

Modélisation des perturbations magnétiques sur une montre mécanique

Refzul Khairi, Xavier Mininger, Romain Corcolle, Lionel Pichon, Bernard Laurent

▶ **To cite this version:**

Refzul Khairi, Xavier Mininger, Romain Corcolle, Lionel Pichon, Bernard Laurent. Modélisation des perturbations magnétiques sur une montre mécanique. Numélec 2015 (8ième Conférence Européenne sur les Méthodes Numériques en Electromagnétisme), Jun 2015, Saint-Nazaine, France. hal-01235542

HAL Id: hal-01235542

https://centralesupelec.hal.science/hal-01235542

Submitted on 17 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation des perturbations magnétiques sur une montre mécanique

Refzul Khairi, Xavier Mininger, Romain Corcolle, Lionel Pichon, Laurent Bernard
GeePs, CNRS UMR 8507, SUPELEC, UPMC, Univ Paris Sud, Univ. Paris-Saclay
11 rue Joliot-Curie, 91192 Gif sur Yvette, France
[refzul.khairi, xavier.mininger, romain.corcolle, lionel.pichon, laurent.bernard]@centralesupelec.fr

***Résumé*—Un champ magnétique est l'un des ennemis majeurs d'une montre mécanique. Ce champ peut modifier la structure du spiral et changer sa fréquence de résonance. En conséquence, la montre perd son exactitude. Le but de ce travail est de quantifier l'impact du champ magnétique sur la résonance du spiral en utilisant une approche par éléments finis. Ce problème couplé magnéto-mécanique implique le calcul des différentes perturbations d'origines magnétiques, tout en tenant compte de la rotation importante du ressort (non-linéarité géométrique).**

***Mots clés*—Montre mécanique, fréquence de résonance, problème couplé magnéto-mécanique.**

I. Introduction

Une montre mécanique utilise uniquement un système mécanique pour mesurer le passage du temps, contrairement à une montre à quartz qui fonctionne électroniquement. Une montre mécanique contient cinq parties principales : ressort principal, roue de transmission, échappement, balancier-spiral et l'organe d'affichage [1]. Plusieurs pièces sont constituées de matériaux ferromagnétiques.

Ce travail se propose d'étudier l'impact du champ magnétique sur le balancier-spiral. La déformation du spiral résultant des perturbations magnétiques (magnetostriction et forces magnétostatiques) est évaluée en utilisant une approche par éléments finis. De plus, nous étudions la modification à la fois de l'amplitude et de la fréquence de résonance résultant de cette déformation. L'objectif est de quantifier si une erreur au niveau de cette fréquence peut être liée à un champ magnétique donné.

II. Balancier-spiral d'une montre mécanique

Le balancier-spiral est le cœur d'une montre mécanique et est la partie la plus sensible. Il régule le passage du temps grâce à son oscillation et est responsable de l'exactitude de la montre mécanique. Le balancier-spiral considéré dans la simulation est illustré par la figure 1.

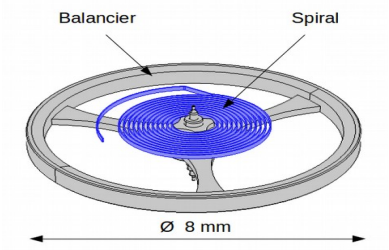


Fig. 1. Balancier-spiral d'une montre mécanique

La fréquence de l'oscillation dépend de la géométrie et du matériau du spiral. Une modification sur la structure du ressort peut changer la fréquence de résonance et générer une erreur sur l'indication de temps. La norme NIHS 91-10 exige que cette erreur ne dépasse pas 30 secondes par jour [3]. Généralement, le ressort est constitué d'alliages fer-nickel (Invar, Elinvar, Nivarox, ...), remarquables pour leur faible coefficient de dilatation thermique [2]. Ce sont des matériaux ferromagnétiques dont la structure peut être influencée par la présence d'un champ magnétique. Il a été montré expérimentalement que la présence d'un champ magnétique peut être responsable d'une erreur de plusieurs minutes par jour.

III. Problème magnéto-mécanique

L'étude proposée correspond à un problème magnéto-mécanique faiblement couplé. Dans un premier temps, le problème magnétique modélise la distribution du champ magnétique dans les matériaux, et le problème mécanique étudie ensuite la déformation résultant des forces correspondantes. Pour lier ces deux systèmes, nous devons déterminer les différentes perturbations d'origine magnétique. La figure 2 montre le schéma général de la modélisation magnéto-mécanique considérée.

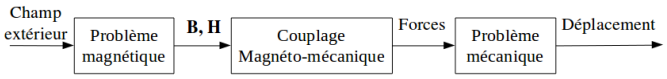


Fig. 2. Problème couplé magnéto-mécanique

L'équation d'équilibre magnétique est donnée par les équations de Maxwell (en négligeant les courants de déplacements):

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

où $\mathbf{H}$ est le champ magnétique, $\mathbf{B}$ l'induction magnétique et $\mathbf{J}$ la densité de courant. Le problème magnétique est résolu en utilisant une formulation en potentiel vecteur. L'équation d'équilibre mécanique est donné par 2ème loi de Newton :

$$\nabla \cdot \mathbb{T} + \mathbf{f} = \rho_m \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \tag{3}$$

où $\mathbb{T}$ est le tenseur de contraintes, $\mathbf{f}$ la force, $\mathbf{u}$ le déplacement et ρ_m la densité. Les perturbations magnétiques peuvent être considérées en deux parties : les forces magnétostatiques et l'effet de magnetostriction [4]. Les forces magnétostatiques sont liées à la structure de matériau magnétique et peuvent être obtenues en utilisant le tenseur de Maxwell [5]. L'effet de la magnétostriction est une déformation spontanée du matériau ferromagnétique lors de sa magnétisation [6]. La force équivalente est obtenue à partir de la déformation de magnétostriction S^{μ}_{kl}, qui est une grandeur non linéaire :

$$S^{\mu}_{kl} = \frac{\lambda_s}{M_s^2}\left(3M_kM_l - \delta_{kl}\|\mathbf{M}\|^2\right) \tag{4}$$

où λ_s est la constante de magnétostriction à saturation et M la magnétisation.

IV. Simulation

La première simulation considère le spiral placé dans un champ magnétique uniforme sans prendre en compte les oscillations. L'objectif est de déterminer l'impact relatif des forces de magnétostriction et magnétostatique sur sa déformation. La figure 3 montre que l'effet de magnétostriction semble négligeable dans une telle application.

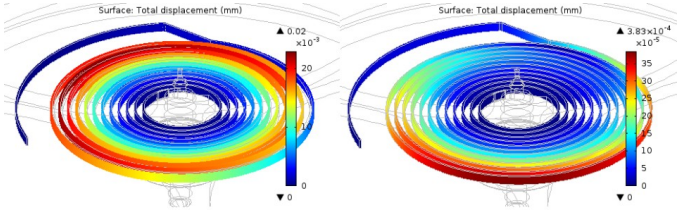


Fig. 3. Déplacement du spiral du à (a) forces magnétostatique (b) effet magnétostriction.

La deuxième étude considère les oscillations du balancier-spiral en présence du champ magnétique. La géométrie originale du spiral est simplifiée en une géométrie 2D (figure 4). Le système est placé dans un champ magnétique uniforme de 2400 A/m. Comme les oscillations du spiral ne peuvent pas être considérées comme de petits déplacements, le problème a besoin d'une considération de la non-linéarité géométrique (grande rotation) associée à la méthode de maillage Arbitraire Lagrange-Eulerian (ALE).

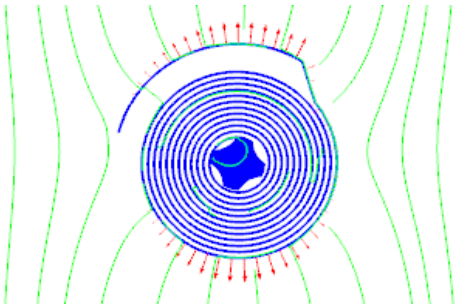


Fig. 4. Système de simulation : (vert) ligne de flux (rouge) densité de force

La simulation commence par un calcul statique uniquement mécanique qui donne une position initiale au spiral en imposant un déplacement désiré (précontrainte). Nous prenons une position initiale de 10 °. Le spiral est alors lâché et oscille autour de sa position d'équilibre. La deuxième partie de la simulation suit alors un processus itératif qui inclut dans chaque pas de temps (0,1 ms) le calcul magnétostatique, l'expression de la force magnétostatique correspondante, et le calcul mécanique non-linéaire, avec la mise à jour du maillage. La figure 5 donne l'algorithme de la simulation.

La figure 6 montre l'oscillation du balancier-spiral pour H=0 A/m et 2400 A/m. Nous constatons que le champ magnétique modifie à la fois l'amplitude et la fréquence de l'oscillation du balancier-spiral. Pour analyser proprement le changement de la fréquence, une étude FFT avec bourrage de zéros est utilisée. La fréquence de résonance dans un champ magnétique diminue de 0,02 Hz : la montre dans un tel champ ralentit alors de 7,1 minutes par jour.

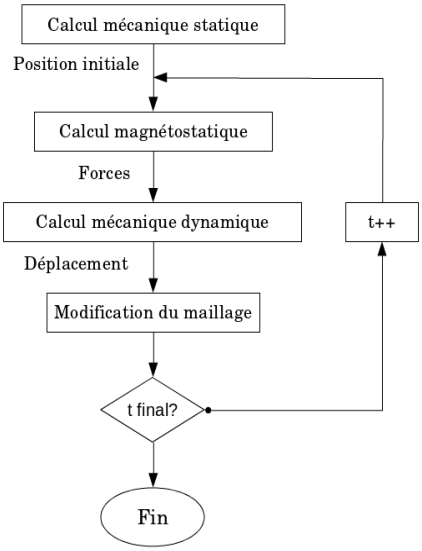


Fig. 5. Algorithme de simulation

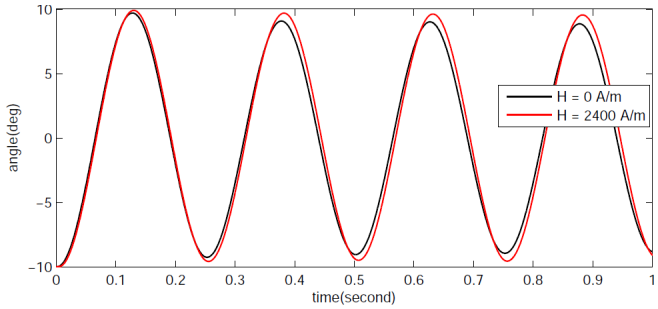


Fig. 6. Oscillations du balancier-spiral avec et sans la présence d'un champ magnétique

V. Conclusion

La perturbation magnétique sur le balancier-spiral est un problème récurrent pour les horlogers. Cependant, il n'y a pas une modélisation numérique précise qui traite ce problème. Il a été montré que le champ magnétique peut modifier la fréquence de résonance du spiral. Bien que sur une courte période, cette différence semble négligeable, elle conduit à une imprécision de plusieurs minutes par jour. Une perspective est d'étudier un système plus réaliste par une simulation 3D.

References

[1] R. Du and L. Xie, *The Mechanic of Mechanical Watch and Clock*, Springer, 2013.

[2] G. Levingston, "A new material for balance-spring", *Horological Journal*, pp. 243-245, 2004

[3] Swiss Federation of watch industry, Norme NIHS 91-10, 2003

[4] N. Vandevelde and J Melkebeek, "Magnetic force and magnetostriction in ferromagnetic material", *COMPEL*, Vol. 20, pp 32-51, 2001

[5] A. Bossavit, "Virtual power principle and Maxwell's tensor : which come first?", *COMPEL*, Vol 30, pp 1804-1814, 2011.

[6] L. Daniel and N. Galopin, "A constitutive law for magnetostrictive materials and its application to Terfenol-D single and polycristal" *EPJ-Applied Physics,* Vol 42, pp 153-159, 2008.