

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.

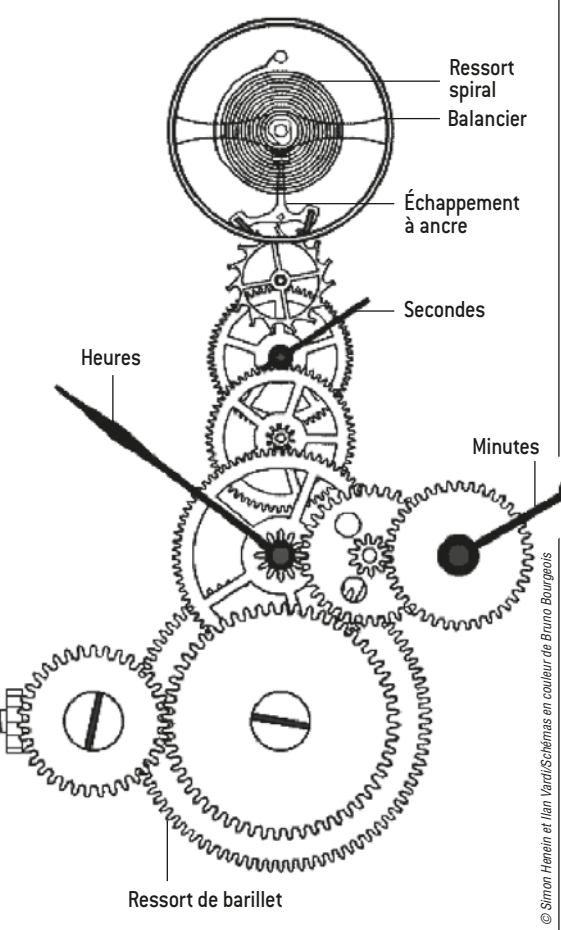
Sans une théorie scientifique du temps – à savoir l'équation de l'oscillateur et sa solution mathématique –, il est clair que cette avancée majeure de l'horlogerie n'aurait pas été possible. Et en introduisant un temps civil, désormais découplé des cycles naturels, l'horlogerie a acquis un rôle capital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

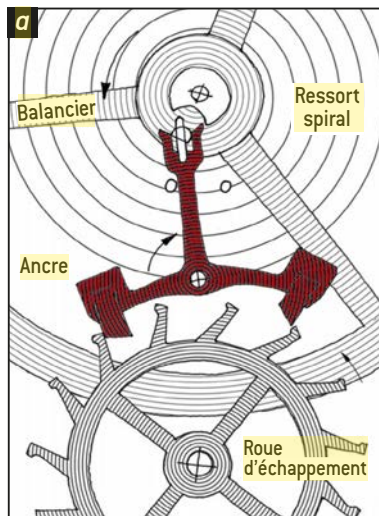
La montre mécanique, considérée par beaucoup comme désuète depuis l'avènement des montres électroniques, se porte pourtant bien sur le plan commercial. Si la Suisse ne produit qu'environ 2 % des montres en nombre de pièces, elle encaisse plus de la moitié des revenus mondiaux grâce aux montres mécaniques 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.

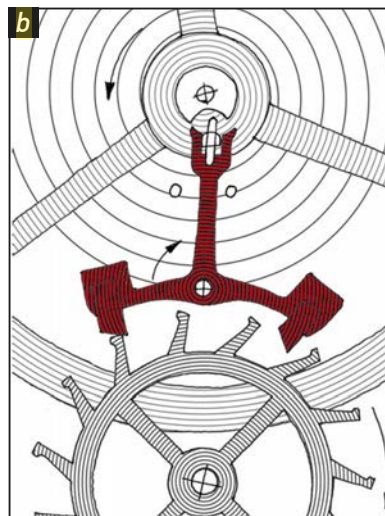


L'ÉCHAPPEMENT À ANCRE

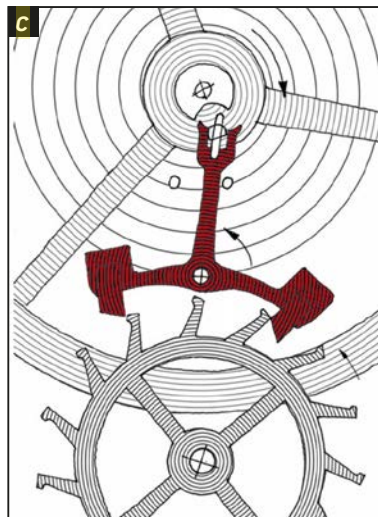
L'échappement à ancre est utilisé dans la majorité des montres mécaniques. Il a été imaginé en 1769 par l'horloger britannique Thomas Mudge. Il fonctionne en arrêtant complètement le train d'engrenage de la montre. Les rouages de la montre sont ainsi immobilisés 90 % du temps ! Toutefois, huit fois par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



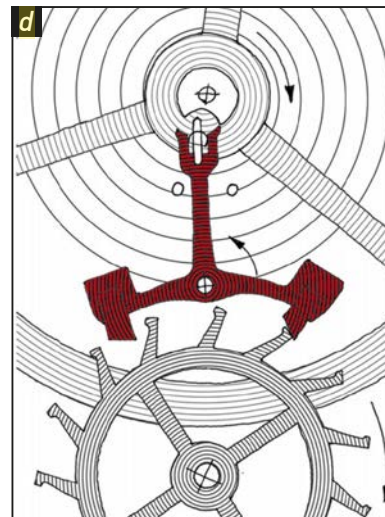
L'ANCRE bloque la roue d'échappement que, sinon, le ressort moteur (non visible sur l'image) propulserait dans le sens horaire.



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