

Zeitschrift: Actes de la Société jurassienne d'émulation
Herausgeber: Société jurassienne d'émulation
Band: 103 (2000)

Artikel: Simulation dynamique d'échappements de montres
Autor: Falco, Lucien
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-684865>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Simulation dynamique d'échappements de montres

Lucien Falco

Introduction

La montre mécanique, dont la mise au point remonte à de très nombreuses années, connaît actuellement un regain d'intérêt. L'oscillateur, qui est l'élément fondamental responsable de la mesure du temps, est constitué par un balancier associé à un ressort spiral. Les oscillations du balancier-spiral sont entretenues par une succession d'impulsions mécaniques. L'énergie de la montre est stockée dans un barillet contenant un gros ressort spiral. Cette énergie de rotation doit donc être transformée en impulsions mécaniques; c'est le rôle de l'échappement. Cet échappement est généralement composé d'une roue (roue d'échappement) et d'une pièce effectuant un mouvement pivotant de va-et-vient (ancrer). Dans les temps passés, leur fonctionnement était connu de manière plutôt empirique, bien que plusieurs horlogers aient essayé de décrire mathématiquement ce fonctionnement [1,2]. Les équations ainsi trouvées, sur la base d'hypothèses simplificatrices, donnaient des résultats relativement satisfaisant.

Grâce aux progrès de l'informatique, des ordinateurs performants sont actuellement disponibles. Parallèlement, des logiciels de calcul et de simulation les plus divers, notamment pour la mécanique, sont apparus sur le marché. Il paraît intéressant de chercher à appliquer ces méthodes numériques les plus récentes à l'étude et à la simulation de la dynamique des mouvements en micromécanique. L'objet de cette étude est la modélisation d'un échappement à ancre au moyen d'un logiciel de simulation. Comme la vérification expérimentale de l'exactitude des simulations n'est pas aisée, un examen critique des résultats et des tendances est proposé.

Echappement à ancre

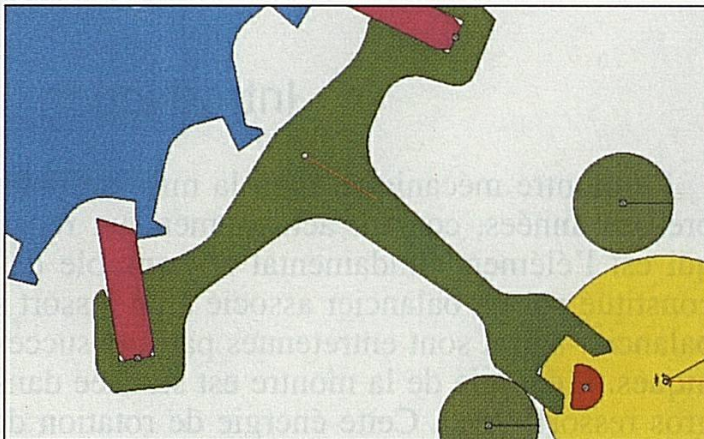
Le mécanisme de transfert d'énergie entre la roue d'échappement et le balancier est relativement complexe. La roue d'échappement, actionnée

par le ressort de barillet et par l'intermédiaire d'un rouage, transmet son mouvement à l'ancre grâce aux levées. L'ancre pivote et pousse la cheville de plateau, solidaire du balancier. Cette fonction est réalisée par une succession très rapide de 5 chocs, entre lesquels des phases de glissement peuvent exister. Ces chocs produisent le «tic» ou le «tac» caractéristique des montres mécaniques.

Quelques images décrivant cette évolution sont représentées à la figure 1.

Fig. 1 : Etapes du fonctionnement de l'échappement.

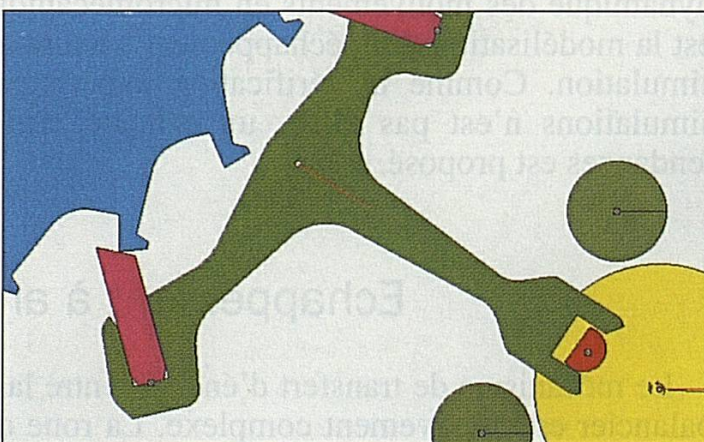
a) La dent de la roue d'échappement est appuyée contre la levée. La cheville de plateau liée au balancier arrive dans la fourchette de l'ancre.



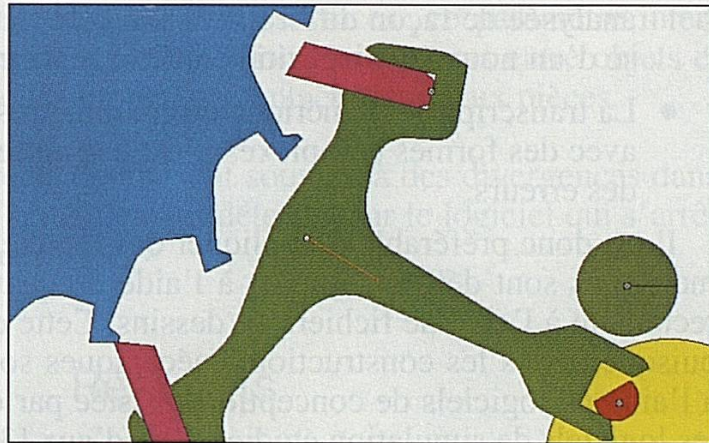
b) La cheville de plateau produit le pivotement de l'ancre.



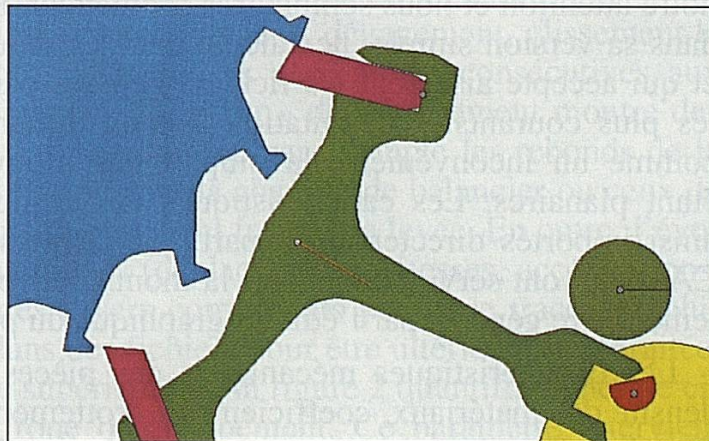
c) La dent de la roue d'échappement est libérée et se met à glisser le long du plan d'impulsion de la levée. L'énergie motrice est transmise au balancier par l'intermédiaire de l'ancre.



d) La dent de la roue d'échappement glisse contre l'arête de la levée. La phase de transmission d'énergie se termine.



e) La dent est complètement libérée, la dent suivante tombe contre la seconde levée. Fin de l'opération.



Du point de vue fonctionnel, il est important d'arriver à quantifier les échanges d'énergie, afin de connaître par exemple: quelle fraction d'énergie est transmise par choc ou par frottement, quel est le rendement global de l'échappement, quelle est l'influence des paramètres mécaniques comme le coefficient de frottement, l'inertie des composants, etc.

Logiciel de simulation

Il existe sur le marché de nombreux logiciels mathématiques, tels que par exemple Mathematica® ou Mathcad®, qui permettent de résoudre des équations algébriques ou différentielles complexes. Ces logiciels, quoique très intéressants, présentent dans notre cas deux inconvénients majeurs:

- Ils sont complexes à programmer dans le cas de simulations d'objets mécaniques multiples qui entrent temporairement en liaison. La description mathématique des chocs, des frictions, doit être

analysée de façon différenciée selon les situations et chaque analyse d'un nouveau dispositif doit être reprise quasiment à la base.

- La transcription numérique des paramètres géométriques des objets avec des formes complexes n'est pas aisée à réaliser et est sujette à des erreurs.

Il est donc préférable d'appliquer des logiciels où les paramètres géométriques sont définis non pas à l'aide d'équations explicites, mais directement à l'aide de fichiers de dessins. Cette démarche paraît naturelle puisque toutes les constructions mécaniques sont actuellement réalisées à l'aide de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO). Parmi les logiciels de simulation étudiés, l'un d'eux [3] retient particulièrement notre attention et nous semble très prometteur. Il s'agit d'un logiciel qui, dans sa version simple, ne calcule que des mouvements planaires (2D), et qui accepte aisément les fichiers générés par les logiciels de dessins les plus courants. La limitation à deux dimensions n'apparaît pas ici comme un inconvénient, la plupart des mouvements dans la montre étant planaires. Les caractéristiques des composants mécaniques sont ainsi importés directement à partir de fichiers créés par des outils de CAO, qui ont servi à concevoir la montre. Ils peuvent évidemment également être générés par l'éditeur graphique du programme lui-même.

Les caractéristiques mécaniques des pièces sont prises en compte: densité des matériaux, coefficients de frottement, coefficients de restitution des chocs, etc. L'effet de la gravité peut également être inclus. Le logiciel calcule ensuite l'évolution temporelle du système en intégrant les équations différentielles de la dynamique pour chacune des pièces représentées, avec les conditions aux limites imposées (pivots, appuis, contacts entre composants, chocs, frottements secs ou visqueux, etc.). Les actions extérieures, comme un couple moteur ou un effet de ressort, peuvent également être simulées.

Le fonctionnement correct du logiciel repose cependant sur la définition de quelques paramètres d'intégration dont le choix résulte de compromis parfois délicats:

- L'incrément temporel de l'intégration: cet incrément doit être choisi assez faible pour rendre compte des phénomènes rapides (chocs); s'il est trop grand, la convergence du calcul n'est pas assurée; un intervalle très court conduit à un grand nombre de pas d'intégration, donc à un temps de calcul accru et à une augmentation de l'erreur de calcul.
- La précision de calcul: une grande précision de calcul est nécessaire pour éviter l'accumulation d'erreurs qui peuvent devenir gênantes; mais une trop grande précision provoque également une augmentation du temps de calcul.

- La tolérance de positionnement des surfaces: ce paramètre intervient principalement dans la définition des contacts entre objets et chocs, elle fixe donc les limites de contact entre deux pièces.

Des paramètres incorrects conduisent souvent à des divergences dans les calculs. Ceux-ci sont généralement détectés par le logiciel qui s'arrête avec un message d'erreur.

Résultats

Les graphes de la figure 2 ont été générés par ce logiciel [3] de simulation. Les différentes phases du mouvement: dégagement, glissement le long du plan d'impulsion, ainsi que les oscillations consécutives aux chocs sont aisément distinguées. Le «film» de l'événement montre des effets plus ou moins prévisibles, comme par exemple les rebonds de la fourchette lorsqu'elle est frappée par la cheville de balancier ou ceux de la roue d'échappement lorsqu'elle vient frapper la levée. En outre, l'évolution des grandeurs dynamiques (déplacements, vitesses, accélérations, forces de contact, etc.) des divers composants peut être tracée graphiquement ou mémorisée dans des fichiers pour être ultérieurement traitée.

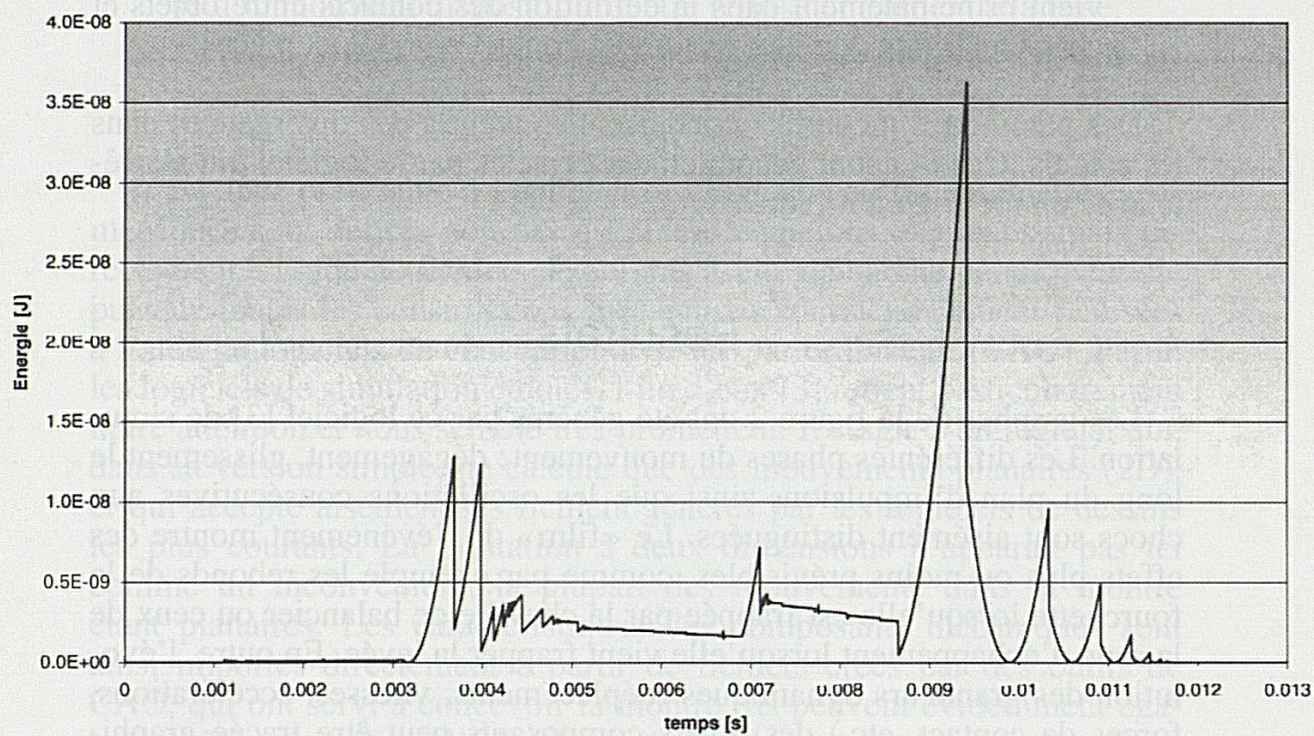
Par exemple, la courbe supérieure de la figure 2 quantifie l'énergie cinétique absorbée par la roue d'échappement. Ce paramètre intervient comme une perte dans le bilan total d'énergie. La courbe inférieure donne l'évolution de l'énergie cinétique du balancier. Le choc contre l'ancre réduit d'abord son énergie, avant que la transmission du mouvement depuis la roue d'échappement ne vienne en apporter.

Outre les questions énergétiques, il est également possible d'examiner les effets du transfert d'énergie sur l'isochronisme du mouvement. La marche du balancier subit un déphasage consécutif à ce transfert, comme montré sur la figure 3.

Cette analyse est effectuée sous diverses conditions (couple moteur, inertie des composants, coefficient de restitution des chocs, coefficient de frottement, etc.) pour aboutir à une connaissance globale de l'influence de ces paramètres sur le rendement de la transmission et sur le défaut d'isochronisme.

Les principaux résultats ont été confirmés par des mesures effectuées sur des échantillons au moyen d'un capteur optique de déplacement et d'une caméra à haute vitesse.

Energie cinétique de la roue d'échappement



Energie cinétique du balancier

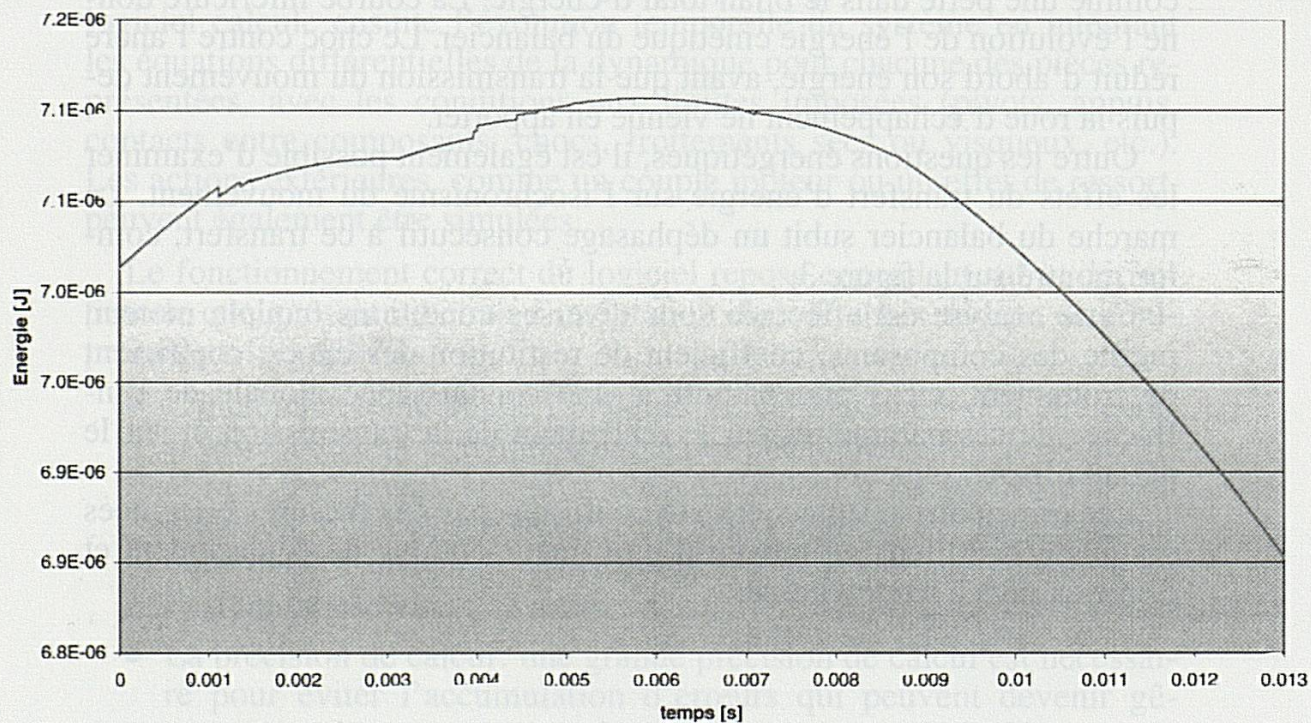


Fig. 2: Energie cinétique de la roue d'échappement et du balancier.

Vitesse angulaire du balancier

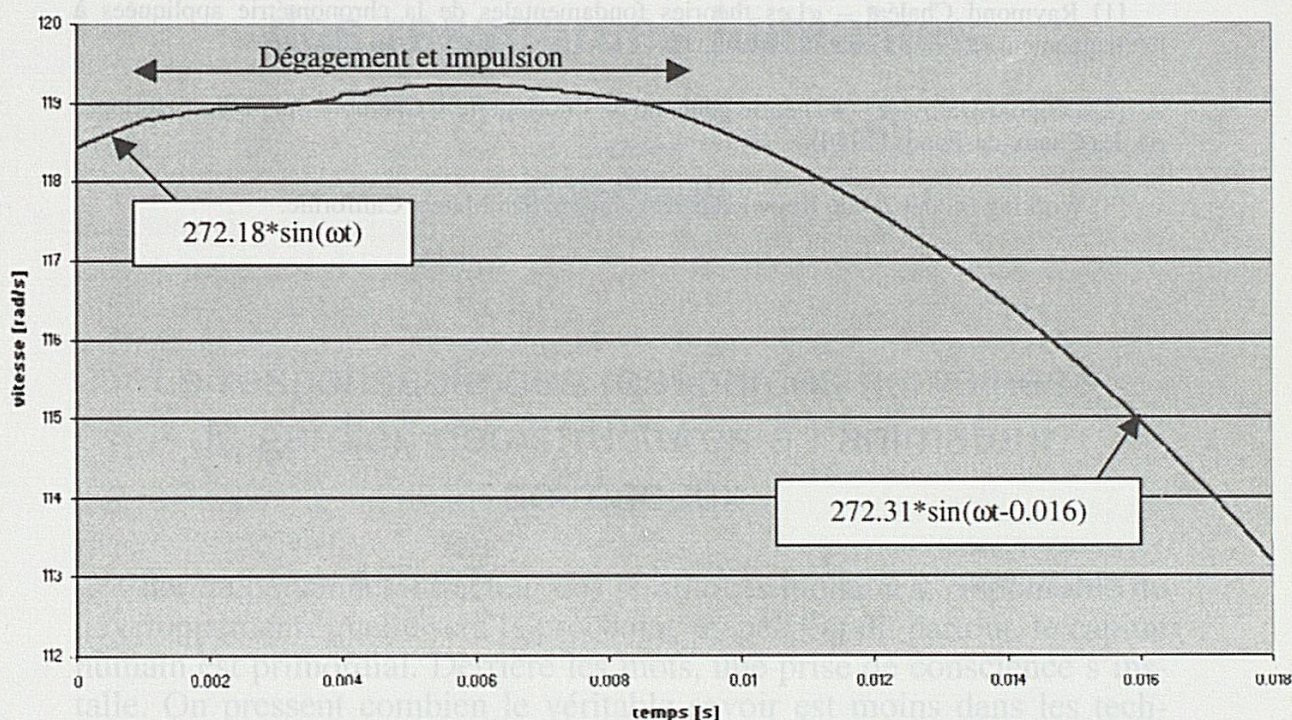


Fig. 3: Analyse de la perturbation de marche du balancier due au transfert d'énergie.

Conclusions

Les récents progrès des ordinateurs et des méthodes de calculs numériques fournissent maintenant des outils de simulation très intéressants pour le domaine de la microtechnique et, plus spécifiquement de l'horlogerie. En permettant en particulier d'effectuer des simulations de la dynamique des mécanismes, ils mettent en évidence des effets fins intervenant dans les systèmes, par exemple des rebonds lors des chocs. En plus des paramètres cinématiques, ils donnent des renseignements sur les énergies mises en œuvre, autorisant ainsi l'établissement de bilans énergétiques. Ils montrent également l'influence de paramètres tels que l'inertie des différentes pièces.

Lucien Falco (Neuchâtel) enseigne à l'Ecole d'ingénieurs du canton de Neuchâtel (EICN-HES).

NOTES

[1] Raymond Chaléat – «Les théories fondamentales de la chronométrie appliquées à l'échappement», Conférence Internationale de Chronométrie 1959, p. 265-297.

[2] Léopold Defossez – «Théorie générale de l'horlogerie», Chambre Suisse de l'Horlogerie, La Chaux-de-Fonds (1950).

[3] Working Model 2D de Knowledge Revolution, San Mateo, Californie.