

Simulation électromagnétique de mouvements horlogers

Daho Taghezout

Applied Magnetics

Grand-Rue 84, CH – 1110 Morges

magnetics@bluewin.ch – <http://www.maglink.net>

Juin 2021

19

Bulletin SSC n° 91

La simulation électromagnétique de mouvements horlogers a pris une importance accrue dans les bureaux d'étude depuis une vingtaine d'années. La méthode des éléments finis est abondamment utilisée en mécanique, et de plus en plus dans le domaine électromagnétique. Grâce aux progrès informatiques et aux avancées dans la caractérisation des matériaux, on peut prédire de manière précise le comportement de composants particuliers (moteurs, générateurs, chargeurs) et de phénomènes plus complexes (efficacité d'un blindage, perturbations magnétiques sur le ressort spiral, chocs mécaniques).

Prenons comme exemple la montre à quartz. On peut actuellement modéliser des mouvements comportant un ou plusieurs moteurs et en déterminer les performances dynamiques ainsi que la fiabilité sans faire appel à des prototypes. Sont en particulier cruciaux l'autonomie de la pile, le comportement en cas de chocs ou sous l'effet de perturbations magnétiques, ou le balourd admissible des aiguilles.

Les champs magnétiques ont également une influence sur le comportement dynamique de mouvements mécaniques. À titre d'exemple, le ressort spiral d'un mouvement mécanique classique réagira à la présence d'un champ magnétique excessif. La montre peut s'arrêter sous un champ intense. Après disparition du champ externe, la déformation, voire le collage des spires aura tendance à occasionner un retard ou une avance. Un champ résiduel dû à l'hystérésis magnétique dans les matériaux prolongera l'effet perturbateur sur le ressort spiral. Le passage à des matériaux céramiques pour le ressort ou un choix judicieux des matériaux du mouvement permettent de résoudre ce problème. Un blindage magnétique atténuera en partie l'influence du champ magnétique externe. Il est cependant clair qu'un blindage ne supprimera pas complètement les effets d'un champ magnétique de plus de 1'000 Gauss soit 80'000 A/m. À partir d'un certain niveau de champ magnétique, un blindage intégral, même constitué d'un matériau

performant comme l'alliage fer-cobalt ne présentera plus de sécurité du fait de sa saturation magnétique.

Nous présenterons dans cet article diverses applications de la simulation électromagnétique à des mouvements à quartz et mécaniques. Le premier exemple a trait à l'étude d'un moteur monophasé de type Lavet. Nous présenterons ensuite un mouvement gearbox basé sur un ou plusieurs moteurs biphasés bidirectionnels. Ensuite nous traiterons de la problématique du blindage magnétique et finirons par la présentation d'un dispositif de génération de champs intenses basé sur un cylindre de Halbach.

Moteur Lavet

Le moteur Lavet (Fig. 1) équipe la quasi-totalité des montres à quartz. Il est composé d'un stator et d'un noyau de bobine en alliage Fer-Nickel, ainsi que d'un aimant rotorique bipolaire en Sm_1Co_5 ou $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. La géométrie particulière du stator a pour objet de simplifier le montage du moteur et d'éviter une dispersion excessive de performances dans une production de masse. Le moteur est alimenté en mode pas-à-pas et effectue un angle de 180° par impulsion. En général un seul moteur entraînera les aiguilles HMS à travers un rouage réducteur. Pour les chronomètres,

plus de moteurs sont mis à contribution. Les aiguilles représentent une inertie supplémentaire à entraîner mais la charge mécanique du moteur est très faible si on excepte la période d'entraînement du calendrier ou un éventuel défaut mécanique. L'impulsion de commande possède souvent une durée constante. Sa valeur est ajustée pour vaincre le couple maximum que le moteur devra entraîner. Cette stratégie de commande est très pratique et n'implique pas une qualité de mouvement soignée. Elle conduit cependant à un excès de consommation. De plus, l'énergie fournie à chaque impulsion doit être adaptée au couple le plus élevé. Une technique datant des années 1980 consiste à utiliser une impulsion de durée fixe et hachée à fréquence constante (en général 1'024Hz). Le rapport cyclique est périodiquement réduit jusqu'à la détection d'un pas raté. Ensuite, ce rapport cyclique est incrémenté et restera fixe pendant un laps de temps constant. Sans perte de pas, il est de nouveau décrémente. Cette stratégie, séduisante a priori, a conduit à passablement de déboires (lire consommation élevée) si les paramètres du moteur en production varient de manière excessive. L'utilisation de cette technique nécessite par ailleurs une qualité élevée du mouvement. La simulation numérique est dans ce cas très utile pour une conception du moteur robuste et peu sensible aux tolérances de fabrication. Elle permet en premier lieu de détecter les zones saturées et d'optimiser la géométrie du moteur pour satisfaire le cahier de charges du mouvement. En second lieu, le moteur sera testé dans différentes conditions (consommation à vide, comportement en charge, choc mécanique, influence d'un champ magnétique, etc.).

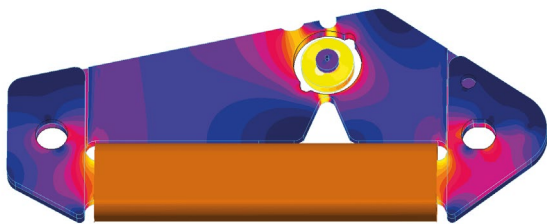


Fig. 1 : Moteur Lavet (induction magnétique générée par l'aimant).

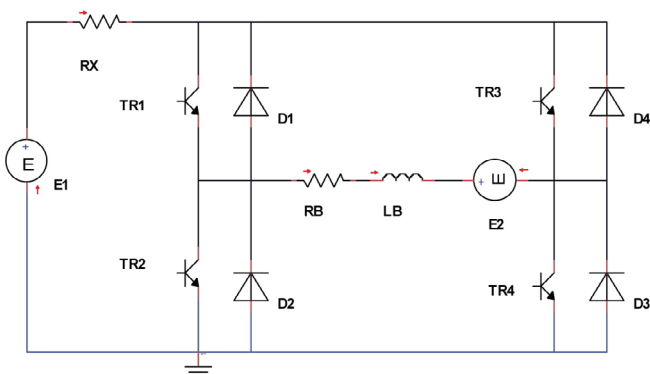


Fig. 2 : Circuit d'alimentation du moteur Lavet.

Pour prédire le comportement dynamique de manière précise, une modélisation par éléments fins en régime transitoire est nécessaire. Celle-ci est longue et ne doit être utilisée que pour une validation finale de la géométrie du moteur. Un modèle de moteur basé sur des résistances, inductances et sources de tension contrôlée peut être plus simple à mettre en œuvre, mais il est moins précis. Les paramètres du moteur sont calculés par une étude à éléments finis en régime statique nettement moins gourmande en temps de calcul puis insérés dans un logiciel de simulation de circuits. La commande électronique du moteur est présentée en figure 2. Le modèle électrique du moteur y est représenté par une résistance R_B , une inductance L_B et une tension induite de mouvement E_2 . Le comportement mécanique du moteur et de sa charge (rouage et aiguille) est modélisé grâce à un schéma fonctionnel où les grandeurs mécaniques (friction, chocs, rouage, couple de positionnement) sont modélisées (Fig. 3). Le couplage numérique des modèles mécanique et électrique est réalisé par le couple électromagnétique et par la tension induite E_2 . La prise en compte de la transmission du couple et du rendement instantané du rouage est également un cas intéressant de simulation mais elle ne sera pas traitée dans le cadre de cet article.

Même si la géométrie du moteur Lavet est simple, la prédiction de son comportement n'est pas aisée. Le constructeur horloger sera surtout concerné par le balourd maximum des aiguilles, l'encombrement du moteur, l'autonomie de la pile, l'entraînement du calendrier, et enfin la tenue aux chocs mécaniques et aux perturbations magnétiques. Cela se traduit au niveau de la conception du moteur par un couple de positionnement, un volume de bobine, un couplage magnétique aimant-bobine, et des pertes internes (hystérésis, courants de Foucault, frottement sur les pivots) à minimiser. De même le design devra être robuste et peu sensible aux tolérances mécaniques. De celui-ci, on déterminera ensuite la consommation du mouvement, la tension de démarrage et le couple de charge maximum. Enfin on testera le comportement du moteur sous choc mécanique ou en présence d'un champ magnétique.

Un autre paramètre intéressant est la vitesse maximale d'entraînement en boucle ouverte. Celle d'un moteur Lavet ne dépasse pas 64Hz (32 tours par seconde) en boucle ouverte. Ceci représente un inconvénient majeur pour le test ou la mise à l'heure automatique des mouvements HMS avec seconde. Dans ce cas, un mouvement chronomètre avec entraînement séparé des aiguilles représente une solution intéressante, mais relativement coûteuse en termes de place et de prix de revient.

Moteur biphasé gearbox

Le moteur Lavet est par essence unidirectionnel. On peut cependant le piloter dans le sens opposé par la

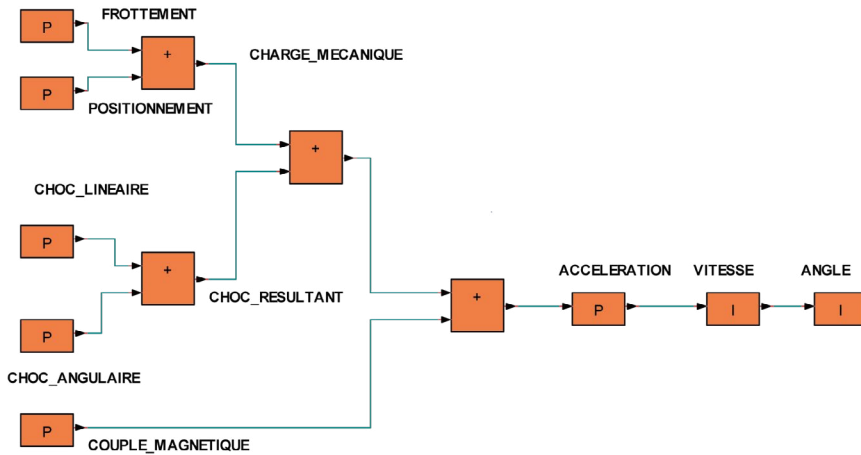


Fig. 3: Schéma fonctionnel mécanique du moteur avec rouage.

méthode dite «à balancement». Pour prendre un exemple, considérons que le moteur tourne normalement dans le sens horaire. Pour faire tourner l'aiguille dans le sens anti-horaire, une impulsion de commande de courte durée est imposée pour faire tourner le moteur sur 20 à 30° dans le sens horaire. Ensuite elle est inversée. L'impulsion suivante sera du même type, avec un sens opposé. Il est également possible de piloter le moteur en boucle fermée mais cette technique est très délicate et sort du cadre de notre article. La méthode à balancement requiert un circuit de commande spécifique et possède par ailleurs plusieurs inconvénients: inertie et couple de charge limités, mouvement inesthétique de l'aiguille, vitesse limitée et consommation excessive.

Le moteur biphasé (Fig. 4) est caractérisé par une forme très compacte, deux bobines et un mouvement bidirectionnel. Alimenté par des impulsions de forme adéquate, il peut en outre tourner à très haute fréquence dans les deux directions.

Né en 1982 dans le Groupe Swatch, le moteur biphasé a été longtemps mis de côté par manque d'intérêt pour le mouvement bidirectionnel et du fait du coût supplémentaire lié à la présence d'une seconde bobine. Le succès de ce moteur s'est révélé récemment par les montres connectées analogiques (exemple en Fig. 5). Les aiguilles sont pilotées de manière indépendante et rapide. Elles peuvent afficher diverses informations puis reprendre leur position initiale dans le sens de rotation le plus court. Les trois pôles statoriques sont décalés de 120° et reliés par des isthmes facilitant le montage du stator. Le rotor est de type bipolaire avec une magnétisation diamétrale. Sa position de repos est confondue avec l'axe géométrique du moteur. En alimentant une bobine ou l'autre, le rotor sera entraîné dans une direction ou dans la direction opposée. On dispose également d'un mode de commande où les deux bobines sont alimentées simultanément pour permettre un couple de charge plus élevé.

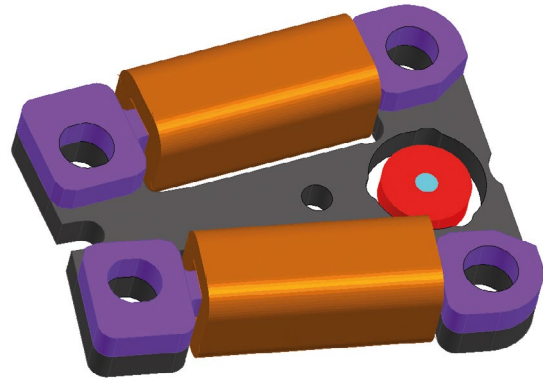


Fig. 4: Moteur biphasé (Collaboration Creajo SA).

La figure 5 montre un mouvement gearbox à deux moteurs commercialisé par la société TITAN Ltd. Chaque moteur dispose de son propre rouage pour l'entraînement d'une aiguille. Les moteurs biphasés sont par ailleurs résistants aux champs magnétiques et aux chocs mécaniques. En court-circuitant les deux bobines entre les impulsions, les courants induits par celles-ci génèrent un couple de freinage qui s'additionne au couple de positionnement pour amortir les oscillations du rotor. La géométrie du moteur est certes plus complexe que celle du moteur Lavet. La modélisation par éléments finis est donc cruciale pour sa conception. Cependant, là aussi, un modèle à éléments discrets peut être dérivé d'une analyse par éléments finis magnéto-statique et introduit dans un modèle à éléments discrets. La partie électrique (Fig. 6) comporte maintenant deux ponts en H et un circuit R-L-E pour chaque bobine. Le couplage magnétique entre les deux bobines doit également être pris en compte. À l'exception de la formule du couple électromagnétique, le modèle mécanique est identique à celui du moteur Lavet (Fig. 3).

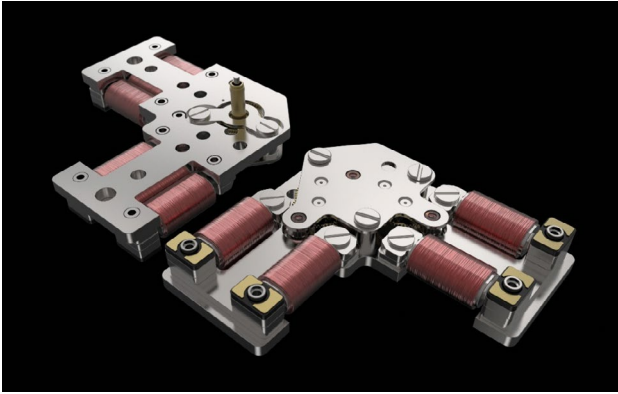


Fig. 5: Mouvement gearbox à deux moteurs biphasés TITAN.

Mouvements mécaniques

Dans un mouvement mécanique classique, le ressort spiral est constitué d'un alliage amagnétique. Il n'exclut cependant pas une faible hystérésis magnétique. Le matériau Nivarox possède un excellent comportement en température mais il est sensible aux champs magnétiques élevés. Le champ extérieur continu va induire des forces locales sur les spires du ressort et provoquer soit son arrêt, soit une déformation des spires. Le champ local sera fortement influencé par les pièces magnétiques constituant le mouvement. L'effet résiduel se retrouvera sur le spiral mais aussi sur les pièces magnétiques à proximité. Par ailleurs, des forces magnétiques générées par les champs résiduels dans les pièces magnétiques environnantes continueront d'influencer la marche du ressort spiral.

La figure 7 montre un mouvement mécanique dont on a éliminé les pièces amagnétiques pour la simulation. Le champ imposé est de 4'800A/m ou 6mT. L'échelle en-dessous est de 1.75T. La concentration de pièces magnétiques contribue au renforcement du champ au sein du mouvement. On peut déterminer les forces locales sur le ressort spiral et en déduire les déformations des spires. Une analyse par éléments finis permet également d'effectuer un choix judicieux des matériaux des pièces environnantes. Le blindage du mouvement peut par ailleurs être effectué par un simple anneau mince en fer doux disposé autour du mouvement, ou en faisant appel à une cage en fer doux ou en Fer-Cobalt dans laquelle le mouvement sera emboîté. La détermination précise du champ local pourra être aisément effectuée par une analyse à éléments finis, compte tenu de l'effet de saturation et d'hystérésis dans le blindage.

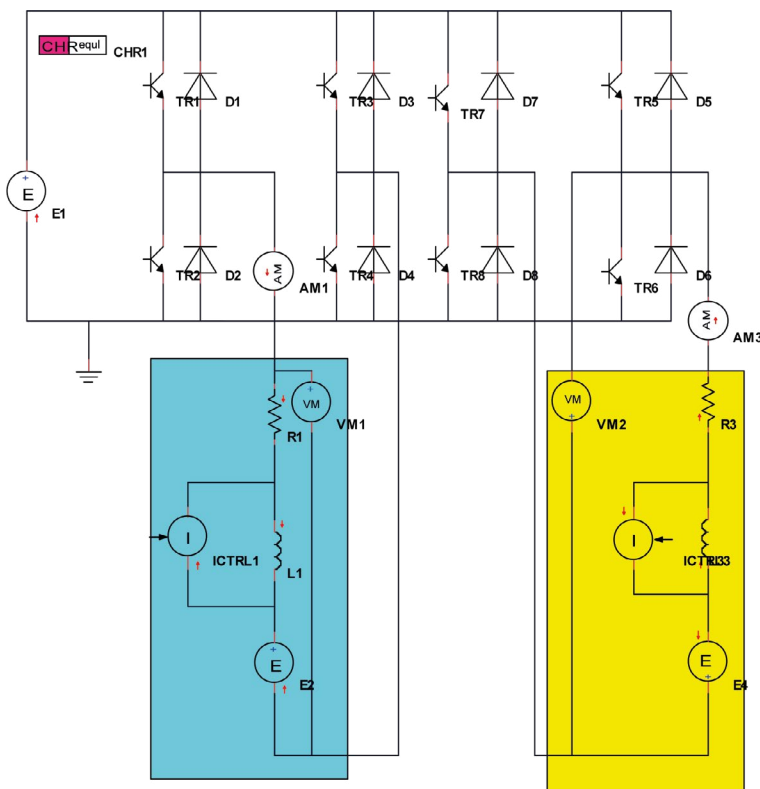


Fig. 6: Circuit d'alimentation du moteur biphasé.

Blindage

Autant les montres mécaniques que les montres à quartz sont sensibles aux champs magnétiques que l'on rencontre dans notre environnement. Les champs limites imposés par les normes NIHS 90-10 sont au minimum de 1'600A/m pour les mouvements à quartz et 4'800A/m pour les mouvements mécaniques. Le mouvement mécanique ne doit pas s'arrêter quand il est soumis au champ extérieur. L'effet résiduel pour ces mouvements doit en outre être entre ±30 et ±45 secondes par jour selon la taille. Une indication pour la résistance à un champ magnétique plus élevé (16'000 à 40'000A/m) peut en outre être indiquée.

Mouvements à quartz

Les contraintes dans un mouvement à quartz sont relativement plus faciles à prendre en considération. L'organe réagissant à un champ magnétique sera le moteur uniquement. L'effet du champ externe se traduira par un couple parasite sur le rotor et une saturation excessive du noyau de bobine. On peut négliger l'effet résiduel du fait que le moteur est parcouru par des flux alternatifs qui annulent l'effet du champ rémanent dans le stator et dans le noyau de bobine. Le blindage est également plus facile à mettre en œuvre comme le démontrera le test suivant.

Dans la figure 8, on a appliqué un champ horizontal sur un mouvement à quartz. Nous en avons éliminé les pièces amagnétiques pour la simulation. Le moteur est visible tout

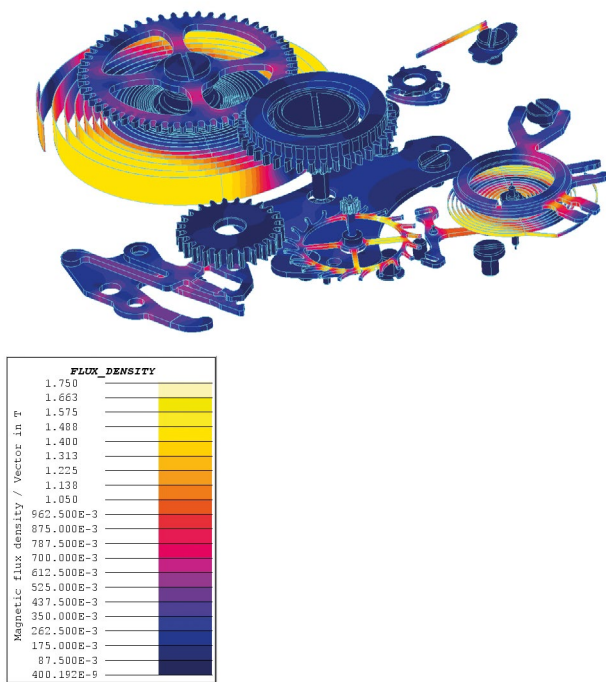


Fig. 7 : Champ horizontal à 4'800A/m sur un mouvement mécanique.

en bas de la figure et le champ externe est orienté parallèlement au noyau de bobine. Le champ dans le noyau (rotor désactivé) atteint 1.4T. Il est donc très proche de l'induction à saturation du noyau. Dans la figure 9, nous avons rajouté un blindage magnétique au-dessus du moteur. Ce blindage est constitué d'un alliage fer-nickel de type APERAM SUPRA 50 traité thermiquement après découpage pour garantir un champ résiduel faible. L'induction dans le noyau de bobine est maintenant inférieure à 0.2T. On remarque que la pièce additionnelle concentre le flux généré par le champ externe. La limite de fonctionnement du moteur sera ainsi bien au-delà de la norme de 1'600A/m.

Les mouvements mécanique et à quartz analysés sont présentés dans les figures 10a et 10b. Le nombre de pièces constitutives est élevé dans les deux cas. Il est donc important de bien connaître les propriétés des composants à intégrer dans la simulation, sous peine de durée excessive de calcul. Dans un tel cas de figure, il est cependant souvent difficile d'avoir des informations précises sur les matériaux constitutifs des pièces magnétiques et sur leur cycle d'hystérésis.

La norme NIHS 90-10 ne concerne que les champs continus. Ceux-ci peuvent être rayonnés par les haut-parleurs, par les fermails de sacs à main, les ordinateurs ou les téléphones portables. Les champs magnétiques à 50Hz sont également répandus dans notre environnement mais aucune norme n'a été édictée les concernant. Les composants magnétiques de la montre possèdent également une certaine conductivité électrique et les courants qui y sont induits par des champs alternatifs auront pour effet un comportement du mouvement sensiblement différent de celui traité par la norme NIHS.

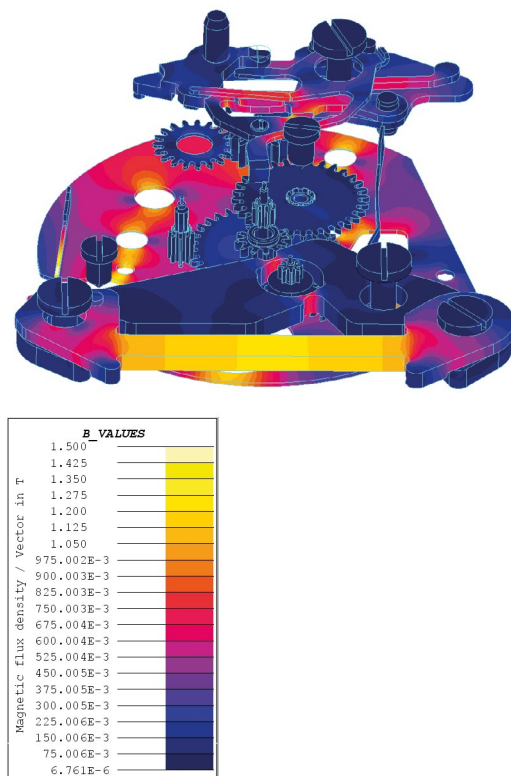


Fig. 8 : Distribution du champ magnétique dans le mouvement sans blindage.

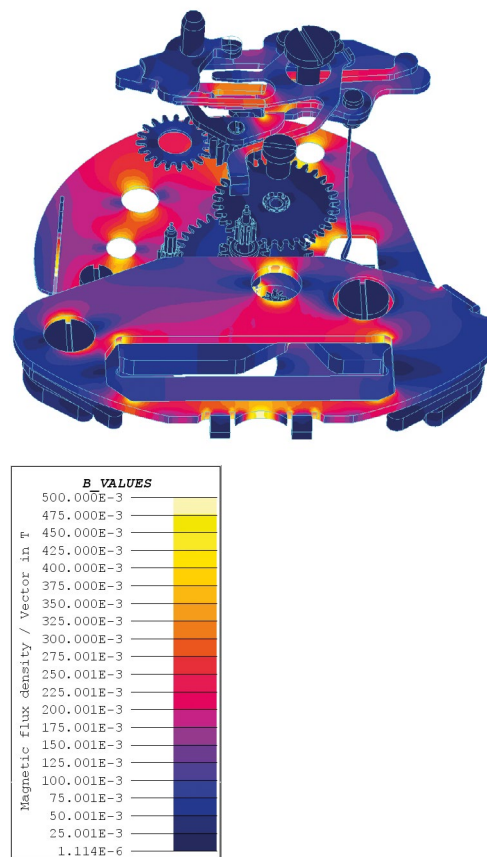


Fig. 9 : Effet d'un blindage sur la distribution du champ magnétique dans le mouvement.

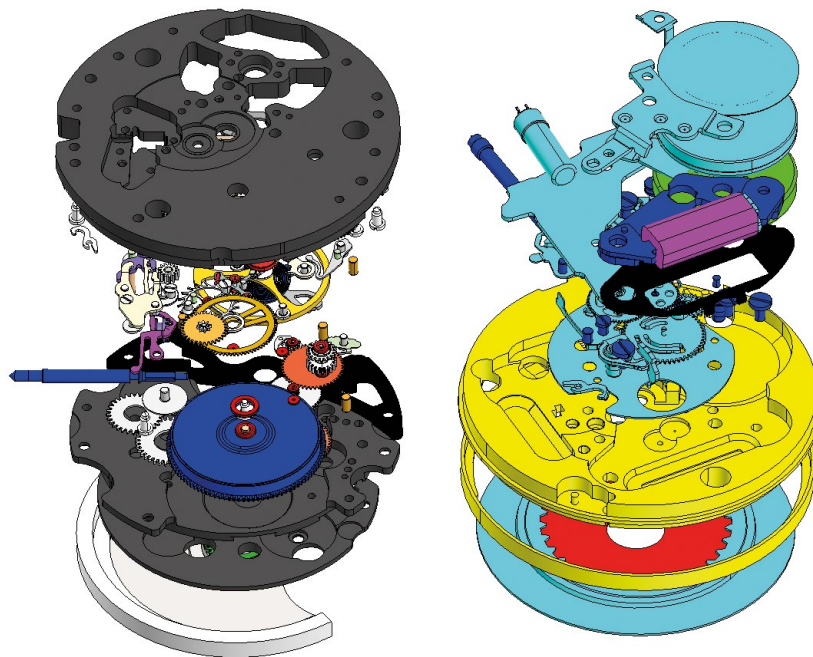


Fig. 10: a– Mouvement mécanique (gauche) et b–à quartz (droite).

Production de champs intenses avec un cylindre de Halbach

Le fonctionnement du moteur Lavet peut être perturbé par différentes sources de champ magnétique présentes dans notre environnement. Un test en simulation bien établi consiste à placer le moteur au centre de bobines d’Helmholtz (Fig. 11) chargées d’imposer un champ constant dans l’espace occupé par le mouvement. Le champ magnétique critique est en général parallèle à l’axe des bobines et sa valeur est proportionnelle au rayon des bobines, au nombre de spires et au courant imposé. On alimente ensuite le moteur avec un train d’impulsions et on détecte si un pas est raté. Ce test est souvent effectué avec une impulsion à durée constante (impulsion de rattrapage dans le cas de commande avec asservissement) et en l’absence de charge mécanique.

Le champ externe génère un couple parasite sur le rotor. Il est également susceptible de saturer le noyau de bobine. Dans le test décrit ci-dessus, la concentration (ou la déviation) du champ par les pièces magnétiques du mouvement n’est pas prise en compte. Il y a donc lieu suivant les cas de faire un test en incluant le mouvement et les éventuels blindages dans la simulation. Les bobines d’Helmholtz de laboratoire peuvent générer sans difficulté un champ correspondant à environ 8’000 à 12’000A/m, soit 10 à 15mT (100 à 150 Gauss). Au-delà, le courant à imposer devient important et peut conduire à un échauffement excessif des bobines. Sans compter les limitations inhérentes au dispositif de génération du courant continu. Pour générer un champ de 80’000A/m (ou 1T), les bobines devraient être refroidies par eau, ou être supraconductrices.

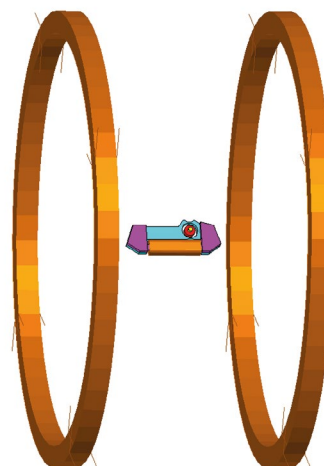


Fig. 11 : Bobines d’Helmholtz et moteur Lavet en test (échelle non respectée).

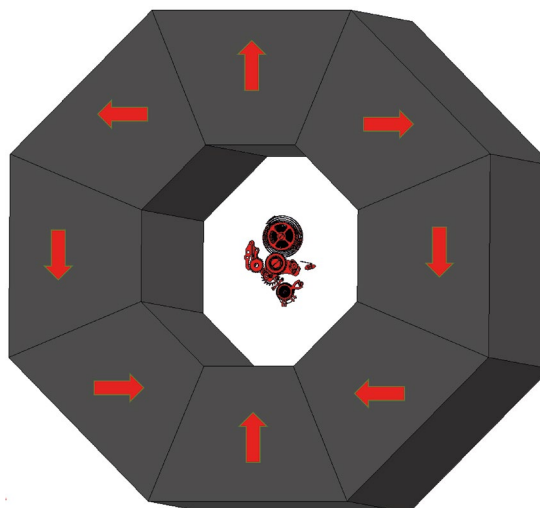


Fig. 12: Génération d’un champ intense par un cylindre de Halbach.

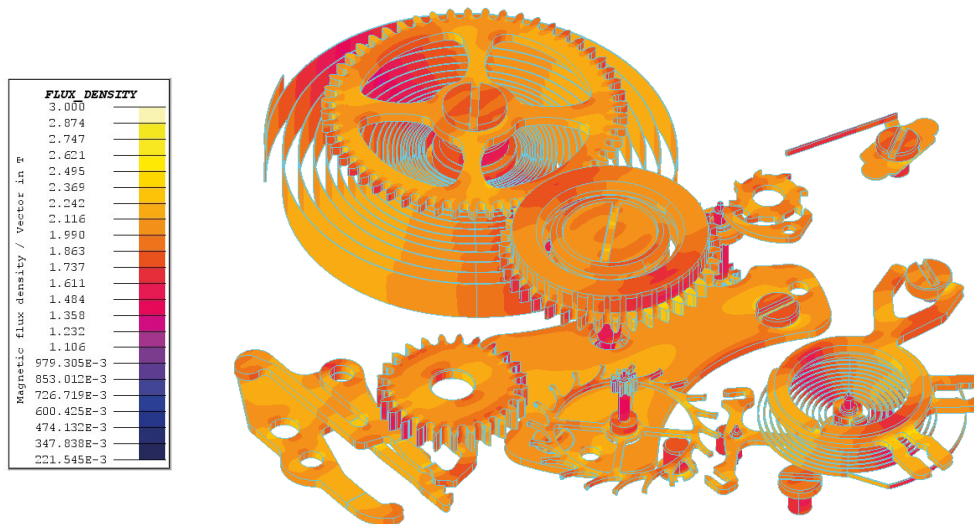


Fig. 13: Mouvement mécanique testé dans le cylindre de Halbach.

Un dispositif intéressant et qui ne nécessite aucune source d'énergie est présenté en figure 12. Il s'agit du cylindre de Halbach. Il est réalisé ici par 8 aimants frittés NdFeBo (énergie spécifique 280 kJ/m^3) magnétisés dans le sens des flèches rouges. Ce dispositif permet de créer des champs allant jusqu'à plus de 2 MA/m , soit 3 T dans l'orifice intérieur. Le champ magnétique est normal à l'axe central et peut être modulé de différentes manières selon l'axe (augmentation graduelle, variation exponentielle, champ tournant, etc). L'intérêt d'un tel dispositif est de pouvoir générer un champ intense au niveau du mouvement dans une procédure de test d'une montre mécanique antimagnétique ou d'un blindage. Si le cylindre possède une longueur importante par rapport à son diamètre extérieur, il sera possible de tester plusieurs montres en parallèle. La figure 13 montre à titre d'exemple un mouvement mécanique qui a été modélisé à l'intérieur du cylindre de la figure 12. L'échelle à gauche montre que le champ dans les pièces dépasse 2.5 T ($20'000 \text{ Gauss}$).

Conclusion

La simulation par éléments finis permet de traiter nombre d'applications horlogères. Il est possible actuellement de concevoir et d'analyser en régime dynamique des mouvements à quartz et de tester de manière fine leur robustesse vis-à-vis de perturbations magnétiques ou mécaniques. On peut également intégrer le mouvement dans la simulation afin d'en prédire l'influence dans l'aggravation ou l'atténua-

tion des chocs et des champs magnétiques perturbateurs. De même, la conception de blindages par simulation permet de répondre de mieux en mieux aux perturbations liées à notre environnement électromagnétique.

La montre mécanique devient quant à elle un objet de simulation de plus en plus intéressant. Un sujet d'importance est l'influence des champs magnétiques sur la marche de la montre. L'utilisation de matériaux amagnétiques type Silicium amène une solution pour les montres du segment supérieur. Un blindage magnétique efficace pour des champs d'intensité moyenne ou le choix de matériaux adaptés peut également amener une solution techniquement intéressante et économique.

Nous avons enfin présenté un dispositif de génération de champs intenses économique, et sans source d'alimentation électrique. Il illustre l'intérêt d'adapter les outils de test au développement des montres.

Remerciements

Nous tenons à remercier TITAN Company Ltd. et en particulier M. Seenivasan Krishnamurthy pour nous avoir autorisé à publier les images issues de simulations sur des mouvements TITAN.

Les modélisations par éléments finis ont été effectuées avec le logiciel FLUX3D (www.altair.com). Le logiciel Portunus (www.adapted-solutions.com) nous a servi pour la simulation par composants discrets de systèmes électromécaniques. ■