

Le GyroTracker, nouvelle plateforme pour la caractérisation de l'organe réglant des montres mécaniques

Dominique Solignac^{1,2}, Christophe Yamahata¹, Cristian Ciressan¹, Jean-Philippe Robert^{1,3}, Mohan Rusconi²
¹ VeoSwiss Technologies Sàrl, Parc Scientifique d'Ecublens, PSE-A, CH-1015 Lausanne, Suisse
² IcoFlex Sàrl, Parc Scientifique d'Ecublens, PSE-A, CH-1015 Lausanne, Suisse
³ Berney Précision SA, CH-1341 L'Orient, Suisse

Résumé

Le GyroTracker est un chronocomparateur optoélectronique qui permet aux laboratoires horlogers d'effectuer des analyses complètes de calibres mécaniques dans toutes les positions de contrôle. L'instrument permet de suivre l'élongation du balancier en temps réel pour en mesurer l'isochronisme. L'interface graphique donne notamment accès à la marche instantanée (fréquence d'oscillation), à l'amplitude et au facteur de qualité, et ceci indépendamment du type de balancier, du nombre de bras et de l'angle de levée. La mesure est réalisée par analyse vidéo (corrélation d'images) au niveau de la serge. Celle-ci peut être discontinue, de forme et de couleur variées (exemples: traitement DLC noir, aspect poli-miroir). L'instrument permet ainsi de mesurer des élongations du balancier allant de 0° à l'infini et des fréquences d'oscillation jusqu'à 50 Hz. Outre le système balancier-spiral traditionnel, le GyroTracker est également capable de caractériser les tourbillons et les carrousels dont le balancier se situe au centre de la cage. Notre système est puissant et très flexible, il peut être installé sur une chaîne de production pour le contrôle qualité – y compris pour la qualification des mouvements emboîtés – ou utilisé pour l'appairage du couple balancier-spiral.

Abstract

The GyroTracker is an optoelectronic watch timing machine that allows watch-testing laboratories to perform comprehensive analyzes of their mechanical movements in all measuring positions. The instrument performs real-time tracking of the balance wheel elongation to measure isochronism. The graphical user interface gives access to the instantaneous watch rate (oscillation frequency), to the amplitude and to the quality factor, irrespective of the type of balance wheel, the number of arms, and the lift angle. The measurement is performed by video analysis (image correlation) on the balance rim. The rim may be discontinuous, of various shapes and color (e.g., black DLC treatment, mirror-polished). The instrument can measure balance elongations from 0° to infinity and oscillation frequencies up to 50 Hz. In addition to the traditional sprung balance system, the GyroTracker is also able to characterize the tourbillons and karussells whose balance wheel is located at the center of the cage. Our system is powerful and flexible; it can be installed on a production line for quality control – including the qualification of cased movements – or used for balance and hairspring matching.

1 Introduction

Un calibre de montre mécanique est un système micromécanique complexe dont l'assemblage représente un travail de longue haleine. Son réglage précis est une opération délicate qui nécessite de contrôler les performances et la stabilité du mouvement et d'ajuster les pièces en conséquence. Malgré les nombreux instruments de mesure à disposition, et qui sont décrits dans l'état de l'art (section 1.2), aucun ne remplit entièrement les besoins actuels ou pour les développements horlogers futurs. Afin de satisfaire ces besoins, nous proposons un nouveau chronocomparateur optoélectronique dénommé GyroTracker. Le principe et les fonctionnalités de l'instrument seront décrits puis illustrés par des mesures expérimentales effectuées sur différents calibres (section 2). La précision de l'instrument sera quantifiée au travers d'une étude sur l'incertitude de mesure de la marche liée aux perturbations des signaux: Deux modèles de perturbations seront proposés en vue de valider la pertinence des mesures effectuées par le GyroTracker (section 3).

1.1 Caractéristiques principales de l'organe réglant d'un calibre mécanique

1.1.1 Marche et amplitude

L'organe réglant, constitué par le balancier et le spiral, est le cœur de la montre mécanique. Le balancier oscille autour de son centre d'inertie dans un mouvement de va-et-vient à une fréquence bien définie qui est fonction de la mécanique du calibre. Une légère variation de cette fréquence et c'est la cadence du mécanisme qui se rallonge ou se raccourcit. Pour quantifier l'avance ou le retard du mouvement, l'horloger a introduit la marche, M , exprimée en secondes par jour. Une marche positive indique que le temps mesuré est supérieur au temps de référence. Toute perturbation, qu'elle soit d'origine externe comme par exemple l'attraction terrestre, ou interne (c'est-à-dire provenant du mécanisme), influe sur l'oscillation du balancier et donc sur la marche. L'amplitude, définie comme l'élongation angulaire extrême du balancier, influence sensiblement la marche. A chaque oscillation, le balancier dissipe de l'énergie à cause des frottements, et si celle-ci ne lui était pas restituée, il perdrait rapidement de

l'amplitude. L'échappement, formé principalement de l'ancre et de la roue d'ancre, a pour fonction d'entretenir et de compter les oscillations du balancier. A chaque alternance de l'oscillateur, il redistribue l'énergie fournie par le ressort du barillet via le train d'engrenages. C'est lors des chocs de l'échappement qu'une impulsion motrice est donnée au balancier pour compenser les pertes énergétiques. Cependant, l'énergie donnée par l'échappement n'est pas constante et dépend de l'armage du barillet. Avec le désarmage, l'impulsion donnée au balancier devient plus faible et l'amplitude diminue.

L'art de l'horloger consiste à concevoir et à régler le calibre de manière à ce que la perte d'amplitude affecte le moins possible l'isochronisme de la montre. Une conception judicieuse permettra de garantir une marche stable et proche de zéro pendant toute la durée prévue entre deux remontages.

1.1.2 Facteur de qualité de l'oscillateur

La marche est affectée par les fluctuations de l'amplitude du balancier et, pour augmenter la stabilité de l'oscillateur, l'horloger cherche à réduire les pertes énergétiques par alternance (W) par rapport à l'énergie élastique accumulée aux amplitudes extrêmes (W_E). En d'autres termes, il cherche à augmenter le facteur de qualité $Q = 2\pi W_E/W$ de l'oscillateur. L'erreur relative de la période d'oscillation est inversement proportionnelle au facteur de qualité. Afin de dissocier les pertes dues aux rouages et à l'échappement, le facteur de qualité est mesuré en mode libre, sans l'ancre. Il vaut typiquement 100 à 300 pour un balancier-spiral [1]. L'effet bénéfique d'un facteur de qualité élevé va au-delà d'une stabilisation de la marche, il permet aussi d'augmenter la réserve de marche.

1.2 Etat de l'art : Caractérisation de l'organe réglant

En 1977, Wüest a fait un inventaire des différentes méthodes de contrôle disponibles ou potentiellement exploitables pour la caractérisation de l'organe réglant [2]. Il recensait, entre autres, la méthode du chronocomparateur acoustique, différentes méthodes optiques, ou encore des méthodes basées sur des phénomènes inductifs ou capacitifs. Depuis, les progrès techniques ont permis l'émergence de méthodes optoélectroniques et, à ce jour, la caractérisation de l'organe réglant se base essentiellement sur deux principes de mesures sans contact :

- Mesures acoustiques obtenues à partir des bruits de l'échappement ;
- Mesures optiques effectuées au niveau du balancier (serge ou bras).

1.2.1 Mesures acoustiques

Le principe acoustique reste le plus couramment utilisé pour le réglage et le contrôle des calibres. La mise en œuvre est aisée et rapide. Il fournit la marche instantanée et l'amplitude estimée. En outre, il permet de mesurer le repère correspondant au décalage de la cheville de plateau par rapport à la position des étocaux ou des goupilles de limitation. Cette technique dépend intrinsèquement du type d'échappement. A part quelques exceptions, ce principe de mesure est bien adapté pour les échappements à ancre suisse, mais cela reste un facteur limitant quand on sait que de nombreuses innovations horlogères sont réalisées au niveau de l'organe de distribution d'énergie. De plus, l'amplitude est estimée à partir de l'angle de levée théorique fourni par le constructeur, typiquement compris entre 38° et 55°. Pour un type de calibre donné, l'angle de levée réel peut varier de quelques degrés d'une construction à l'autre [3]. Enfin, ce principe ne permet pas de mesurer le facteur de qualité de l'oscillateur.

1.2.2 Méthodes optiques

Les différents principes optiques permettant de caractériser l'organe réglant des calibres mécaniques peuvent être regroupés en deux catégories :

- Mesures ponctuelles à partir d'un faisceau lumineux ;
- Analyse d'images numériques.

Dans la première catégorie, on trouve le microbalisomètre développé par le LSRH (Laboratoire Suisse de Recherche Horlogère) dans les années 1970. Cette technique est basée sur la détection de marques faites sur la serge du balancier à l'aide d'un faisceau lumineux. La gravure est formée de deux stries dont le passage est repéré par un capteur optique. L'instrument permet de contrôler des défauts au niveau des engrenages car ceux-ci ont un effet sur la marche instantanée et sur l'amplitude des oscillations [4]. Cette technique n'est désormais plus utilisée car la gravure modifie le comportement général de l'organe réglant. Surtout, la dégradation de la surface du balancier n'est pas acceptable dans l'optique d'une commercialisation.

Afin d'éviter le marquage du balancier, Wüest a proposé dès 1977 une méthode photoélectrique de contrôle de l'organe réglant basée sur l'analyse des interruptions au niveau des bras du balancier [2]. Cette méthode permet en outre de mesurer le facteur de qualité aux grandes amplitudes. Plus tard, ce principe a été repris et amélioré avec l'utilisation d'un laser [4]. Les limites du système sont liées au principe de l'utilisation des bras du balancier. En effet, la mesure et son incertitude seront influencées par la largeur des bras, par le nombre de bras, N_b , et par les propriétés de réflexion des matériaux (état de surface de la platine et des bras du balancier). De plus, pour des oscillateurs à faibles amplitudes, A , typiquement $2A \leq 360^\circ/N_b$, la mesure n'est pas réalisable.

Plus récemment, un vélocimètre laser a été introduit pour la caractérisation de l'organe réglant. Il fonctionne sur le principe de l'effet Doppler et permet de mesurer le mouvement des éléments mobiles du calibre [5]. En particulier, il permet de déterminer la vitesse angulaire à partir de mesures faites au niveau de la serge du balancier pour en déduire la marche instantanée et l'amplitude. Il permet également de mesurer le facteur de qualité. Ce système comporte néanmoins des limitations, notamment liées à l'état de surface du mobile qui influence les performances des mesures. Le positionnement précis du point de caractérisation n'est pas aisé car il est effectué à l'œil nu.

L'analyse d'images appliquée à la caractérisation des calibres est la méthode optique qui s'est le plus fortement développée ces dernières années. Elle s'est imposée comme la technique de référence pour la mesure de la marche diurne sur les têtes de montres. C'est notamment la méthode employée par le COSC pour la certification des chronomètres [6]. Récemment, l'analyse de l'organe réglant par vidéos prises à haute vitesse a été rendue possible grâce aux performances des caméras rapides et aux avancées techniques de la vision industrielle. Pour les mesures de la marche instantanée et de l'amplitude du balancier, un système dénommé vidéobalisomètre a été mis sur le marché [7]. Les mesures sont effectuées sans modification du balancier mais des structures géométriques, telles que des masselottes, doivent être présentes sur le balancier afin de positionner le référentiel et les points de repère qui sont utilisés pour la reconnaissance de forme. Selon les données du constructeur, la précision de la marche instantanée est de ± 1 s/j et celle de l'amplitude est de $\pm 0.5^\circ$. La précision des mesures résulte de la grande résolution spatiale et temporelle de ce système. Dans le mode mesure, la résolution spatiale est de 11 μm et la résolution temporelle est de 10 $\mu\text{s/j}$ (base de temps rubidium). Les mesures en

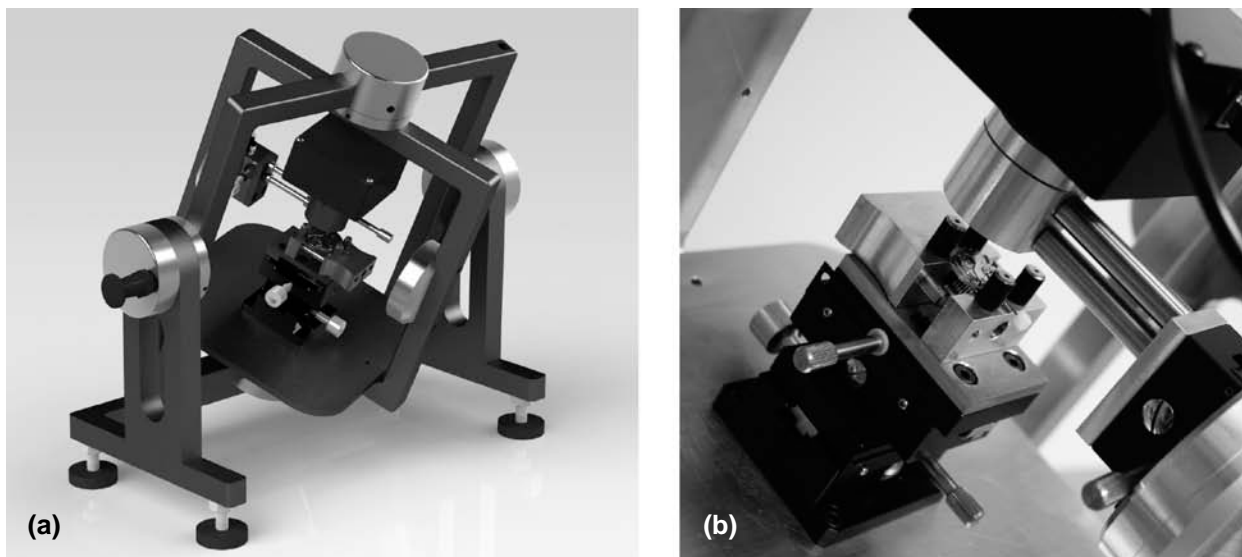


Fig. 1 Illustrations du GyroTracker. (a) Plateforme gyroscopique permettant de caractériser un mouvement mécanique dans toutes les positions de contrôle. (b) Mouvement maintenu dans un porte-calibre et placé sous la caméra.

mode libre permettent d'extraire le facteur de qualité de l'oscillateur. Bien adapté pour repérer des phénomènes transitoires sur une courte durée, le vidéobalisomètre demande de grandes capacités de stockage et de grandes puissances de calcul, surtout lorsque les mesures durent plusieurs jours. Cette grande quantité d'information à traiter rend difficile l'extraction des mesures en temps réel. Enfin, le coût de l'appareil de mesure demeure élevé.

Les différentes approches qui viennent d'être présentées illustrent le potentiel considérable des méthodes optiques, et notamment celles basées sur l'analyse d'images [8]. L'analyse d'images est incontestablement la plus flexible et la plus précise des approches [7].

2 Présentation du GyroTracker

2.1 Besoins des manufactures

L'organe réglant idéal est isochrone, c'est-à-dire que sa fréquence d'oscillation doit être indépendante de l'amplitude. Les caractéristiques de l'oscillateur ne doivent notamment pas être affectées par la gravité terrestre, par des variations de la température, par les champs magnétiques, par des accélérations linéaires ou angulaires. Les pertes énergétiques doivent être presque nulles, donc le facteur de qualité doit être le plus grand possible. Le régulateur idéal n'existe pas mais les innovations horlogères tendent vers ce but en proposant par exemple de nouveaux matériaux [9,10], de nouveaux éléments mécaniques liés à la régulation de l'énergie fournie au balancier [11,12] ou permettant de s'affranchir de la gravité [13].

Les instruments de mesure décrits dans la section 1.2 ont montré des limitations. Afin de caractériser précisément et de manière robuste la marche instantanée, l'amplitude et le facteur de qualité de l'organe réglant, nous proposons ici une plateforme gyroscopique permettant de mesurer ces paramètres de manière simple et précise en repoussant les limites des instruments actuels.

2.2 Description de l'instrument

Le GyroTracker (voir Fig. 1) est un instrument optoélectronique qui permet de suivre les mouvements des éléments mobiles du calibre mécanique en temps réel. Il permet de mesurer par vidéométrie, la marche et l'amplitude de l'oscillateur au travers de l'élongation du balancier directement sur la serge, sans la nécessité de repère ni de référentiel. En particulier, l'amplitude est

mesurée directement, sans interprétation et indépendamment de l'angle de levée. A partir des mesures de marche et d'amplitude, il est notamment possible d'étudier les défauts d'isochronisme. L'enregistrement de ces deux paramètres sur une période prolongée, de quelques minutes à plusieurs jours, permet également d'observer d'éventuels défauts cycliques au niveau des engrenages. Il est également possible de caractériser le système balancier-spiral en mode libre pour en extraire le facteur de qualité.

Afin de pouvoir étudier l'effet de la gravité terrestre sur le mécanisme, l'instrument optoélectronique est fixé sur une plateforme gyroscopique. Les mesures peuvent ainsi être réalisées dans les différentes positions de réglage ou de contrôle, ainsi que dans des positions intermédiaires.

Les mesures sont effectuées sans modification de l'organe réglant, sur tous types de balanciers, d'états de surfaces (rugueux, poli-miroir) et de couleurs (clair, noir). Les mesures étant réalisées au niveau de la serge, elles sont indépendantes du nombre et de la forme des bras. L'instrument gère en outre les interruptions du signal. Il fonctionne donc également pour des serges discontinues (par exemple à cause des vis de réglage) et permet de caractériser les tourbillons ou les carrousels coaxiaux (interruptions des mesures lors du passage des bras de la cage).

La mesure est rapide et facile à mettre en place. Elle peut être effectuée sur le mouvement partiellement assemblé (par exemple sans ancre), complet, ou sur des têtes de montres au travers d'une glace saphir. Le logiciel reste intuitif et flexible [14].

2.3 Principe de mesure du GyroTracker

Nous avons vu précédemment que la vidéométrie est un outil très puissant permettant de faire des analyses d'images très spécifiques et précises. Mais, plutôt que de devoir appliquer des algorithmes de reconnaissance de formes, nous avons simplement utilisé le principe de la corrélation d'images. Ce principe présente plusieurs avantages : (i) il peut être appliqué sur des images de faible résolution ; (ii) seule une petite zone du balancier doit être visible pour pouvoir effectuer les analyses ; (iii) il n'est pas nécessaire de se repérer ou de fixer des références.

La corrélation d'image consiste à comparer deux images d'un objet en mouvement pour en déterminer le décalage relatif. Les translations Δx et Δy , suivant les axes x et y

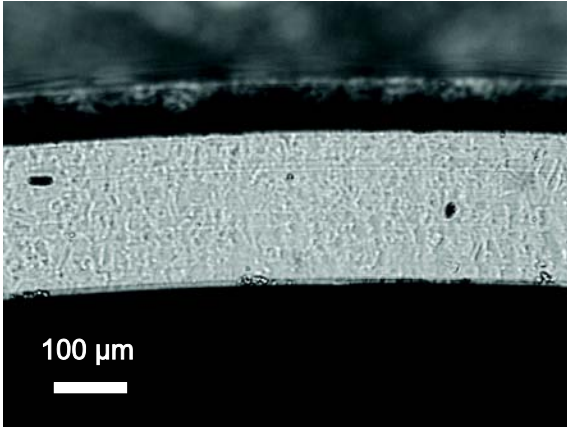


Fig. 2 Micrographie d'un balancier poli-miroir. Les défauts apparaissant en noir sur la photo sont d'une densité trop faible pour pouvoir être exploités. En revanche, grâce à un éclairage adapté, il est possible de faire apparaître une texture propre au procédé de polissage.

(horizontalement et verticalement) et la rotation $\Delta\theta$ peuvent être déterminés par cette analyse. Dans notre cas, nous avons choisi une optique avec un fort grossissement afin d'assimiler le mouvement du balancier à une translation. Seuls les termes Δx et Δy subsistent, ce qui simplifie fortement les calculs.

Moyennant un système optique adapté (éclairage et grossissement), il est possible de mettre en évidence la texture ou les défauts microscopiques au niveau de la serge du balancier. Cette hypothèse de départ a pu être vérifiée sur différents types de balanciers du commerce, y compris pour les finitions d'aspect poli-miroir (voir Fig. 2).

Le cœur de notre système optoélectronique est constitué d'une caméra CMOS de faible résolution et d'un processeur de traitement du signal (en anglais DSP, digital signal processor). Le DSP est un processeur dédié au traitement des images dont la particularité essentielle est qu'il est conçu pour effectuer les calculs en temps réel. Après chaque prise d'image de la caméra (cadence de plus de 10'000 images/s), le déplacement relatif ($\Delta x, \Delta y$) est calculé. Connaissant la cadence des images ainsi que le grossissement du système optique, les variables ($\Delta x, \Delta y$) nous donnent directement une mesure de vitesse instantanée. Le rôle de la caméra rapide est ici très clair : Quelle que soit la vitesse du balancier, pour le calcul par corrélation d'image, au moins $\frac{1}{4}$ des motifs d'une image doivent apparaître dans l'image consécutive.

Avant d'être transmises à l'ordinateur via le port USB, les données sont ré-échantillonnées. Ceci afin de réduire la taille des données à traiter et ne pas surcharger le processeur. De cette manière, le PC n'a pas besoin d'avoir des capacités particulières et une mémoire vive (RAM) de 4 Go avec un processeur de type Intel i3 sont largement suffisants pour faire fonctionner normalement le GyroTracker. Typiquement, une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz est optimale dans le cas des organes réglants ayant une fréquence de 2.5 Hz (18'000 alt/h) à 5 Hz (36'000 alt/h). Au niveau du PC, le logiciel effectue le calcul de la marche, de l'amplitude, et du facteur de qualité au moyen d'algorithmes récursifs basés sur des régressions non linéaires.

Les données transmises au logiciel sont les vitesses instantanées v_x et v_y , respectivement selon les axes x et y , en m/s. Pour la mesure, le balancier est positionné horizontalement, tangentielllement par rapport à la matrice de pixels de la caméra, de sorte que $v_y = 0$. On peut tout aussi bien le positionner selon l'axe y . On calcule ainsi l'élongation instantanée, $\theta(t)$. La vitesse angulaire, $\dot{\theta}(t)$, est

calculée à partir du diamètre du balancier, \varnothing , et de la vitesse $v_x(t)$. Les équations résolues au niveau du logiciel sont décrites ci-après.

2.3.1 Analyses en mode entraîné

En mode entraîné, la vitesse angulaire est :

$$\dot{\theta}(t) = \frac{d\theta}{dt} = \frac{2v_x(t)}{\varnothing} = \frac{2\hat{v}_x}{\varnothing} \sin(\omega t + \varphi) + \dot{\theta}_0 \quad (1)$$

\hat{v}_x : valeur de crête de la vitesse v_x

ω : pulsation propre de l'organe réglant

φ : phase initiale du signal

$\dot{\theta}_0$ correspond à une vitesse constante. Il s'agit par exemple de la vitesse angulaire de la cage d'un tourbillon.

A partir de cette équation, on déduit aisément que l'amplitude du balancier vaut :

$$\hat{\theta} = \frac{1}{\omega} \frac{2\hat{v}_x}{\varnothing} \quad (2)$$

La marche instantanée, exprimée en s/j, est calculée à partir de la pulsation propre :

$$M = 86400 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (3)$$

avec ω_0 , la pulsation théorique du régulateur.

2.3.2 Analyses en mode libre

Pour le calcul du facteur de qualité, nous faisons l'hypothèse que les amortissements sont dominés par le frottement visqueux. Pour un amortissement sous-critique, l'élongation instantanée d'un oscillateur harmonique est :

$$\theta(t) = \hat{\theta}_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

$\hat{\theta}_0$: amplitude de la vitesse angulaire

τ : durée caractéristique

Le facteur de qualité du régulateur vaut alors :

$$Q = \frac{\omega\tau}{2} \quad (5)$$

Les valeurs de la marche instantanée et de l'amplitude sont déterminées et affichées en temps réel par le logiciel. Il en est de même pour la courbe d'amortissement en mode libre qui permet de calculer le facteur de qualité.

2.4 Résultats expérimentaux

2.4.1 Mesures en mode entraîné

La marche et l'amplitude d'oscillation du balancier peuvent être mesurées au travers d'une glace saphir. Dans la Fig. 3, nous présentons un exemple de caractérisation d'une tête

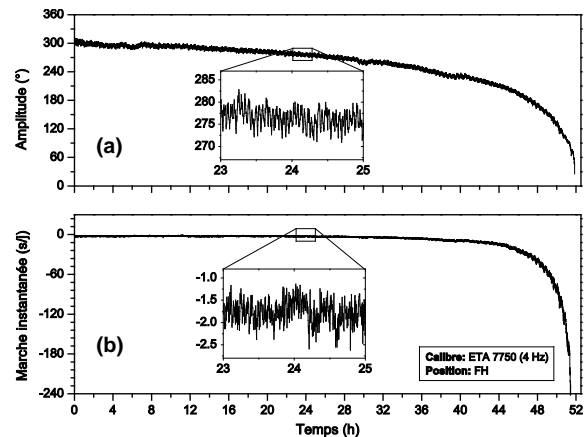


Fig. 3 Caractérisation au travers d'une glace saphir d'un mouvement ETA 7750 emboîté. (a) Amplitude et (b) Marche instantanée mesurées pendant toute la durée de marche.

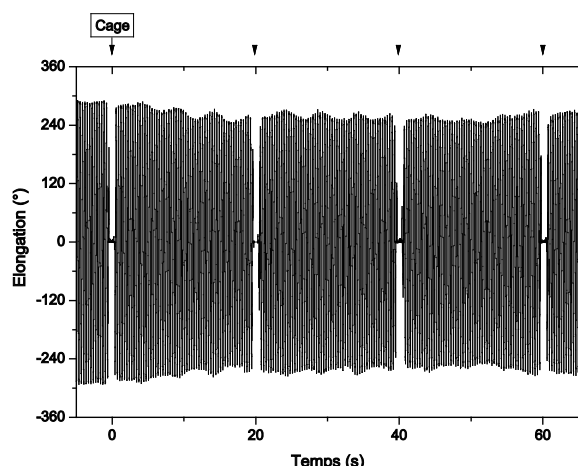


Fig. 4 Suivi de l'élongation d'un tourbillon coaxial sur 1 minute. Les bras de la cage interrompent les mesures 3 fois par minute.

de montre renfermant un mouvement ETA 7750 de fréquence 4 Hz. La marche instantanée est obtenue à partir d'échantillons représentant 10 secondes de mesures. Cette durée est ajustable mais un moyennage sur quelques secondes permet de réduire l'incertitude de la mesure. Le calcul sur 10 secondes est un bon compromis entre l'incertitude de mesure et le rafraîchissement de la valeur instantanée. Dans le cas présenté à la Fig. 3, l'incertitude-type est inférieure à 0.25 s/j pendant les 36 premières heures de la durée de marche.

L'instrument permet de caractériser les balanciers discontinus. La serge peut donc être d'une forme non annulaire, posséder des vis de réglage, ou être cachée par intermittence. Le logiciel gère ces interruptions en retirant les points de mesures aberrants par un filtrage adapté et effectue la régression non linéaire sur les points subsistants. Le passage des bras de la cage d'un tourbillon ou d'un carrousel coaxial est un exemple typique de perturbation du signal pouvant aisément être traitée. Ce cas est illustré à la Fig. 4. Sur ces mesures, les bras de la cage d'un tourbillon cachent la serge à intervalles réguliers. Avec ses trois bras et sa vitesse de rotation de 1 tour par minute, la cage interromp la mesure trois fois par minute pendant environ 1 seconde. D'une manière générale, il est possible qu'un élément du mécanisme vienne obturer la fenêtre de vision, le logiciel va gérer cela comme une interruption.

2.4.2 Mesure du facteur de qualité (mode libre)

Le facteur de qualité d'un oscillateur balancier-spiral est mesuré en mode libre, c'est-à-dire sans l'échappement. Le suivi de l'élongation du balancier après une impulsion motrice montre que l'amortissement suit une loi de décroissance exponentielle pour les grandes amplitudes (Fig. 5). De cette observation, nous avons pris le parti de négliger les frottements non visqueux et d'évaluer le facteur de qualité à l'aide des relations décrites à la section 2.3. Pour une analyse plus poussée des mesures en mode libre, et en particulier pour l'étude des différents types de frottements intervenant au niveau de l'oscillateur [15], les données de la courbe d'élongation instantanée sont exportables au format CSV et peuvent être traitées dans un tableur.

Dans le mode libre du logiciel, le calcul de la fréquence ou de la marche, de l'amplitude moyenne, et du facteur de qualité sont effectués à la demande après la sélection de la plage de mesures par l'utilisateur. Pour illustration, le facteur de qualité de la Fig. 5 et mesuré pour une amplitude décroissant de 300° à 200° est d'environ 280.

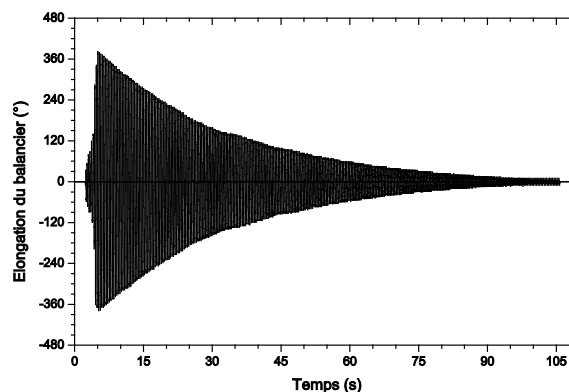


Fig. 5 Courbe d'élongation instantanée d'un balancier oscillant en mode libre. Les mesures ont été effectuées sur un calibre ETA 6497 (3 Hz).

3 Pertinence des mesures

Un instrument de métrologie doit répondre à un cahier des charges strict. Il doit non seulement être capable de conserver ses caractéristiques métrologiques au cours du temps mais aussi donner des résultats exacts. L'exactitude est une notion qui rassemble à la fois la justesse, c'est-à-dire l'indication que la mesure correspond en moyenne à la valeur vraie, et la fidélité qui est l'aptitude de l'instrument à donner la même indication pour une même valeur de la grandeur mesurée. Souvent, le terme de précision est employé pour qualifier l'exactitude des mesures.

Pour notre instrument GyroTracker, la justesse dépendra principalement de l'étalonnage de la caméra d'un point de vu spatial et temporel. Le critère permettant de quantifier la fidélité sera l'incertitude (l'écart-type) des mesures. Il est à noter que l'incertitude-type de la mesure de l'organe réglant prend en compte les variations intrinsèques dues à l'instrument de mesure mais aussi celles extrinsèques qui proviennent de l'oscillateur [16].

3.1 Etalonnage

Le GyroTracker étant un instrument de mesure de vitesse, l'exactitude dépendra d'une part de la stabilité et de la justesse de la base de temps, et d'autre part de la justesse du déplacement extrait des images.

Pour la base de temps, le GyroTracker intègre un oscillateur à quartz de précision compensé en température et contrôlé en tension pour l'ajustage de sa fréquence. Il est étalonné par synchronisation sur une horloge atomique externe. La précision de l'oscillateur est de 4 ms/j.

L'algorithme utilisé pour l'estimation de la marche n'est pas influencé par une erreur systématique de la mesure du déplacement. Seule la base de temps influera sur la justesse de la fréquence mesurée. Notre objectif étant de pouvoir mesurer la marche instantanée avec une incertitude maximale de 0.5 s/j, l'influence de la précision de l'oscillateur à quartz peut être considérée comme négligeable.

Concernant l'exactitude de l'amplitude, elle est liée à l'incertitude de mesure de la vitesse du balancier (cf. section 2.3) et donc à la résolution spatiale de la caméra. La partie optique du GyroTracker a été dimensionnée pour maximiser cette résolution mais aussi pour mieux visualiser les états de surface. Nous avons fixé à 2 m/s la vitesse maximale pouvant être mesurée et ceci pour permettre la caractérisation de balanciers jusqu'à 50 Hz environ. La résolution spatiale est de 14 µm environ. Afin de réduire l'incertitude de mesure de l'amplitude et obtenir les valeurs vraies de la vitesse, nous étalonnons le GyroTracker à l'aide d'un moteur électrique comportant un capteur à effet Hall et un encodeur. Ce moteur est contrôlé en vitesse au

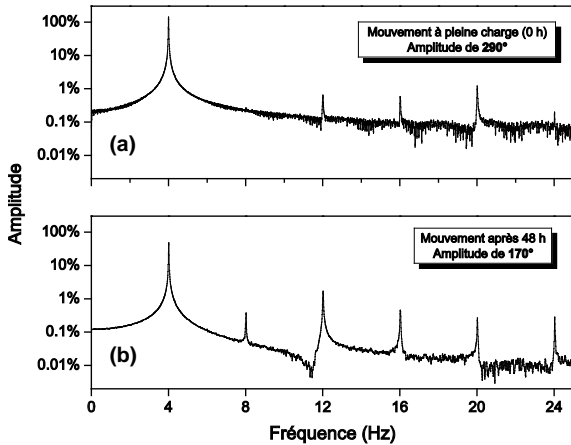


Fig. 6 Analyse par la transformée de Fourier du signal brut des vitesses acquises par le GyroTracker sur le calibre ETA 7750 (4 Hz) emboîté pour des oscillations d'amplitudes (a) 290° et (b) 170°.

moyen d'une installation dédiée. Plusieurs mesures de référence sont réalisées pour différentes vitesses du moteur. Ces mesures étant effectuées sur plusieurs secondes, l'effet des fluctuations de la vitesse angulaire du moteur est négligeable. Si nous prenons une valeur de diamètre de serge moyen de 10 mm, connaissant la résolution spatiale de la caméra, l'incertitude théorique sur l'estimation de l'amplitude d'un balancier oscillant à 200° sera de l'ordre de 0.3°. Cette incertitude sera plus petite et donc meilleure pour des amplitudes supérieures. Il est à noter que l'écart-type de l'amplitude de l'organe réglant dans la Fig. 3a est de 2.5° sur 2 heures de mesures. Ces variations sont dues aux incertitudes de mesure mais aussi et avant tout aux perturbations agissant sur l'oscillateur.

3.2 Evaluation de l'exactitude des mesures de la marche

Pour déterminer la marche instantanée avec notre algorithme, nous avons émis l'hypothèse que l'oscillation du système mécanique complet avait un mouvement harmonique simple (sinusoïde parfaite). Dans la réalité, les forces perturbatrices provenant de l'inertie du spiral [17], ainsi que du mécanisme, engendrent des harmoniques d'ordres supérieurs [18], générant des perturbations sur les mouvements d'oscillation. Afin de vérifier la validité et la robustesse des algorithmes utilisés par le GyroTracker, nous avons étudié, dans un premier temps, les perturbations générées au niveau du système balancier-spiral et, dans un deuxième temps, leur impact sur l'incertitude de la mesure de la marche.

3.2.1 Analyse spectrale des perturbations de l'organe réglant

Les perturbations de l'oscillateur peuvent être visualisées en effectuant une analyse spectrale d'un signal brut d'acquisition du GyroTracker. La Fig. 6 montre la transformée de Fourier du signal des vitesses du balancier du calibre ETA 7750 oscillant à 4 Hz (mesures présentées à la Fig. 3). L'analyse spectrale montre le pic principal de fréquence 4 Hz correspondant à la fréquence propre du calibre. Ce pic a une amplitude normalisée (A_0) de 100%. Les harmoniques d'ordres supérieurs ont des amplitudes qui sont inférieures à 1.5% de l'amplitude A_0 . L'amplitude relative des perturbations tend à augmenter avec la diminution de l'amplitude du balancier (Fig. 6b). De plus, le spectre fait apparaître du bruit de très faible amplitude (de l'ordre de 1‰ par rapport à A_0) sur l'ensemble des fréquences.

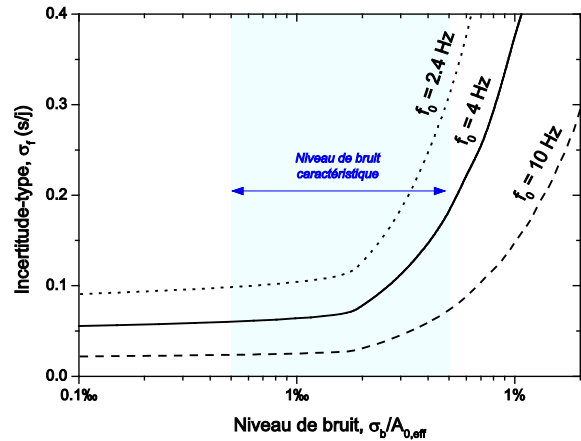


Fig. 7 Evaluation de l'effet de différents niveaux de bruit blanc sur l'incertitude de la mesure de la marche, σ_f , en s/j pour des mouvements de fréquence (f_0) 2.4 Hz, 4 Hz et 10 Hz.

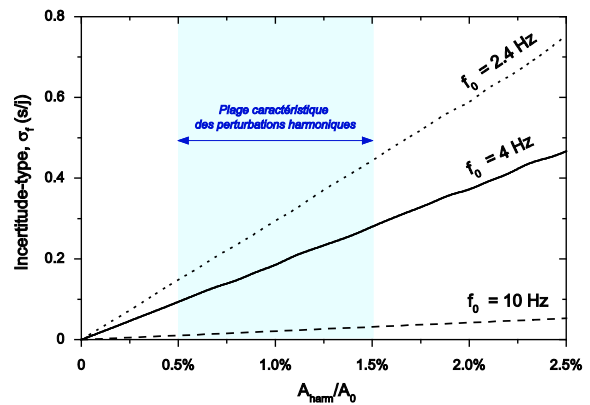


Fig. 8 Evaluation de l'effet des perturbations harmoniques sur l'incertitude de la mesure de la marche, σ_f , en s/j pour des mouvements de fréquence (f_0) 2.4 Hz, 4 Hz et 10 Hz.

3.2.2 Incertitudes de mesure sur la marche

Pour évaluer la robustesse de l'algorithme et l'exactitude des mesures de la marche données par le GyroTracker, il est nécessaire de déterminer l'influence des perturbations sur l'incertitude des valeurs affichées par l'instrument. Pour cette étude, nous modélisons, d'une part, l'influence du bruit de faible amplitude sur l'écart-type et, d'autre part, l'effet des perturbations harmoniques.

Le bruit parasite est simulé par du bruit blanc gaussien. Il est composé de toutes les fréquences du spectre et est caractérisé par une moyenne nulle et un écart-type variable (paramètre σ_b). Pour la modélisation, ce bruit est ajouté à un sinus parfait (valeur efficace de l'amplitude, $A_{0,eff}$) de fréquence fixée et les données obtenues sont injectées dans l'algorithme de détermination de la marche en lieu et place des mesures réelles. Les résultats sont rassemblés dans la Fig. 7. Nous avons effectué ces simulations pour trois fréquences f_0 de calibres (2.4 Hz, 4 Hz et 10 Hz) qui représentent un large éventail des calibres commercialement disponibles. L'écart-type du bruit, σ_b , superposé au sinus parfait se situe entre 0.5‰ et 5‰ de l'amplitude du pic de fréquence du calibre (A_0). Cette plage de bruit est supérieure aux cas le plus pessimiste mesuré dans la Fig. 6. La moyenne de 5000 points pour chaque combinaison de fréquence et de niveau de bruit permet de déterminer statistiquement, et de manière significative, l'incertitude, σ_f , sur l'estimation de la marche. Cette incertitude est au plus de 0.3 s/j pour tous les types de calibres de 2.4 Hz à 10 Hz.

De la même manière, nous modélisons l'impact des perturbations harmoniques sur l'écart-type, σ_f , de la marche en ajoutant à un sinus parfait les 5 premières harmoniques de la fréquence du calibre. Leurs amplitudes, A_{harm} , sont identiques et varient de 0 à 2.5% de l'amplitude A_0 . La phase est prise de manière aléatoire et est comprise entre $-\pi$ et $+\pi$. Les résultats de cette simulation sont rassemblés dans la Fig. 8. Comme dans le cas précédent, l'incertitude est calculée sur 5000 points moyennés pour chaque combinaison de fréquence et d'amplitude de la perturbation. A partir de l'analyse spectrale présentée à la Fig. 6, nous situons la plage caractéristique des perturbations harmoniques autour de 0.5% à 1.5%. A partir de ces simulations, nous pouvons conclure que l'incertitude de la marche calculée par le GyroTracker et liée aux perturbations harmoniques est inférieure à 0.45 s/j sur tous les calibres de 2.4 à 10 Hz. Enfin, il faut noter que l'impact du bruit blanc et des perturbations harmoniques sur l'incertitude de la marche diminue avec l'augmentation de la fréquence f_0 du calibre.

4 Conclusion

Le GyroTracker répond aux besoins métrologiques des manufactures pour leurs recherches sur l'organe réglant. C'est un instrument optoélectronique qui se base sur l'analyse d'images pour mesurer en temps réel, la marche instantanée, l'amplitude et le facteur qualité de l'oscillateur des calibres mécaniques. Les algorithmes développés pour les besoins de notre appareil permettent d'extraire ces paramètres avec une précision difficilement atteinte par d'autres techniques. En outre, la puissance des algorithmes et la polyvalence de l'appareil rendent aisé le contrôle des balanciers discontinus ou des tourbillons.

Au travers de mesures effectuées sur une tête de montre renfermant un calibre ETA 7750 de 4 Hz, nous avons pu caractériser la marche instantanée du mouvement avec une incertitude-type inférieure à 0.25 s/j sur 36 heures. De plus, l'analyse spectrale de ces mesures nous a permis de mettre en évidence différents phénomènes perturbateurs intervenant au niveau de l'oscillateur. En les modélisant, nous avons pu évaluer leur impact sur l'exactitude des valeurs de marche instantanée données par le GyroTracker. Pour les oscillateurs dont la fréquence est comprise entre 2.4 et 10 Hz, l'incertitude de la mesure de la marche instantanée ne dépasse pas 0.5 s/j pour les deux types de perturbations étudiées. La cohérence entre les modèles et les mesures valident notre hypothèse réduisant les oscillations à une sinusoïde parfaite.

Références

[1] J. JOUANNIC, «Historique de la mesure du temps,» *Culture technique*, n° 9, pp. 127-135, 1983.

[2] E. WÜEST, «Fotoelektrische Messung von Periodendauer und Schwingungswerte der Unruh einer Armbanduhr,» *Feinwerktechnik & Messtechnik*, vol. 85, n° 5, pp. 196-199, 1977.

[3] M. VERMOT, S. DORDOR et D. PRONGUE, «Mesures,» *Traité de construction horlogère*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2011, pp. 741-763.

[4] C.-A. REYMONDIN, G. MONNIER, D. JEANNERET et U. PELARATTI, «Moyens de contrôle des engrenages,»

Théorie d'horlogerie, Fédération des Ecoles Techniques, 1998, pp. 91-95.

- [5] L. KREHUT, J. HAST, E. ALAROUSU et R. MYLLYLÄ, «Low cost velocity sensor based on self-mixing effect in a laser diode,» *Opto-electronics Review*, vol. 11, n° 4, pp. 313-319, 2003.
- [6] P. MAILLARD, «Visite au COSC, temple du contrôle chronométrique suisse,» Europa Star WorldWatchWeb, 17 Octobre 2011. [En ligne]. <http://www.europastar.com/premiere/1004084283-visite-au-cosc-temple-du-controle-chronometrique.html>.
- [7] I. MEISSNER, G. PELLET, U. MUELLER, H. GERVAISE et S. MEYLAN, «Un nouvel équipement de mesures de l'organe réglant pour la montre mécanique,» *Congrès International de Chronométrie 2007*, Montreux, Suisse, 2007.
- [8] M. PAINDAVOINE, «Traitement des images en temps réel – Applications industrielles,» *Techniques de l'ingénieur*, R6720, 2000.
- [9] F. ESCHMANN, «Ces nouveaux matériaux qui font le luxe d'aujourd'hui,» WtheJournal.com, 5 Mai 2011. [En ligne]. <http://www.wthejournal.com/news/view/ces-nouveaux-materiaux-qui-font-le-luxe-daujourd'hui>.
- [10] J. MEGEVAND, «Omega se lance sur le segment antimagnétique,» WtheJournal.com, 17 Janvier 2013. [En ligne]. <http://www.wthejournal.com/news/view/omega-se-lance-sur-le-segment-antimagnetique>.
- [11] «Girard-Perregaux Echappement Constant – La révolution technique en marche,» WtheJournal.com, 27 Mars 2013. [En ligne]. <http://www.wthejournal.com/enc-direct/article/girard-perregaux-echappement-constant-la-revolution-technique-en-marche>.
- [12] M. DISHER, «Basel Preview: Breguet Tradition Fusee Tourbillon with silicon balance spring,» WatchTime.com, 21 Janvier 2010. [En ligne]. <http://www.watchtime.com/wristwatch-industry-news/watches/basel-preview-breguet-tradition-fusee-tourbillon-with-silicon-balance-spring/>.
- [13] M. JEANNOT, «Complication – Le Carrousel Volant Une Minute de Blancpain,» WorldTempus, 15 Septembre 2008. [En ligne]. <http://fr.worldtempus.com/article/tech-report/complications-le-carrousel-volant-une-minute-de-blancpain>.
- [14] VeoSwiss Technologies Sàrl, 2013. [En ligne]. <http://www.veoswiss.com>.
- [15] M. VERMOT, P. BOVAY et F. FALCO, «Théorie générale des résonateurs à un degré de liberté,» *Traité de construction horlogère*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2011, pp. 111-169.
- [16] M. PRIEL, «Incertitudes de mesure et tolérances,» *Techniques de l'ingénieur*, R285, Septembre 1999.
- [17] M. KEITA et S. STEINEMANN, «Détermination des forces perturbatrices d'un système oscillant à partir de son comportement en fréquence,» *Journal de Mathématiques et de Physique Appliquées*, vol. 26, pp. 727-734, 1975.
- [18] R. DU et L. XIE, «The mechanics of the spiral spring,» *The mechanics of mechanical watches and clocks*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 89-113.