



Un rubis brut dans sa gangue de marbre, extrait des mines de Mogok, au Myanmar.



Le clip *Pivoine*, de 1937, en platine, or jaune, «serti mystérieux» rubis et diamants.

ions aluminium sont remplacés par d'autres éléments, faisant du minéral des gemmes colorées. Dans le cas du rubis, c'est le chrome, ce même élément donnant à l'émeraude sa couleur... verte! La différence résulterait de champs électriques créés autour des atomes de chrome par les atomes d'oxygène dans le rubis, ce phénomène n'ayant pas lieu dans l'émeraude. Ce faisant, les deux minéraux n'absorbent pas la lumière de la même façon.

Récoltées à Mogok dans des graviers alluvionnaires issus des calcaires métamorphisés, les gemmes sont ensuite taillées et confiées aux mains expertes des joailliers. Ils peuvent en faire par exemple le clip *Fuchsia* de 1968 ou le clip *Pivoine* de 1937 (voir les photos ci-dessus). C'est une autre science qui se déploie ici, notamment celle du «serti mystérieux». De quoi s'agit-il?

Ce procédé, breveté en 1933 par Van Cleef & Arpels, permet de fixer les pierres facettées, principalement les rubis, sur une fine résille d'or de 200 micromètres d'épaisseur, sans monture ni griffe apparente. Depuis, cette pratique a été améliorée et déclinée en deux nouvelles techniques: le serti mystérieux Navette, qui accentue le volume grâce au bombé des pierres polies en navette, et le serti mystérieux Vitrail, qui joue de la transparence et des reflets des gemmes sans que la monture soit visible.

Entre émerveillement face aux plus belles créations présentées, comme la «table de Mazarin», en marqueterie de pierres représentant fleurs et animaux, *L'Arbre aux tourmalines*, créé par Jean Vendôme, ou le collier commandé par la

reine Nazli d'Égypte pour le mariage de sa fille en 1939, et découverte des plus récents travaux en minéralogie et des trésors français, en particulier les deux gros saphirs mis au jour dans le Puy-de-Dôme en 2018, le visiteur ne peut qu'adhérer aux propos de Bruno David, président du Muséum national d'histoire naturelle, selon qui «le dialogue science-esthétique prend avec cette exposition une coloration exceptionnelle». Entre autres, celle du rubis!

Exposition «Pierres précieuses», à la grande galerie de l'Évolution, au Jardin des plantes, à Paris, jusqu'au 14 juin 2021.
<http://bit.ly/MNHN-Rubis>



L'auteur a publié:
Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

L'HORLOGE QUI MARCHE AU CHAUD ET FROID

Profiter des variations de température de l'air ambiant, telle est l'idée à la base de l'horloge Atmos, qui se remonte d'elle-même et indéfiniment.

Utiliser la nature comme source d'énergie est une préoccupation très actuelle. Mais elle était aussi depuis le XVIII^e siècle au cœur des réflexions d'horlogers et de savants qui cherchaient à fabriquer une horloge au mouvement perpétuel. Ce rêve est devenu une réalité commerciale en 1930 avec l'horloge Atmos, inventée par l'ingénieur suisse Jean-Léon Reutter puis développée et produite par la compagnie Jaeger-LeCoultre. Quels sont les principes physiques qui se cachent derrière la conception de cette horloge ? Découvrons-les dans la déclinaison actuelle de celle-ci, l'Atmos 2, créée en 1937.

Dès 1740, le Suisse Pierre de Rivaz avait pointé les obstacles à surmonter

pour réaliser une horloge perpétuelle ou presque. Outre la dilatation thermique, qui réduit la précision, et l'usure des pièces, qui produit une limaille susceptible de bloquer les mécanismes, l'énergie reste un point clé. L'horloge doit en effet consommer très peu et être dotée d'un dispositif qui capte l'énergie du milieu ambiant et la stocke.

L'ÉNERGIE ET SA DISSIPATION, UN POINT CLÉ

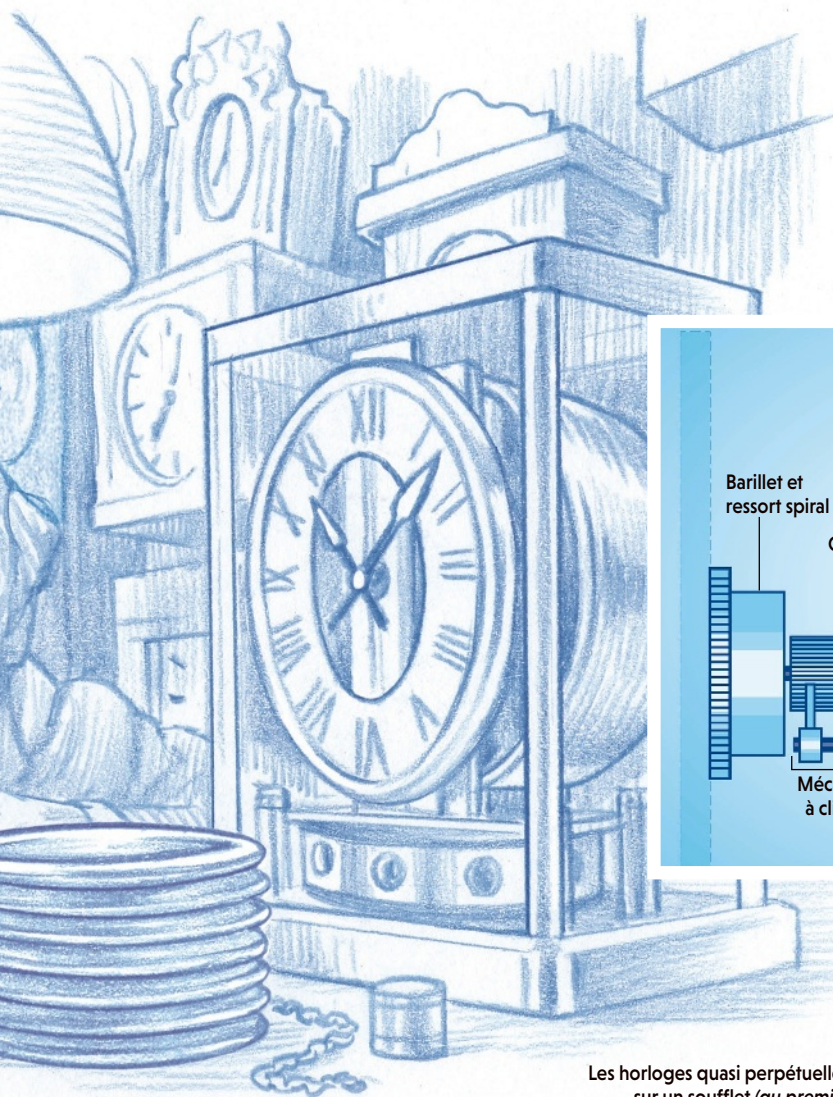
Comment Atmos 2 s'affranchit-elle de ces difficultés ? Commençons par la consommation énergétique. Plus que le mécanisme de l'horloge lui-même, c'est l'amortissement de son oscillateur (pour une comtoise, par exemple, il s'agit d'un pendule pesant) qui est à l'origine des

principales pertes d'énergie. La puissance moyenne dissipée par cet oscillateur est déterminée par trois paramètres : l'énergie stockée, la période des oscillations et le « facteur de qualité », un nombre proportionnel au rapport entre l'énergie stockée et l'énergie perdue à chaque oscillation.

Il est difficile de jouer sur le facteur de qualité, qui est de l'ordre de quelques centaines pour des systèmes mécaniques oscillants. En revanche, on peut réduire la puissance dissipée en diminuant le rythme des oscillations.

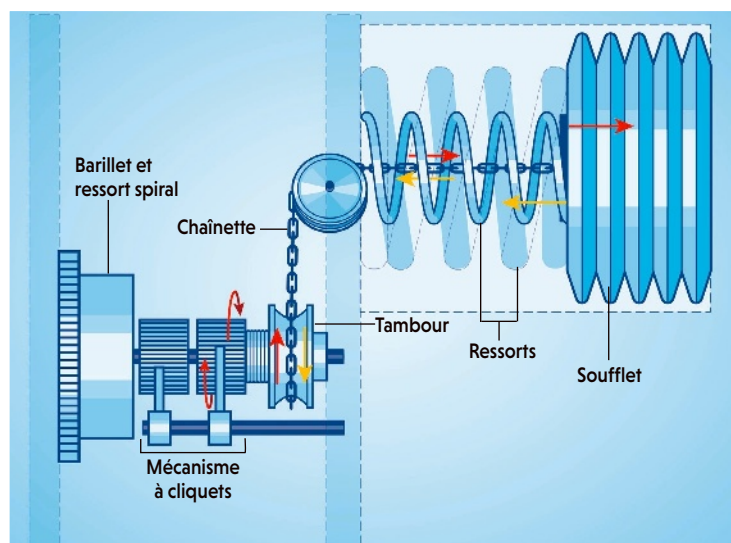
Pour ce faire, plutôt qu'un pendule pesant dont la période est, pour une raison de taille, difficilement supérieure à quelques secondes, on utilise un pendule de torsion. Celui d'Atmos 2 est ainsi une





DU SOUFFLET AU CADRAN

Lorsque la température diminue, le soufflet se contracte (*flèche rouge*) et tire ainsi la chaînette qui lui est fixée. Celle-ci s'enroule alors sur un tambour qui, par l'intermédiaire d'un dispositif à cliquets, tend le ressort spiral (lequel actionne les aiguilles du cadran de l'horloge via un mécanisme à engrenages non représenté ici). Lorsque la température augmente, le soufflet se dilate (*flèche orange*) et la chaînette se relâche, mais un ressort de rappel fait tourner le tambour de façon à maintenir la tension de la chaînette, le mécanisme à cliquets empêchant dans cette phase que le ressort spiral se détende.



Les horloges quasi perpétuelles Atmos reposent sur un soufflet (au premier plan) contenant du chlorure d'éthyle, qui se dilate ou se contracte avec les variations de la température ambiante.

couronne de 200 grammes et de 8,5 centimètres de diamètre suspendue à un ruban. L'amplitude de son oscillation est de 225 degrés et sa période est de 1 minute, ce qui permet d'avancer l'aiguille des minutes d'un demi-cran à chaque demi-oscillation. L'énergie mécanique qu'il stocke est de 14 microjoules. Avec un facteur de qualité de l'ordre de 300, la perte d'énergie par oscillation est de 2%, soit 0,3 microjoule par minute.

Autrement dit, la puissance dissipée est de 5 nanowatts, ce qui est 10 fois moins que pour une montre mécanique. La lenteur des oscillations compense largement le fait que l'énergie stockée dans le pendule est bien plus importante que celle emmagasinée dans les oscillateurs de nos montres mécaniques.

Pour compenser ces pertes, pas d'astuce particulière pour Atmos: cette horloge utilise un ressort spiral. À chaque mouvement de balancier, la roue à échappement avance d'un cran. Lors de cette avance, le ressort se détend et libère ainsi une quantité fixe d'énergie, qui doit suffire pour entraîner l'ensemble des rouages et mécanismes de l'horloge et entretenir les oscillations du pendule.

C'est bien ce que permet le ressort d'Atmos 2. Lorsqu'il est remonté complètement, le couple qu'il exerce sur l'axe moteur de l'horloge est de 1,33 newton-centimètre. Si on le relâche d'un tour, l'énergie qu'il fournit est alors de 0,084 joule. Or les divers engrenages sont conçus pour qu'à chaque oscillation du pendule de torsion (toutes les minutes), le ressort spiralé se

détende de seulement $1/42524^{\circ}$ de tour. Le ressort fournit donc une puissance de 33 nanowatts, bien au-delà des 5 nanowatts dissipés par le pendule de torsion.

UN RESSORT REMONTÉ GRÂCE À LA TEMPÉRATURE

Évidemment, petit à petit, ce «ressort moteur» se détend jusqu'à ne plus pouvoir entretenir le mouvement du pendule: l'horloge s'arrête! Comment alors la remonter sans la toucher? Très tôt, les horlogers ont eu l'idée de mettre ➤

Les auteurs ont notamment publié:
En avant la physique!,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).



> à profit les variations de température de l'air ambiant. Mais s'il paraissait pertinent d'exploiter un effet de dilatation thermique (qu'ils combattaient par ailleurs pour garantir la précision de l'horloge), encore fallait-il déterminer le matériau à utiliser.

On a envisagé et testé de nombreuses possibilités: déformation d'un bilame formé de deux solides se dilatant différemment, dilatation d'un gaz, d'un liquide... C'est finalement l'évaporation/condensation d'un liquide, le chlorure d'éthyle (C_2H_5Cl), qui a été retenue pour l'Atmos 2.

Cette horloge comporte un soufflet de 10 centimètres de diamètre contenant du chlorure d'éthyle en équilibre permanent avec sa vapeur. Le maintien de cet équilibre liquide-vapeur autorise des variations de pression bien plus importantes que pour un gaz à pression et température ambiantes: alors que, dans ce dernier cas, l'augmentation de pression sous l'effet de l'élévation de température est d'environ $1/300^\circ$ d'atmosphère par degré Celsius, soit 3,4 hectopascals par degré, elle est de l'ordre de 46 hectopascals par degré (soit 13 fois plus) au voisinage de $20^\circ C$ pour le chlorure d'éthyle.

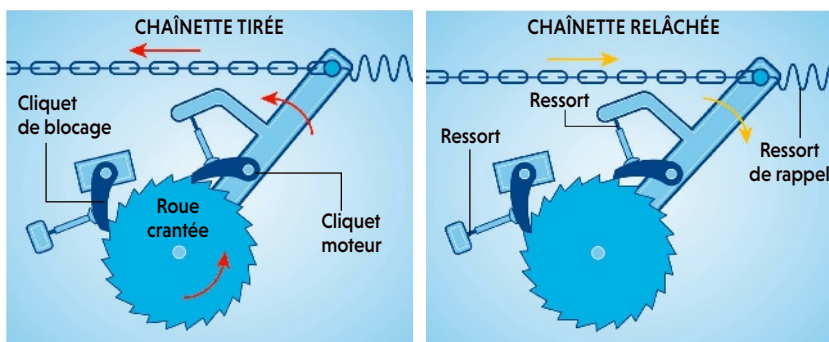
Ainsi, la force exercée par la vapeur sur les couvercles de ce soufflet (produit de la pression par la superficie) varie de 36 newtons par degré. En pratique, l'un de ces couvercles est mobile: le soufflet se dilate lorsque la température augmente, et se contracte quand celle-ci diminue. Un ressort modérateur limite les déplacements du couvercle à environ 1,63 millimètre par degré.

Reste à relier mécaniquement ce couvercle mobile au ressort moteur de l'horloge, ce qui est plus facile à dire qu'à faire (voir l'encadré page 89). Il appuie sur un disque métallique repoussé par des ressorts et au centre duquel est fixée une chaînette. Celle-ci, après être passée par une poulie, vient s'enrouler sur un tambour qui remonte le ressort moteur spiral par l'intermédiaire d'un mécanisme à cliquets (voir l'encadré ci-dessus).

Quand le soufflet se contracte, le disque suit le couvercle mobile du soufflet, tire la chaînette du tambour enrouleur et remonte l'horloge par l'intermédiaire du cliquet engagé sur une dent de la roue entraînant le tambour, auquel est fixée la partie extérieure du ressort spiral. Quand le soufflet se dilate, le disque métallique donne du mou à la chaînette; un petit ressort de rappel ramène le tambour pour maintenir la tension de la chaîne, tandis

LE MÉCANISME À CLIQUETS

Dans les horloges Atmos, la chaînette tirée ou relâchée par le soufflet est reliée à un mécanisme à cliquets. Lorsque la chaînette est tirée (flèche rouge), le cliquet moteur pousse la roue crantée et la fait tourner (ce qui permet de tendre le ressort spiral de l'horloge); dans cette situation, le cliquet de blocage n'intervient pas. Lorsque la chaînette est relâchée et se déplace donc dans l'autre sens (flèche orange), la roue crantée reste immobile grâce à l'action du cliquet de blocage (et maintient ainsi la tension du ressort spiral).



qu'un autre cliquet maintient le ressort spiral tendu.

Comme le diamètre du cylindre sur lequel s'enroule la chaînette est de 1,4 centimètre et que le couple nécessaire pour tendre le ressort spiral est, comme mentionné plus haut, de 1,33 newton centimètre, la force nécessaire pour remonter le ressort moteur est d'environ 2 newtons. Une variation de température de $0,05^\circ C$ suffit donc pour l'engendrer!

DEUX CLICS PAR JOUR SUFFISENT

Reste à déterminer quelles variations de température (amplitude et rythme) suffisent à assurer le bon fonctionnement de l'horloge. Pour que l'action de rechargement en énergie soit efficace, il faut que le mouvement du soufflet permette d'actionner au moins un cran du cliquet fixé sur le tambour de la chaîne, c'est-à-dire d'engager une dent sur le cliquet qui recharge le ressort moteur.

Étant donné le nombre de dents par tour (180) et l'amplitude du mouvement du couvercle du soufflet, on calcule qu'il suffit d'une variation de température de $0,12^\circ C$ pour provoquer ce clic. Et comme la dissipation énergétique de l'horloge nécessite un rechargement de 2 clics par jour, on voit qu'une variation de $1^\circ C$ permet de faire fonctionner l'horloge pendant 4 jours! Les variations journalières de température sont donc plus que largement suffisantes, y compris dans une pièce climatisée... sauf à avoir une régulation de température digne d'un laboratoire de recherche! ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Moline et J. Wagner, **Operating principles, common questions, and performance data for an atmospheric driven Atmos clock**, *Watch & Clock Bulletin*, vol. 57(1), n° 413, janvier-février 2015 (téléchargeable sur <https://bit.ly/2EzvSti>).

J. Lebet, **Living on Air: History of the Atmos Clock**, Jaeger-LeCoultre, 1997.



N° 515 (sept. 20)
réf. PL515



N° 514 (août 20)
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504

À retourner accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour la Science – 26 BD Président Wilson CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
 2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret: 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR