

> gravés, dans du silicium massif, les éléments mécaniques, certains recouverts d'or pour conduire l'électricité. Ces éléments sont rattachés au support (et *in fine* à l'objet en mouvement) par de petites tiges faisant office de ressorts.

Chaque composant comporte une masse pilote et une masse d'épreuve (*voir ci-contre*). Le pilote, directement attaché au support, est conçu pour vibrer selon un seul axe, notons-le X. Cette vibration est excitée électriquement par des électrodes, et est très peu sensible au mouvement de l'objet. La masse d'épreuve, elle, est attachée (*via* des tiges-ressorts) au pilote de façon à pouvoir vibrer selon un axe perpendiculaire (qu'on notera Y) à celui des vibrations du pilote.

FORCE DE CORIOLIS SUR UN MOUVEMENT VIBRATOIRE

En l'absence de rotation, le pilote entraîne la masse d'épreuve dans son mouvement d'oscillation selon X, sans autre effet supplémentaire. Mais si l'objet est en rotation autour de l'axe Z perpendiculaire aux deux premiers, le pilote comme la masse d'épreuve, tous les deux en mouvement à cause des vibrations imposées selon X, subissent une force de Coriolis selon Y.

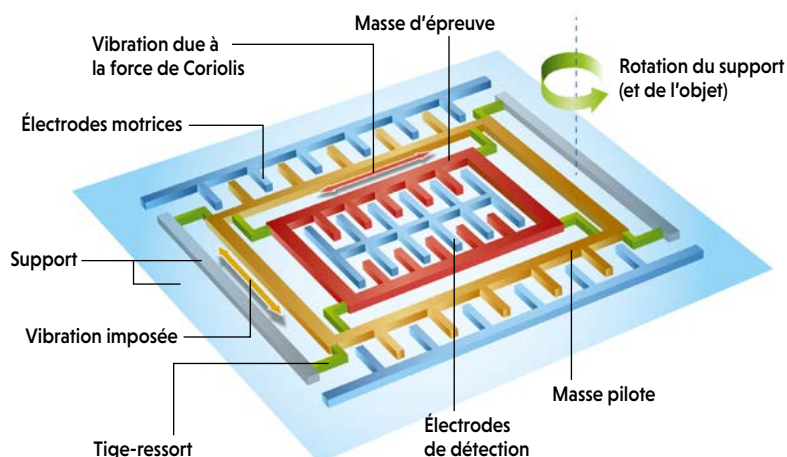
Cette force de Coriolis est sans effet sur le pilote, contraint à se mouvoir selon X. En revanche, la masse d'épreuve, libre de vibrer dans la direction Y, se met à osciller avec une amplitude proportionnelle à celle de la force (ici périodique) de Coriolis, elle-même proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation. L'amplitude de l'oscillation de la masse d'épreuve est mesurée grâce aux propriétés électriques du condensateur formé par cette masse et des électrodes fixées au support. Et de cette amplitude, on déduit la vitesse angulaire de rotation.

Les fréquences de vibration utilisées sont d'habitude comprises entre 10 kilohertz et 1 mégahertz, avec une sensibilité qui atteint aujourd'hui 0,01 degré par seconde par racine de hertz (c'est-à-dire qu'en mesurant durant une seconde, on a une sensibilité de 0,01 degré par seconde sur la vitesse angulaire).

Et si la rotation s'effectue autour d'un autre axe que Z? Cette éventualité est évidemment à prendre en compte puisqu'on ignore *a priori* selon quel axe s'effectue la rotation; de plus, cet axe peut varier au cours du temps. C'est pourquoi un gyromètre complet est composé de plusieurs dispositifs, dont les pilotes ont des directions de vibration distinctes. En combinant

MICROGYROMÈTRE ÉLECTROMÉCANIQUE

Le dispositif de base des microgyromètres est le plus souvent constitué d'une masse pilote qui effectue des vibrations imposées selon une direction et qui entraîne une masse d'épreuve ne pouvant se déplacer, par rapport au pilote, que dans une direction perpendiculaire. S'il y a rotation, la masse d'épreuve subit alors une force de Coriolis périodique qui la fait vibrer selon cette direction. L'excitation des vibrations pilotes et la détection des vibrations de la masse d'épreuve sont réalisées au moyen d'électrodes, le déplacement de la masse par rapport aux électrodes modifiant la capacité électrique du système masse-électrodes.



les signaux fournis par chacun des composants du gyromètre, on détermine alors la vitesse de rotation et son axe.

De plus, pour améliorer la sensibilité du système et éliminer l'effet des mouvements parasites, on peut associer deux composants dont les pilotes vibrent selon la même direction, mais en opposition de phase. Un mouvement de translation agira alors de la même façon sur les deux dispositifs, contrairement à un mouvement de rotation.

En pratique, il existe de nombreuses conceptions différentes de ces gyromètres miniatures, certaines permettant par exemple la mesure directe des variations d'angle, et non pas de la vitesse angulaire. Cette variété accroît encore la polyvalence de ces dispositifs.

En permettant de mesurer avec précision l'orientation de l'objet dans l'espace, les microgyromètres sont ainsi au cœur de tous les mécanismes de stabilisation et de contrôle actif, qu'il s'agisse des caméras, de l'assistance à la tenue de route pour les voitures, de l'équilibre des gyropodes ou de celui des drones multihélices. Par exemple, si les hélices d'un drone n'exercent pas exactement la même force verticale, l'appareil s'incline immédiatement et se précipite vers le sol. Une déstabilisation si rapide que, en l'absence d'asservissement, le pilote n'aurait pas le temps de réagir. ■

BIBLIOGRAPHIE

V. M. N. Passaro et al.,
Gyroscope technology
and applications :
A review in the industrial
perspective, *Sensors*,
vol. 17(10), article 2284, 2017.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



LES AUTEURS



SÉBASTIEN STEYER
paléontologue
au CNRS-MNHN



ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien
au CEA, à Saclay

MAGNÉTO, MAÎTRE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Ce superhéros est capable de créer et de manipuler des champs magnétiques. Il n'en a cependant pas l'exclusivité: un grand nombre de techniques et d'instruments, des disques durs des ordinateurs à l'imagerie médicale, en exploitent les propriétés.

«**L'**humanité a toujours eu peur de ce qu'elle ne connaissait pas.» Les bras croisés et le regard sévère, il s'avance lentement dans les airs, arborant un casque de métal et une combinaison sombre: c'est Magnéto, l'un des plus puissants mutants de l'univers de Marvel Comics, éditeur américain de bandes dessinées de superhéros.

Les paroles de Magnéto, si elles font référence à son statut de mutant, pourraient tout aussi bien s'appliquer au champ magnétique qu'il manipule avec aisance. En effet, si le magnétisme est connu depuis l'Antiquité, on n'a compris le phénomène qu'au cours des ^{xix}^e et ^{xx}^e siècles. Encore aujourd'hui, le champ magnétique suscite parfois des angoisses ou des polémiques, à l'image des conséquences de l'inversion du champ magnétique terrestre.

Revenons sur ce phénomène physique qui est au cœur du fonctionnement de nombreux objets de notre quotidien ou de dispositifs plus rares: moteurs électriques, plaques à induction, disques durs, imagerie par résonance magnétique, trains à sustentation magnétique, électro-aimants tels que ceux utilisés dans les accélérateurs de particules, etc.

Mais qui est Magnéto? Imaginé par Stan Lee et Jack Kirby, pères de nombreux autres superhéros (comme Spiderman), Magnéto – alias Max Eisenhardt – apparaît pour la première fois en 1963 dans le premier numéro de *The Uncanny X-men*, une série mettant en scène des mutants doués de superpouvoirs. Rappelons que, dans le monde réel, un mutant est un individu présentant une modification accidentelle ou provoquée de son génome. Une mutation n'est pas toujours visible au niveau du morphotype, l'aspect extérieur de >

