

Échappements à impulsion virtuelle

**Ilan Vardi, Roland Bitterli, Laura Convert, Etienne Thalmann,
Simon Henein**

Instant-Lab, EPFL

Microcity, rue de la Maladière 71b, CH – 2000 Neuchâtel
<https://instantlab.epfl.ch/>

Juin 2018

25

Bulletin SSC n° 85

L'échappement à détente est reconnu pour sa performance chronométrique, mais il n'est pas sécurisé pour la montre-bracelet. Plusieurs échappements ont été proposés pour adapter cet échappement à la montre, dont l'échappement Robin récemment sécurisé par Audemars Piguet. George Daniels a poursuivi une démarche qui a mené à l'échappement coaxial. Nous proposons un nouveau concept, l'impulsion virtuelle, qui pourrait réunir tous les avantages de ces échappements. Notre solution est une simple modification de l'échappement Robin, nous ajoutons seulement une dent d'impulsion indirecte. Le principe de l'impulsion virtuelle consiste en une impulsion indirecte qui ne se fait qu'à l'arrêt et à faible amplitude. Ceci ajoute la contrainte du double coup, donc sécurise, et assure l'auto-démarrage. Un tracé et un démonstrateur ont été réalisés. Des observations du démonstrateur, à l'aide d'une caméra haute vitesse, démontrent la validité du concept de l'impulsion virtuelle.

L'échappement à détente et la montre-bracelet

L'échappement à détente est reconnu pour sa performance chronométrique [1, p. 181], il est nommé *chronometer escapement* en anglais [9]. On peut citer les avantages suivants par rapport à l'échappement à ancre suisse :

1. Un échappement libre où le balancier n'est perturbé qu'une fois par période, comparé à l'échappement à ancre qui perturbe le balancier deux fois par période.
2. Une impulsion directe plus efficace que l'impulsion indirecte par l'intermédiaire d'un levier de l'échappement à ancre.
3. L'impulsion est radiale¹ ce qui minimise le frottement d'impulsion et élimine la nécessité de lubrification indispensable à l'ancre suisse.
4. L'unique impulsion par période donne une liberté de réglage du repère. Puisque l'échappement à ancre utilise l'ancre de manière symétrique, un réglage du posi-

tionnement de l'impulsion avant ou après le point mort à l'aller du balancier engendre un dérèglement de signe opposé au retour.

5. Une simplicité mécanique puisqu'il n'y a pas d'ancre.

La problématique de l'échappement à détente est qu'il ne suit pas un principe important des échappements de montres-bracelets : ils doivent être très contraints géométriquement pour minimiser l'effet des chocs. La sensibilité aux chocs est telle que l'échappement à détente ne peut pas être utilisé tel quel dans les montres-bracelets : une sécurisation de la cinématique par des obstacles mécaniques interdisant à l'échappement de se mettre dans des configurations non fonctionnelles en cas de chocs accidentels est requise.

Récemment, la sécurisation de l'échappement à détente a été accomplie par l'ajout de divers mécanismes [8]. En 2012, une montre-bracelet a été commercialisée par Urban Jurgensen, avec l'appui des maîtres horlogers Derek Pratt, Peter Baumberger, Jean-François Mojon et Kari Voutilainen [8]. Ces mécanismes préservent le principe de base de l'échappement à détente, mais sacrifient sa simplicité.

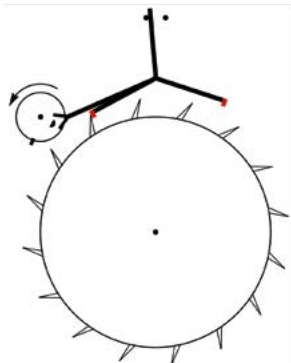
¹ L'impulsion est sur la ligne des centres. Cette impulsion est appelée *radiale*, *naturelle*, *tangentielle* ou *primitive* [13, p. 76] par différents auteurs. Nous choisissons le terme *radiale* pour être cohérents avec Daniels.

Plusieurs modifications de l'échappement à détente ont été réalisées afin de retenir certains de ses avantages pour la montre-bracelet. Les exemples examinés ici sont l'échappement Robin et sa sécurisation par Audemars Piguet, l'échappement AP, et l'échappement coaxial de George Daniels. Nous proposons un nouveau concept, l'impulsion virtuelle, qui paraît retenir les avantages de l'échappement AP et de l'échappement coaxial.

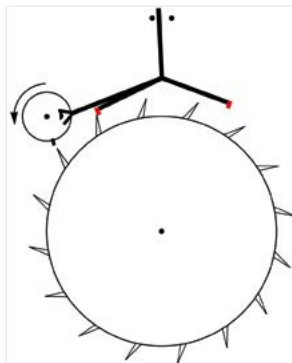
L'échappement Robin

Une première modification de l'échappement à détente est d'ajouter un *coup perdu*, où l'on remplace la fonction de la détente par l'arrêt de la roue d'échappement suivi de sa libération sans qu'il y ait impulsion. C'est le cas de l'échappement Robin introduit en 1791 par l'horloger français Robert Robin (1742-1799). D'après Gould et Gros, des mécanismes similaires ont existé avant celui de Robin [9, p. 155] [10, p. 251]. La similarité avec l'échappement à détente est claire et Gould le nomme *half chronometer escapement*.

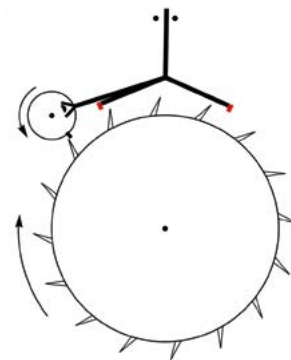
Le fonctionnement conceptuel de l'échappement Robin est illustré dans cette section. Notons que notre description n'est présentée qu'à titre indicatif pour mettre en valeur les concepts de l'échappement et non pas les détails. Une description plus précise correspondant à un véritable échappement est présentée dans [1, p. 137].



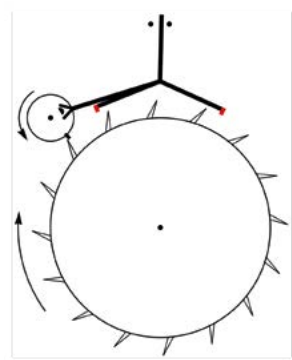
R1. Arc supplémentaire du balancier.



R2. Dégagement par le balancier.

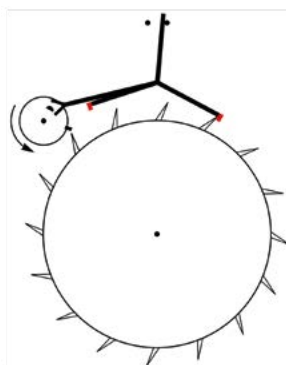


R3. Roue d'échappement rattrapant le balancier.

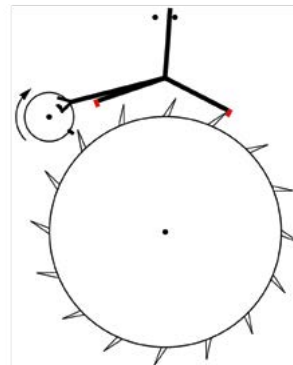


R4. Roue d'échappement impulsant² le balancier.

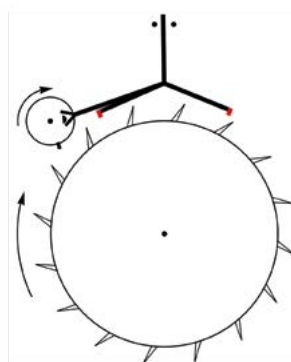
² Dans ce rapport, nous utilisons de manière systématique le verbe « impulser » pour dire « donner une impulsion à ».



R5. Arc supplémentaire du balancier.



R6. Dégagement par le balancier.



R7. Coup perdu.

Évaluation de l'échappement Robin

L'échappement Robin retient les avantages 2 à 4 (voir page 25) de l'échappement à détente. En revanche, par rapport à l'ancre suisse, il a l'inconvénient que l'ancre n'est pas suffisamment contrainte, donc l'échappement n'est pas sécurisé en cas de choc. En effet, nous remarquons que pendant les étapes R3, R4, R7 de l'échappement Robin, l'ancre n'est presque pas contrainte cinématiquement par la géométrie des organes avec lesquels elle interagit. Ceci n'est pas le cas pour l'échappement à ancre.

De plus, l'auto-démarrage après panne sèche n'est pas assuré. Celui-ci s'effectue quand la roue d'échappement est arrêtée sur un plan d'impulsion, ce qui est presque toujours le cas pour l'ancre suisse. En revanche, en raison du coup perdu, il n'y a qu'un seul plan d'impulsion et un échappement de type Robin peut s'arrêter dans une position de repos, où l'auto-démarrage est impossible, puisque le balancier immobile ne peut pas libérer la roue d'échappement.

L'échappement AP

L'échappement AP, dit *échappement à impulsion directe* [1, p. 137-141], est une sécurisation de l'échappement Robin commercialisé par Audemars Piguet.

Cette sécurisation de l'échappement Robin a été inventée en 2000 par Patrick Augereau [2]. Le mécanisme d'Augereau est illustré sur la figure 1. La sécurisation est accomplie par le *dard* et son *ergot*, solidaires de l'ancre et la *jupe* cylindrique, solidaire du balancier. Dans la description de cet échappement, le terme *plateau*, est la partie du balancier contenant la cheville et la jupe, le terme *ellipse* est celui utilisé par les horlogers pour désigner la cheville du balancier.

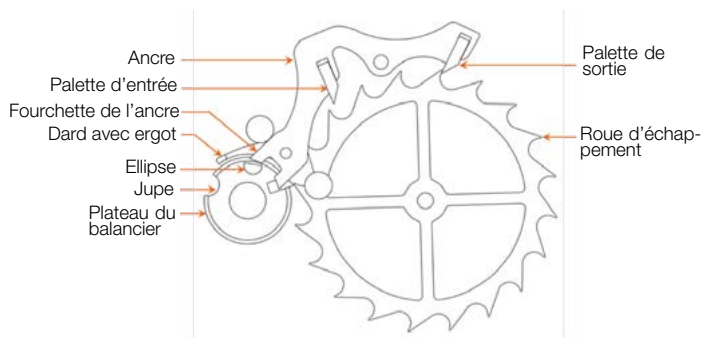


Fig. 1 : Composants de l'échappement AP.

L'échappement AP a fait ses preuves avec sa commercialisation. Techniquement, il conserve tous les avantages de l'échappement Robin, en particulier, il n'a pas besoin de lubrification (et ne fonctionne pas lubrifié [3]). Mais il retient les inconvénients de l'échappement Robin qui sont indépendants de la sécurisation : il n'est pas toujours auto-démarrant après panne sèche.

L'échappement AP présente certains problèmes supplémentaires. La sortie du dard du plateau est telle que les tolérances mécaniques sont très serrées et il y a possibilité de collision entre le dard et le plateau dans certaines combinaisons défavorables de tolérances. En partie à cause de son mécanisme de sécurisation, l'échappement AP nécessite des tolérances plus précises que celles de l'échappement à ancre, ce qui a rendu l'industrialisation de l'échappement très difficile.

La démarche de Daniels

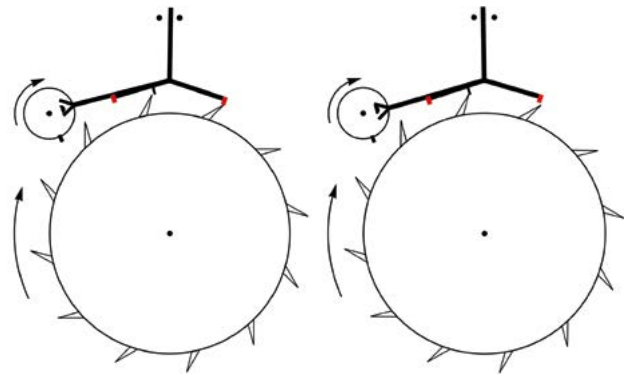
George Daniels (1926-2011) décrit plusieurs nouveaux échappements dans son livre *La Montre* [7], y compris son célèbre échappement coaxial actuellement commercialisé par Omega et détaillé ci-dessous. Daniels a conçu son échappement dans le but d'éliminer la lubrification indispensable à l'échappement à ancre.

L'échappement Daniels à double impulsion radiale

Son premier nouvel échappement à double impulsion radiale [7, p. 240] suit le principe de l'échappement Robin dans ses étapes d'entrée et d'impulsion directe. En revanche, le coup perdu est remplacé par une impulsion

indirecte mais radiale, qui ne nécessite donc pas, en principe, de lubrification.

La modification principale de cet échappement est l'ajout d'une dent d'impulsion indirecte sur l'ancre. Le nombre de dents de la roue d'échappement suit le principe décrit dans la section en page 28. Les étapes conceptuelles D1 à D6 de cet échappement sont identiques aux étapes R1 à R6 de l'échappement Robin. Les nouvelles étapes D7 et D8 sont illustrées ci-dessous.



D7. Roue d'échappement rattrapant l'ancre.

D8. Roue d'échappement impulsant l'ancre indirectement.

Cet échappement est donc similaire au Robin, à l'exception de la présence d'une double impulsion et l'absence de certains défauts de l'échappement à ancre. Daniels a construit cet échappement et l'a utilisé dans une montre de poche. Sa conclusion est qu'il donne une très bonne chronométrie et qu'il est auto-démarrant après panne sèche. De ce point de vue, cet échappement est supérieur à l'échappement Robin.

Daniels explique que la géométrie de cet échappement est très particulière, puisque la dent d'impulsion centrale de l'ancre nécessite une ouverture spéciale des bras de l'ancre ainsi qu'un très grand angle de rotation de 30° comparable à la levée du balancier. Pour cette raison, les palettes d'entrée et de sortie ne sont pas orthogonales au cercle de la roue d'échappement, ce qui augmente la résistance au dégagement.

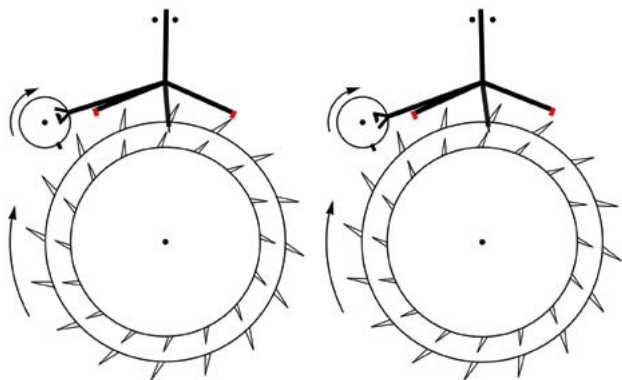
L'échappement coaxial

L'échappement coaxial est la pièce maîtresse de George Daniels qui le considère comme étant *la solution* aux problèmes de l'échappement à double impulsion radiale [6] [7].

Daniels ne met pas son échappement dans un cadre conceptuel. Dans notre interprétation, l'échappement coaxial appartient à la famille Robin, il est une extension de son échappement à double impulsion radiale, où la problématique de la dent d'impulsion indirecte a été résolue par l'ajout d'une deuxième roue d'échappement qui apporte une liberté quasi-totale du positionnement de cette dent. On remarque aussi que son échappement à double impulsion radiale est le cas spécial de l'échappement coaxial où

les deux roues d'échappement sont les mêmes (Daniels ne paraît pas être conscient de cette réduction).

Les étapes C1 à C6 de cet échappement sont identiques à celle de l'échappement Robin, et les étapes C7 et C8 similaires à celle de l'échappement Daniels à double impulsion radiale.



C7. Roue d'échappement rattrapant l'ancre. C8. Roue d'échappement impulsion indirecte.

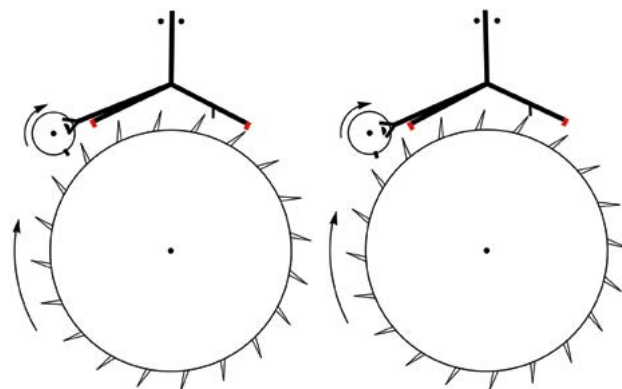
De notre point de vue, l'échappement coaxial n'est pas aussi satisfaisant que le suppose George Daniels. L'ajout d'une roue supplémentaire augmente la complexité, et ajoute de la masse à la roue d'échappement ce qui est nuisible à son accélération suite au dégagement. De plus, l'industrialisation de cet échappement a nécessité une lubrification, ce qui est contraire à la motivation originale de Daniels [14], tandis que l'échappement AP n'est pas lubrifié et ne fonctionne pas avec de l'huile [3].

L'impulsion virtuelle

Il y a une cinquantaine d'années, en filmant le fonctionnement de l'échappement à ancre avec une caméra à haute vitesse, les horlogers ont été surpris d'observer qu'après sa libération par le balancier, la roue d'échappement parcourt un chemin conséquent avant de rattraper l'ancre, voir [1, p. 26]. En réalité, presque un tiers de la longueur de la palette d'impulsion n'est pas utilisée car la dent d'échappement n'est pas encore en contact. C'est également le cas pour des impulsions directes où la roue d'échappement doit rattraper le balancier.

Ceci est généralement considéré comme un défaut et divers moyens sont utilisés pour le minimiser. Le concept d'impulsion virtuelle prend ce phénomène à contre-pied en réalisant un mécanisme où la roue d'échappement n'arrive pas du tout à rattraper l'ancre (ou le balancier) durant le fonctionnement normal de l'échappement. En revanche en cas de perte d'amplitude, de choc, ou de tendance à l'arrêt de l'échappement la roue entre en contact avec cette palette et permet l'auto-démarrage.

Nous considérons ci-dessous une configuration de l'échappement à double impulsion radiale de Daniels, où la palette d'impulsion n'est pas placée sur l'ancre à l'endroit défini par Daniels. Puisque nous n'insistons pas sur une impulsion indirecte radiale, cela donne davantage de liberté au positionnement de cette dent d'impulsion. Les étapes V1 à V6 sont similaires aux étapes R1 à R6 de l'échappement Robin.



V7. Roue d'échappement pour-chassant la dent d'impulsion. V8. Roue d'échappement ne rattrapant pas la dent d'impulsion.

Nous remarquons qu'en fonctionnement normal les étapes V7 et V8 de l'échappement à impulsion virtuelle sont conceptuellement identiques à l'étape R7 de l'échappement Robin, donc, en pratique, cet échappement fonctionne exactement comme l'échappement AP. Nous appelons cette réalisation de l'échappement à impulsion virtuelle l'échappement IV.

Le tracé de l'échappement à impulsion virtuelle

La démarche pour faire le tracé de l'échappement est de commencer par celui de l'échappement AP en lui ajoutant une dent d'impulsion, tout en préservant exactement la phase d'impulsion directe de l'échappement AP.



Fig. 2 : A gauche, l'échappement AP. A droite, le tracé de l'échappement IV.

Dans l'échappement AP, la roue d'échappement tourne de 15° pendant l'impulsion et de 3° pendant le coup perdu, ce qui fait 18° de rotation par période du balancier, et correspond à une roue d'échappement de 20 dents. Pour préserver la géométrie et le fonctionnement de l'impulsion de l'échappement AP, nous avons gardé la rotation de 15° pendant l'impulsion directe. Si l'on suppose qu'une impulsion indirecte nécessite autant de temps qu'une impulsion directe, cela implique une rotation de 15° de la roue d'échappement, donc 30° par période, ce qui donne une roue d'échappement de 12 dents. Cela correspond exactement aux dents de l'échappement à double impulsion radiale de Daniels, et ainsi explique son choix dans notre cadre conceptuel. Pour avoir une roue d'échappement qui ne rattrape pas le balancier à amplitude normale, il faut une roue d'échappement qui a moins de 20 dents et plus de 12 dents. Nous avons choisi un tracé basé sur une roue d'échappement de 16 dents, ce qui donne une rotation de 7.5° de la roue d'échappement pendant l'impulsion virtuelle.

Ainsi, les échappement AP et IV sont donc presque identiques, si ce n'est que l'échappement AP possède une roue d'échappement de 20 dents et l'échappement IV une roue d'échappement de 16 dents ainsi qu'une dent d'impulsion indirecte près du pivot de l'ancre.

Sécurisation et auto-démarrage

La nouvelle dent d'impulsion de l'échappement à impulsion virtuelle donne une contrainte géométrique similaire à celle d'un échappement à double coup, donc on peut s'attendre à une sécurisation améliorée. Les tolérances très serrées entre la jupe et le dard de l'échappement AP devraient être ainsi relaxées.

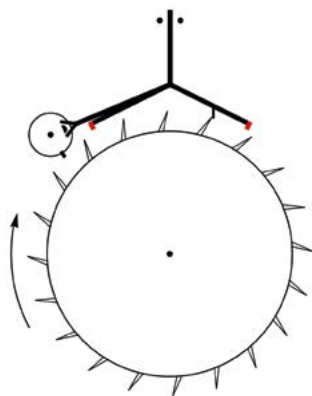


Fig. 3: Auto-démarrage sur plan d'impulsion indirecte (balancier arrêté).

L'échappement à impulsion virtuelle devrait aussi améliorer l'auto-démarrage suite à une panne sèche. Le défaut des échappements à coup perdu est de ne pouvoir auto-démarrer que si la roue d'échappement repose sur la dent d'impulsion directe. En revanche, s'il y a une impulsion virtuelle, il y a

aussi auto-démarrage à partir du moment où la montre s'est arrêtée, avec la roue d'échappement qui repose sur la dent d'impulsion indirecte ainsi qu'illustré par la figure 3. Nous constatons, dans ce cas, que si la roue d'échappement subit un couple moteur, celle-ci va faire basculer l'ancre qui va rattraper le balancier immobile et lui donner une impulsion que l'on suppose suffisante pour faire redémarrer la montre.

Puisque les contraintes géométriques de l'échappement à impulsion virtuelle sont similaires à celles de l'échappement à double impulsion de George Daniels, son affirmation concernant l'auto-démarrage de son échappement donne une indication de la validité de notre concept.

L'impulsion à la demande

Le principe de l'impulsion virtuelle est proche de l'*impulsion à la demande* des horloges de précision, où une impulsion ne se fait pas nécessairement à chaque période, mais seulement quand l'amplitude est suffisamment faible. La différence entre l'impulsion virtuelle et l'impulsion à la demande est que l'impulsion virtuelle est une impulsion secondaire et ne s'effectue pas en fonctionnement normal tandis que l'impulsion à la demande est la seule impulsion, elle se produit donc en fonctionnement normal.

L'impulsion à la demande est utilisée pour les oscillateurs à haut facteur de qualité où la force de l'impulsion est réduite en raison de la faible dissipation d'énergie par oscillation. Un principe énoncé par Rawlings et Woodward est qu'il est avantageux dans ce cas d'impulser moins souvent parce qu'une impulsion forte est plus facile à doser qu'une impulsion faible [15, p. 146] [16, p. 21].

L'impulsion à la demande a été introduite en 1842 par Matthäus Hipp (1813-1893), un inventeur allemand qui a fait carrière en Suisse. Bien connu pour ses inventions électriques, il était appelé «l'Edison suisse». Il a breveté son système en Angleterre en 1865 et son principe découle du *Hipp toggle* décrit dans [15, p. 135], pour lequel une animation est disponible sur Internet [11]. L'horloge de Hipp a été fabriquée à Neuchâtel au 19^e siècle. Un rapport d'Adolphe Hirsch (1830-1901), directeur de l'Observatoire de Neuchâtel, décrit les bons résultats obtenus par cette horloge [12].

Validation expérimentale

Une validation expérimentale du concept de l'impulsion virtuelle a été conduite à l'aide d'un démonstrateur. Une caméra haute vitesse a filmé l'étape V8 de l'échappement afin d'observer si la roue d'échappement rattrape la dent d'impulsion indirecte et si la fourchette impulse le balancier. Différents poids moteurs ont été utilisés menant à des amplitudes différentes du balancier. Un poids plus lourd donne une amplitude plus grande, donc rend le rattrapage par la roue d'échappement plus difficile.

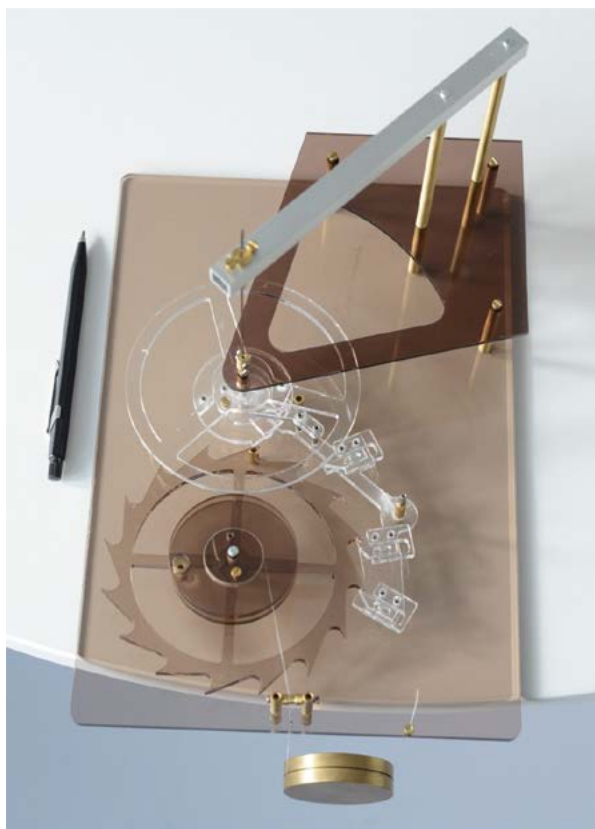


Fig. 4 : Démonstrateur de l'échappement IV.

Un démonstrateur de l'échappement IV a été construit en plexiglas, avec, pour force motrice, un poids moteur et pour force de rappel du balancier, un fil de torsion, voir figure 4.

Protocole expérimental

Le démonstrateur de l'échappement IV a été analysé en phase V8 avec une force motrice, de façon à modifier l'amplitude du balancier. Dix masses motrices différentes ont été testées.

	Masse [g]
m_1	69.68
m_2	92.21
m_3	114.80
m_4	137.39
m_5	159.95
m_6	182.48
m_7	205.06
m_8	227.64
m_9	272.75
m_{10}	346.12

Après avoir fixé la masse motrice sur le fil moteur, la maquette est mise en fonctionnement. Le dispositif d'observation est composé d'une caméra haute vitesse NX4-S3 de la marque IDT, du logiciel Motion Studio IDT et d'un éclairage LED.

L'acquisition vidéo est activée 30 secondes après le démarrage de la maquette, afin que le mouvement soit stabilisé. La fréquence d'acquisition de la caméra haute vitesse est paramétrée à 1'000 images par seconde, puis les vidéos sont lues à une vitesse de 15 images par seconde. Ce protocole est répété pour chacune des masses motrices étudiées. Le fonctionnement de l'échappement pendant l'étape V8, qui correspond à l'étape AP8 de l'échappement AP, est examiné par capture d'image, les détails de ces images sont donnés dans la figure 5.

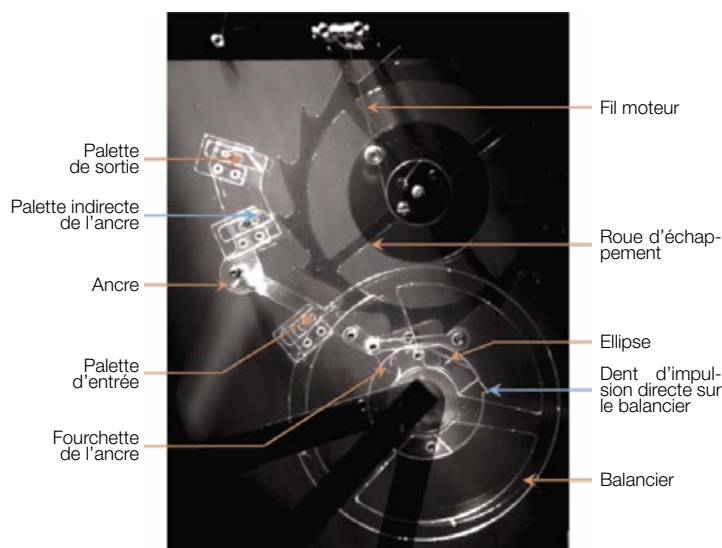


Fig. 5 : Détails d'une capture d'image.

Observations

Grâce aux vidéos, les différentes phases du mouvement de l'échappement peuvent être observées. Au cours d'une période du balancier, les étapes de l'échappement IV sont observées, seule l'étape V8 concerne cette étude et elle peut être divisée en deux phases :

- **V8.a.** Roue d'échappement rattrape ou ne rattrape pas l'ancre.
- **V8.b.** Fourchette impulse ou n'impulse pas l'ellipse du balancier.

Les observations sont illustrées pour les cas des masses m_2 , m_5 , m_{10} . Ces exemples ont été sélectionnés à titre indicatif, car ils correspondent aux cas «léger», «intermédiaire» et «lourd», respectivement. Cette limitation à trois cas parmi dix est choisie étant donné que seul le comportement qualitatif de l'échappement est important dans ce contexte. Nous observons dans le cas m_2 , la présence d'un contact important entre la roue d'échappement et la dent d'impulsion. De plus, la vidéo indique que l'ellipse reçoit une impulsion importante par la fourchette et accélère. Dans le cas m_{10} , il y a très peu de contact entre la roue d'échappement et la dent d'impulsion. La vidéo révèle que l'ellipse ne reçoit pas d'impulsion de la fourchette. Dans le cas m_5 , il y a peu de contact entre la roue d'échappement et la dent d'impul-

sion. La vidéo indique que l'ellipse reçoit une impulsion faible de la fourchette et n'accélère pas ou très peu. Ceci valide le

concept de l'impulsion virtuelle. Les fichiers vidéos sont disponibles sur le site du laboratoire instantlab.epfl.ch.

Masse	Contact roue/dent	Contact fourchette/balancier	Amplitude du balancier
m_1, m_2	Contact important	Impulsion importante, balancier accélère	$97^\circ (m_1), 120^\circ (m_2)$
m_3, m_4, m_5	Contact moins important	Impulsion faible, balancier accélère peu	$148^\circ (m_3), 169^\circ (m_4), 174^\circ (m_5)$
m_6, m_7, m_8	Contact faible	Impulsion faible, balancier n'accélère pas	$213^\circ (m_6), 232^\circ (m_7), 247^\circ (m_8)$
m_9, m_{10}	Contact très faible	Pas d'impulsion, balancier n'accélère pas	$275^\circ (m_9), 334^\circ (m_{10})$

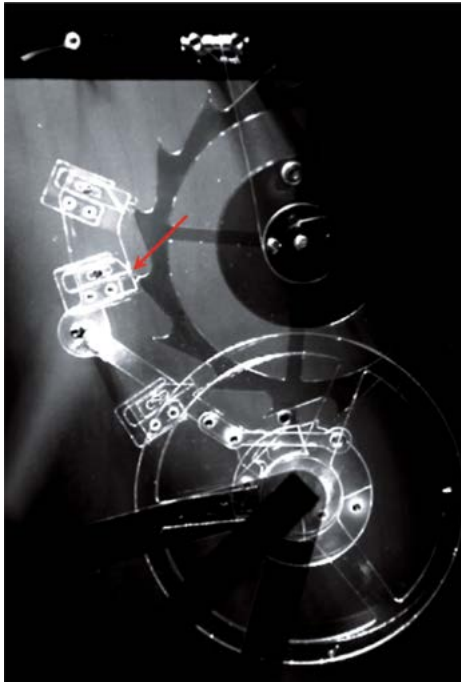


Fig. 6 : Étape V8.a avec masse m_2

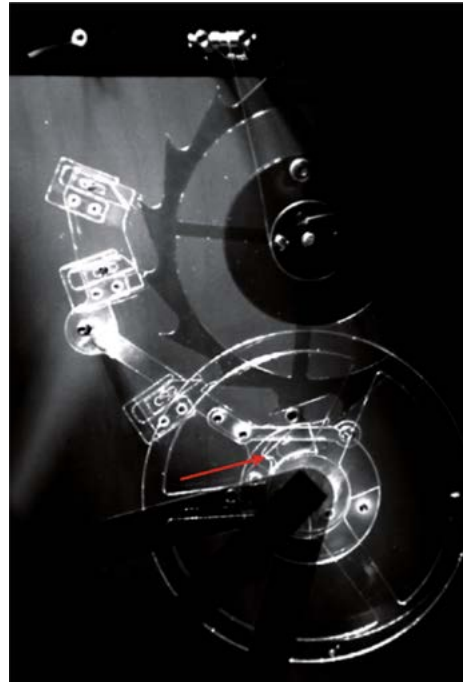


Fig. 7 : Étape V8.b avec masse m_2

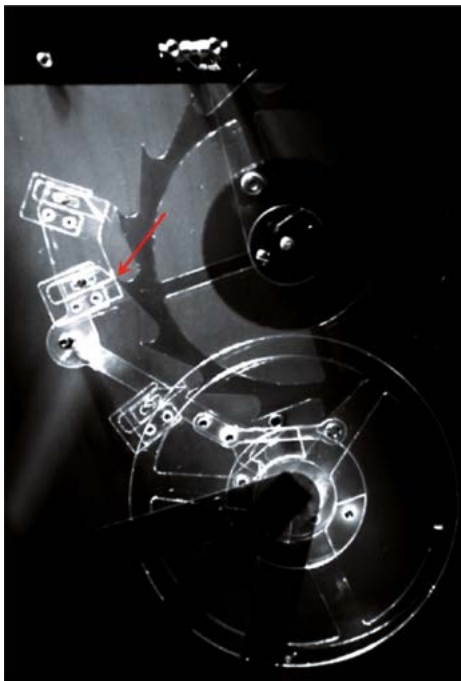


Fig. 8 : Étape V8.a avec masse m_{10}

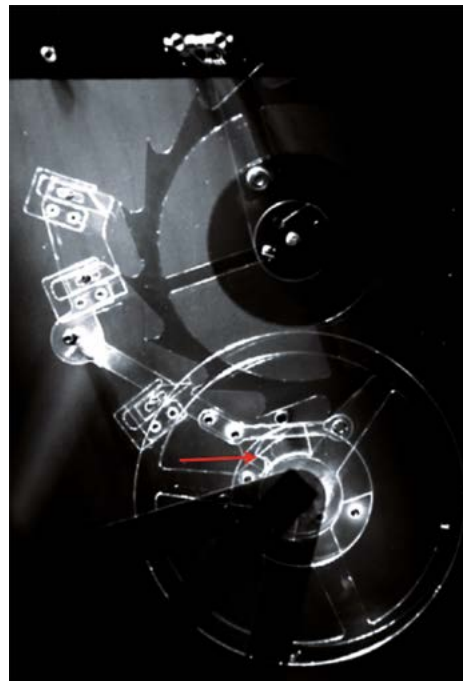


Fig. 9 : Étape V8.b avec masse m_{10}

Conclusion

Les observations de la dynamique de l'échappement à impulsion virtuelle réalisées au moyen d'une caméra rapide sur une maquette grande échelle en plexiglas sont concordantes avec le nouveau concept de l'*impulsion virtuelle* tel que décrit dans le présent article. Une validation complète du concept nécessitera la construction d'un prototype à l'échelle de la montre-bracelet. ■

Références

- [1] S. AUBRY, *Théorie des échappements*, Éditions de la Fédération des Écoles Techniques, 2016.
- [2] PATRICK AUGEREAU, *Dispositif de verrouillage pour pièce d'horlogerie*, Brevet EP 1122 617 B1, déposé le 7 février 2000 et publié le 1 août, 2007.
- [3] PATRICK AUGEREAU, communication personnelle.
- [4] PAUL M. CHAMBERLAIN, *It's About Time*, The Holland Press, London, 1964.
- [5] T. CONUS et A. CABEZAS JURIN, *Échappement à détente pour pièce d'horlogerie*, Brevet EP 1 708 046 B1, déposé le 30 mars 2005 et publié le 26 mars 2008.
- [6] GEORGE DANIELS, *The Practical Watch Escapement*, Premier Print Ltd., Isle of Man, 1994.
- [7] GEORGE DANIELS, *La Montre*, troisième édition, Watchprint.com, 2011.
- [8] *The detent escapement: from marine chronometers to wristwatches*, www.timeandwatches.com/p/the-detent-escapement-from-marine.html. Consulté le 4 juillet 2017.
- [9] RUPERT T. GOULD, *The Marine Chronometer*, Second Edition, The Antique Collector's Club, Woodbridge, England, 2013.
- [10] CHARLES GROS, *Échappements d'horloges et de montres*, réédité par Watchmakers Publishing, 2013.
- [11] User «RODALCO2007», *Hipp Toggle*, youtu.be/lmx5iy4qwhl. Consulté le 11 mai 2015.
- [12] ADOLPHE HIRSCH, *Rapport du directeur de l'observatoire cantonal de Neuchâtel à la commission chargée de l'inspection pour l'année 1880*, dx.doi.org/10.5169/seals-88155. Consulté le 11 mai 2015.
- [13] OLIVIER LÄSSER, *Analyse, synthèse et création d'échappements horlogers par la théorie des engrenages*, Thèse doctorale 6189, EPFL, 2014.
- [14] WALT ODETS, *The Omega deVille Co-Axial, Part 4*, www.timezone.com/2002/09/16/the-omega-deville-co-axial-part-4. Consulté le 16 octobre 2017.
- [15] A. L. RAWLINGS, *The Science of Clocks & Watches*, Third Edition, British Horological Institute, Upton UK, 1993.
- [16] PHILIP WOODWARD, *My Own Right Time*, Oxford University Press, 1995.