la direction).
- 4) Le corps de l'oscillateur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

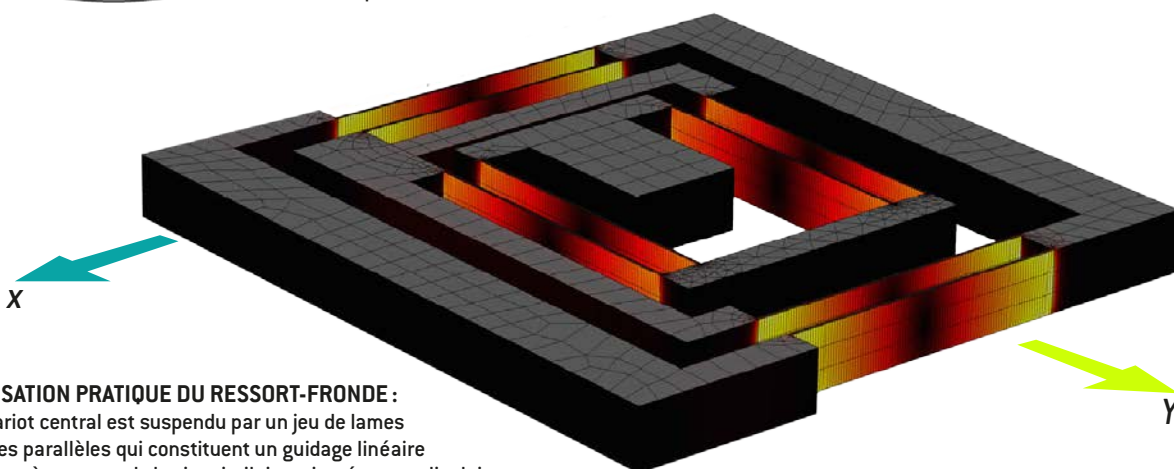
Alors que la réalisation, même précise, d'un échappement – un casse-tête technique pour les ingénieurs – produit un mouvement isochrone saccadé, l'oscillateur *IsoSpring*, de conception moins complexe, produit un mouvement isochrone continu. Ce dernier est en outre bien plus facile à entretenir car il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