

Conception numérique de dispositifs magnétiques horlogers

Daho Taghezout, Applied Magnetics
Grand-Rue 84, CH-1110 Morges
www.maglink.net

La montre à quartz fait appel à différents composants électromagnétiques pour gérer certaines fonctions essentielles ou secondaires. On peut citer l'entraînement d'un affichage analogique par un ou plusieurs moteurs mono- ou biphasés, la charge d'accumulateurs à l'aide d'une génératrice (mouvement Autoquartz d'ETA ou KINETICS de SEIKO) ou le blindage total ou partiel d'un mouvement contre les champs magnétiques externes. D'autres fonctions secondaires telles que alarme silencieuse, boussole, embrayage magnétique ou microrelais Reed peuvent être mentionnées. La conception d'un composant magnétique horloger doit tenir compte de contraintes telles que l'autonomie de la pile, l'encombrement, la tenue aux chocs mécaniques, la sensibilité aux champs magnétiques extérieurs, les interactions avec d'autres composants magnétiques logés à proximité, la température ou le coût de fabrication.

La simulation numérique du composant magnétique dans son environnement de travail dès la phase de conception permet d'éviter passablement de déboires en production. A titre d'exemple, la conception d'un moteur pas-à-pas de type Lavet doit prendre en compte tout ou partie des contraintes mentionnées dans l'introduction. Il faut y rajouter l'asservissement éventuel des impulsions et le couple de charge maximum. Par ailleurs, il y a lieu de bien spécifier l'inertie maximale et le balourd limite des aiguilles d'affichage. Finalement, un moteur apparemment bien conçu peut réaliser de piètres performances dès lors qu'il est soumis à un champ magnétique externe important. Il est de ce fait crucial que toutes ces contraintes soient gérées au mieux dans la phase de conception.

Modélisation par éléments finis

Les lois de l'électromagnétisme sont basées sur les équations de Maxwell qui définissent la relation entre l'induction magnétique B , le champ magnétique H , le champ électrique E et l'induction électrique D . Si la fréquence des phénomènes magnétiques n'excède pas quelques mégahertz, les équations de Maxwell peuvent être découplées. Ainsi, on pourra séparer l'étude des phénomènes magné-

tiques (champ magnétique généré par des courants et des aimants permanents) de celle des phénomènes électriques (champ électrique généré par des potentiels ou une distribution de charges).

La méthode des éléments finis s'est imposée comme la technique numérique la plus précise pour l'analyse de dispositifs électriques ou mécaniques. Elle consiste tout d'abord à discrétiser le domaine d'étude en éléments simples (triangles et quadrilatères dans un modèle bidimensionnel, tétraèdres, hexaèdres, pyramides dans un modèle tridimensionnel). On définira ensuite différentes régions (stator, rotor, axe...) qui seront caractérisées par des propriétés physiques (matériau, densité de charges, courant ou potentiel). On choisira par la suite une variable d'état (potentiel magnétique ou électrique) qui sera calculée sur un nombre fini de points du domaine (nœuds), les champs électrique ou magnétique étant ensuite déterminés en chaque point par dérivation du potentiel.

La figure 1 montre le maillage dans le logiciel FLUX3D (www.cedrat.com) d'un moteur pas-à-pas à l'aide d'éléments tétraédriques. Le moteur est entouré d'air et placé dans une région « infinie », censée représenter les conditions aux limites à l'infini (potentiel et champ magnétique nuls). La région infinie permet également de soumettre le moteur à un champ magnétique source constant ou variable dans l'espace. Les matériaux magnétiques sont en général non linéai-

res ou anisotropes. L'alimentation électrique des bobines est possible grâce à un couplage du problème à éléments finis avec un circuit électrique. Par ailleurs le mouvement en rotation ou en translation de pièces est intégré dans la résolution du problème à éléments finis.

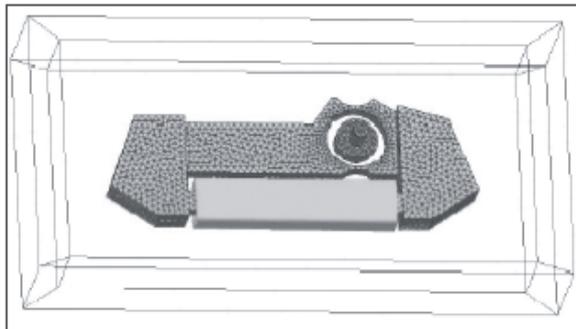


Fig. 1: Maillage par éléments finis d'un moteur Lavet

Suivant les grandeurs recherchées, on choisira le modèle de calcul qui permettra d'économiser au mieux la place mémoire et le temps de résolution. Ainsi la détermination du couple de positionnement, du flux couplé aimant-bobine ou d'une inductance de bobine s'effectuera à l'aide d'un modèle magnétostatique (champs magnétiques générés par des courants constants ou des aimants permanents fixes dans l'espace). Si les courants induits dans les régions conductrices par un courant variable ou le déplacement de pièces jouent un rôle essentiel dans le comportement du système, on fera appel à un modèle magnétique transitoire. Finalement, si l'on s'intéresse à la distribution du champ électrique généré par des potentiels ou des charges électriques, on fera appel à un modèle électrostatique

La modélisation par éléments finis est bien adaptée à l'analyse de dispositifs magnétiques caractérisés par une géométrie complexe et des matériaux non linéaires. On peut ainsi optimiser sur ordinateur les formes géométriques et les propriétés des matériaux, étudier l'influence de tolérances mécaniques ou physiques sur les performances du dispositif

et en optimiser le coût ou le volume. On peut également étudier le comportement du composant sous champ magnétique, en adapter la configuration en conséquence ou en prévoir le blindage.

Ainsi, la conception d'un micromoteur se basera sur une géométrie initiale qui peut être importée depuis un logiciel CAO (CATIA, ProEngineer, SolidWorks ...) ou décrite dans l'environnement du logiciel. On peut, par la suite, extraire en une résolution paramétrique des grandeurs caractéristiques telles que le flux couplé aimant-bobine, l'inductance de bobine et le couple de positionnement. A titre d'application, la figure 2 montre la répartition de l'induction magnétique dans les parties actives du moteur à courant nul, en position de couplage maximum entre l'aimant et la bobine. L'échelle d'induction magnétique va de 0 à 1 T.

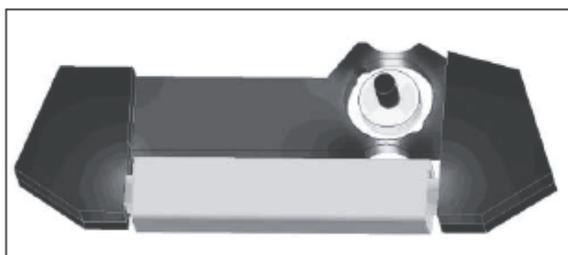


Fig. 2: Moteur Lavet à vide (aimant rotor en couplage maximum avec la bobine)

Par la suite, on pourra par exemple optimiser le couple de positionnement en amplitude et en phase en adaptant l'aire et la position des alvéoles placées dans le trou du stator. La notion de paramètre est relativement générale. Il peut s'agir de la position du rotor, du courant de bobine, des propriétés de matériaux, de la température ou d'une quelconque grandeur géométrique. La figure 3 montre l'évolution en fonction de la position du rotor de deux paramètres jouant un rôle essentiel dans les performances du moteur. Il s'agit du flux couplé aimant-bobine (courbe en trait plein) et du couple de positionnement (trait discontinu).

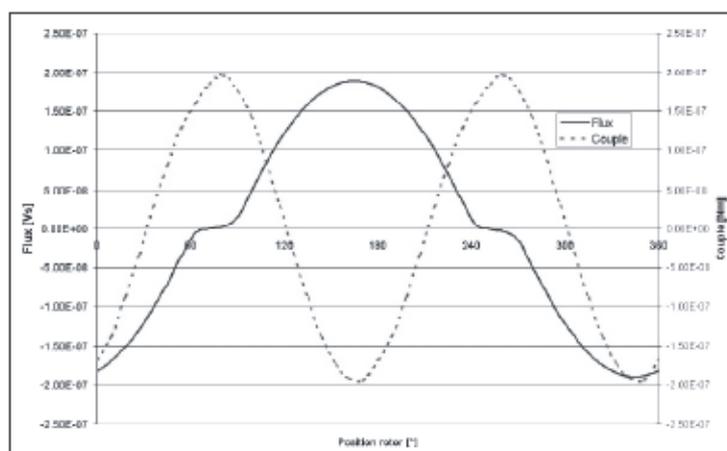


Fig. 3: Flux à vide et couple reluctant d'un moteur Lavet

Par ailleurs, la tenue aux champs magnétiques externes peut aisément être évaluée à l'aide de la méthode des éléments finis. Un champ magnétique externe d'amplitude élevée interagit avec le rotor et contribue à saturer le noyau de bobine. Son action première sera cependant de déformer le couple de positionnement en module et en phase. La nouvelle position de repos peut être telle que le rotor rate son pas lors d'une impulsion de commande. Une adaptation de la géométrie est en général suffisante pour pallier à ce problème.

Un atout majeur de la simulation par éléments finis réside dans son universalité. On peut ainsi appliquer les mêmes règles de conception au moteur Lavet monophasé ou au moteur biphasé bidirectionnel. La figure 4 montre, pour ce dernier, la répartition de l'induction magnétique à courant nul et aimant rotorique orienté dans l'axe du moteur. L'échelle d'induction magnétique va de 0 à 1T.

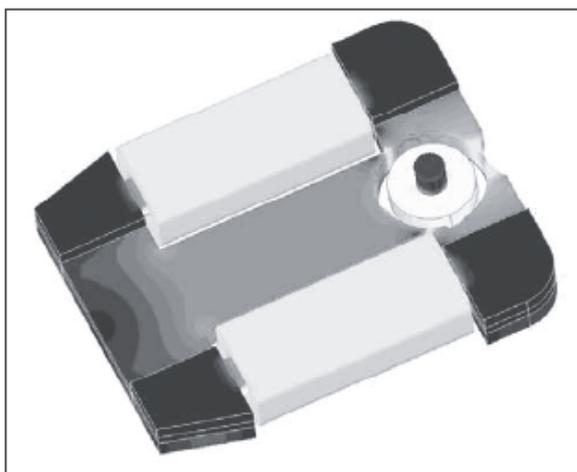


Fig. 4: Moteur biphasé ETA

Un cas particulièrement intéressant est constitué par les montres à quartz à remontage automatique. Le mouvement Autoquartz commercialisé par ETA SA met à profit l'énergie mécanique générée par une masse oscillante pour alimenter un mouvement analogique à quartz classique. Une micro-génératrice monophasée multipolaire KINETRON (fig. 5) charge un accumulateur à partir de l'énergie mécanique de mouvement.

La génératrice délivre l'énergie électrique sous forme impulsionnelle, du fait de la présence d'un microbarillet faisant office de tampon entre la masse oscillante et la génératrice. Ce barillet a pour rôle le stockage temporaire de l'énergie délivrée par les oscillations de faible amplitude de la masse. La vitesse maximale de la génératrice atteint plusieurs milliers de tours par minute. Un aspect remarquable en est également la taille et le degré de miniaturisation des aimants équipant le rotor. Le diamètre de la génératrice n'excède pas 4 mm pour une hauteur d'environ 3 mm.

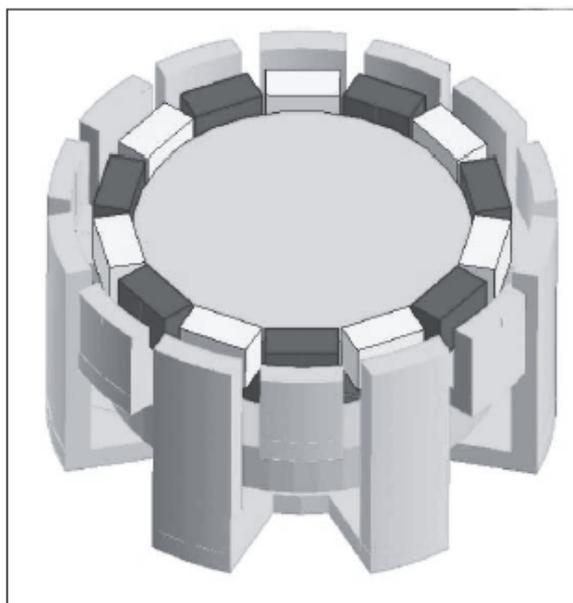


Fig. 5: Génératrice KINETRON pour mouvement Autoquartz (ETA SA)

Il est encore possible d'étudier des dispositifs assurant d'autres fonctions. Un exemple en est fourni par le vibreur pour alarme silencieuse développé par ASULAB SA en collaboration avec l'EPFL (fig. 6). La partie mobile est constituée par deux aimants et un shunt magnétique en fer doux. Elle est reliée à la partie fixe (stator et bobine) par une lame flexible de rigidité constante. Le principe consiste à imprimer à la partie mobile un mouvement linéaire oscillant à une fréquence de vibration proche de la fréquence de résonance du système. Les pertes mécaniques sont compensées par l'énergie électrique fournie à la bobine à chaque impulsion de commande. Un autre exemple que nous avons étudié est un blindage magnétique intégral protégeant un mouvement à quartz ou un mouvement mécanique contre des champs magnétiques externes très élevés (100'000 A/m).

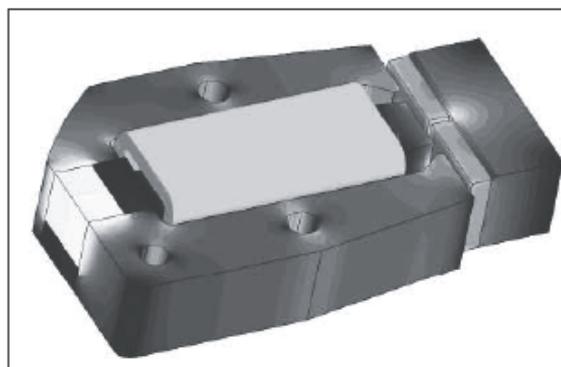


Fig. 6: Vibreur ASULAB (Lame ressort non représentée)

Simulation dynamique

La prédiction du comportement dynamique d'un système formé par des composants interagissant entre eux et avec leur environnement de travail doit faire appel à une approche adaptée aux phénomènes physiques mis en jeu. Si l'on prend le cas d'un transducteur électromécanique, on doit pouvoir modéliser le comportement du circuit électronique d'alimentation et décrire correctement le transducteur et la stratégie de commande. On doit, en outre, intégrer l'inertie de la charge, les chocs mécaniques et le couple résistant. Le réglage de l'énergie électrique fournie à chaque impulsion doit être idéalement adapté au couple de charge, de manière à assurer une autonomie de pile satisfaisante. L'analyse du régime dynamique par la méthode des éléments finis peut, dans ce cas, être longue, surtout si l'on souhaite tester différents cas de charge, étudier la robustesse du moteur aux chocs mécaniques ou en optimiser la stratégie de commande.

Il est alors judicieux de faire appel à une approche numérique autre que la méthode des éléments finis. Ainsi, les logiciels de simulation modernes tels que Portunus (www.adapted-solutions.com) sont adaptés à traiter des problèmes multiphysiques et conviennent très bien à l'étude de mouvements horlogers. En effet, ceux-ci sont par essence des systèmes mécatroniques, faisant appel à des composants électrochimiques, électroniques, électromagnétiques et mécaniques. Ainsi une méthode d'analyse faisant simultanément appel à des circuits électriques, blocs fonctionnels et graphes d'état convient particulièrement bien pour décrire le comportement dynamique d'un système horloger.

A titre d'exemple, nous nous intéresserons au comportement en régime dynamique d'un moteur Lavet dont le modèle électrique, ainsi que la commande, seront décrits à

l'aide d'un circuit électrique (fig. 7), la partie mécanique à l'aide d'un bloc fonctionnel (fig. 8) et la stratégie de commande avec un réseau de Petri (fig. 9).

Le circuit électrique représente un modèle à composants discrets de la bobine, de la pile et du pont en H alimentant le moteur. La bobine est modélisée par une résistance, une inductance et une source de tension induite de mouvement dépendant de la position et de la vitesse du rotor.

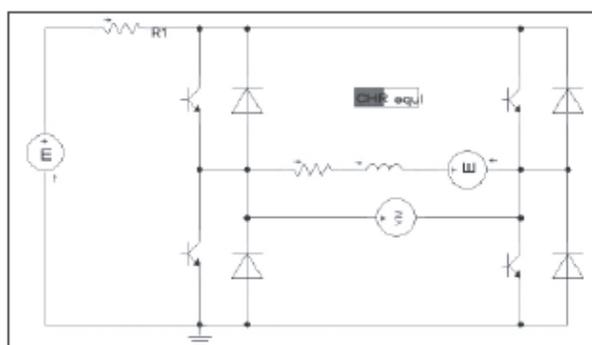


Fig. 7 : Modèle électrique du moteur Lavet

Le diagramme fonctionnel représenté en figure 8 décrit l'équation de mouvement du moteur. Il comporte des blocs d'entrée représentant les couples agissant sur le rotor (couple électromagnétique, couple résistant, couple de positionnement, couple de choc ...). L'intégration du couple d'accélération permet d'obtenir l'accélération du rotor. Une double intégration de l'accélération permet finalement d'obtenir la position du rotor. Le diagramme fonctionnel est couplé au circuit électrique représenté en figure 7 par la tension induite de mouvement et par le courant de bobine.

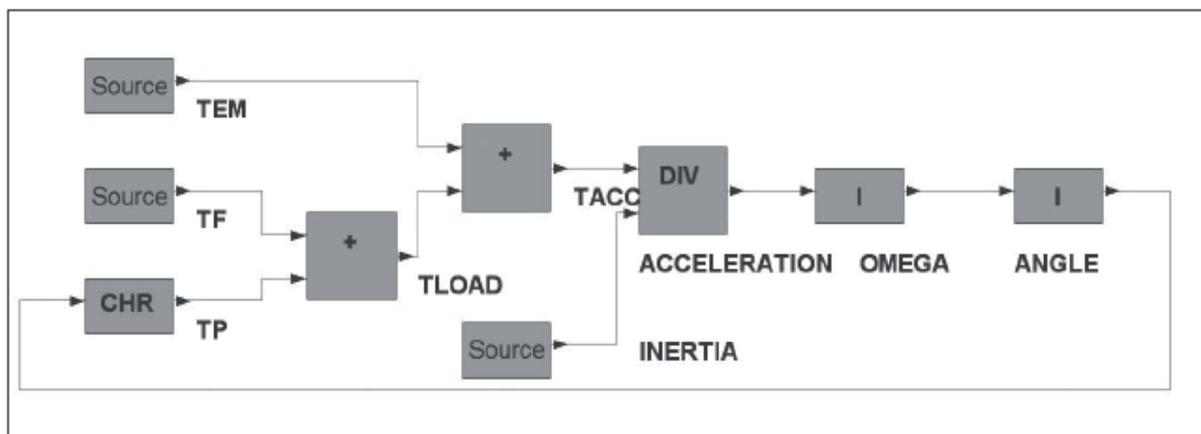


Fig. 8 : Diagramme fonctionnel du moteur Lavet

La stratégie de commande du moteur sera décrite à l'aide d'un réseau de Petri (fig. 9). Celui-ci est représenté par un graphe composé d'états (cercles) connectés par

des transitions (flèches). Lorsqu'un état est marqué (disque plein), toutes les actions associées à cet état sont exécutées. Il peut s'agir de l'ouverture d'un transistor, d'une tem-

porisation, d'une modification du couple de charge ou de l'occurrence d'un choc. La marque transite d'un état à l'état suivant lorsque la condition logique associée à la transition entre les deux états est vérifiée. Les réseaux de Petri peuvent être utilisés pour une multitude de tâches, telles que la détection d'un pas raté, l'enclenchement de transistors, la représentation d'un frottement non linéaire ou d'un jeu d'engrenage voire l'hystérèse magnétique.

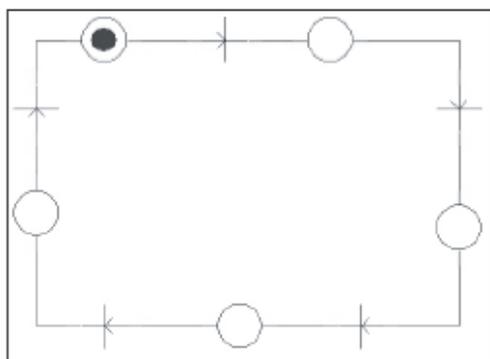


Fig. 9: Contrôle des impulsions par un réseau de Petri

Dans le cas illustré par la figure 10, le réseau de Petri est avantagement mis à profit pour décrire le pilotage électronique d'un moteur Lavet à l'aide d'un train d'impulsions hachées. Le réseau de Petri commande l'état des quatre transistors de commande en fonction du temps. L'exemple présente l'évolution en fonction du temps de la tension aux bornes du moteur, du courant de bobine, de la position du rotor et de sa vitesse pour une impulsion de commande.

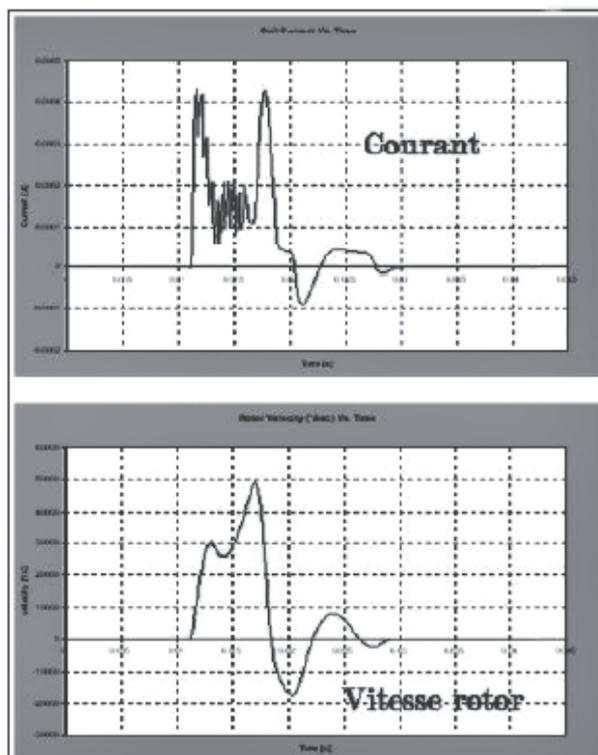
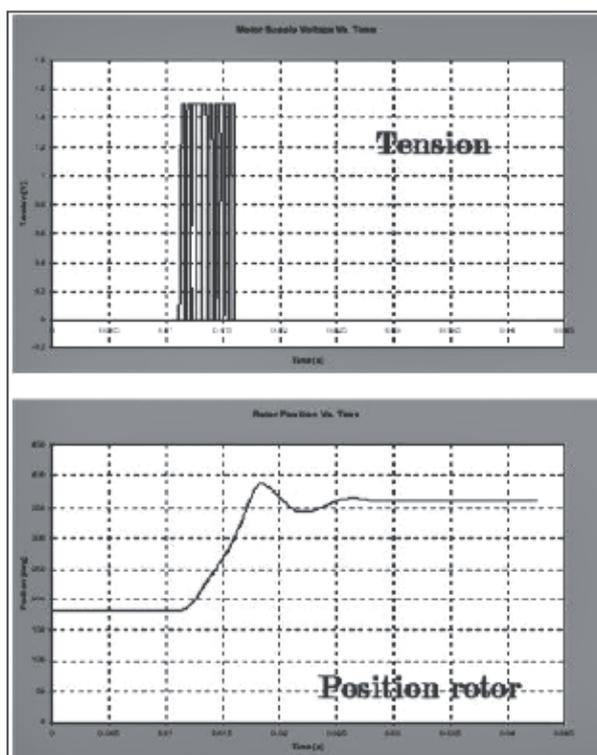


Fig. 10: Simulation dynamique d'un moteur Lavet

Par souci de simplicité, on se satisfait souvent d'un modèle linéaire du transducteur. Celui-ci suppose une inductance de bobine constante, un flux mutuel aimant-bobine variant de manière univoque en fonction de la position du rotor et un couple de positionnement indépendant du courant. Il est bien connu cependant que la non linéarité des matériaux magnétiques crée parfois des distorsions non négligeables sur le flux mutuel ou sur l'inductance de bobine. Par ailleurs, le modèle dynamique du moteur peut facilement inclure la non linéarité des matériaux.

D'un point de vue formel, il est également tout à fait possible d'inclure la présence des courants induits dans les parties massives, mais au prix d'une complexité élevée du modèle.

Le modèle à éléments discrets présenté fait appel à des paramètres du moteur qui seront avantagement extraits d'une analyse à éléments finis telle que décrite dans le paragraphe précédent. Si une analyse précise en régime transitoire est souhaitée, on pourra revenir à la méthode des éléments finis. Les résultats seront très précis, mais au prix d'un temps de calcul élevé.

La simulation dynamique permet de déterminer de nombreux paramètres de fonctionnement. Parmi eux, on peut citer la consommation théorique minimale à vide, la tension inférieure de fonctionnement, le couple utile, la tenue aux chocs mécaniques, le comportement sous champ magnétique externe ou les paramètres d'asservissement.

Ainsi, la modélisation statique par éléments finis et la simulation dynamique se complètent pour garantir un design optimum et un comportement dynamique fiable du système électromécanique.

La simulation dynamique peut également être appliquée à l'analyse et à l'optimisation du fonctionnement d'un moteur biphasé ou d'autres composants. A titre d'exemple, tout le processus de charge d'un accumulateur à l'aide d'une génératrice KINETRON entraînée par une masse oscillante peut être décrit par d'un diagramme fonctionnel, couplé à un modèle électrique de la génératrice. De même, si l'on se penche sur le cas de la montre mécanique, l'entraînement du balancier à partir du barillet ou d'une masse oscillante peut être aisément décrit. La finesse du modèle devra bien sûr être adaptée aux buts recherchés dans l'étude.

Conclusion

La conception de composants électromagnétiques horlogers fait avantageusement appel à la simulation numérique. La modélisation par éléments finis tridimensionnels permet d'optimiser, au stade de la conception, des composants tels que les transducteurs électromagnétiques (moteurs, générateurs), les vibreurs, les capteurs ou les blindages. Elle permet d'en optimiser les formes et les matériaux et d'analyser leur interaction avec leur environnement fonctionnel.

La simulation dynamique de systèmes complexes intégrant ces composants peut être effectuée à l'aide d'un logiciel d'analyse de phénomènes multiphysiques. Ce type d'outil propose des approches adaptées aux phénomènes à analyser. Ainsi, il est possible d'intégrer dans le même modèle une commande électronique complexe, un transducteur, une charge mécanique variable et des perturbations. Ces logiciels peuvent être mis à profit pour analyser des mouvements à quartz classiques ou à remontage automatique et des mouvements mécaniques. Le modèle comportera en général un circuit électrique, un diagramme fonctionnel et un réseau de Petri. Ces langages de description peuvent être avantageusement utilisés pour décrire des phénomènes électriques ou mécaniques. Ils offrent l'avantage d'être relativement intuitifs et de permettre la modélisation de phénomènes complexes tels que l'hystérèse magnétique, les frottements non linéaires ou les jeux d'engrenage.■

Références

- [1] M. GROSJEAN, *Conception des micromoteurs pas-à-pas*, Thèse EPFL N° 423 (Suisse), 1981
- [2] CEDRAT, *Documentation FLUX3D*, Meylan (France), 2008
- [3] adapted-solutions, *User's guide Portunus*, Chemnitz (Allemagne), 2008
- [4] D. TAGHEZOUT, *Watch motors and generators*, Workshop Projet Européen M2EMS, Crète, 2007