

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie,
à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

DES PENDULES DE FOUCAULT SUR PUCE

Pour mesurer les rotations d'un appareil, les gyromètres électromécaniques s'appuient sur la force de Coriolis – la même force qui permet au pendule de Foucault de mettre en évidence la rotation de la Terre sur elle-même.

Quel est le point commun entre un smartphone, une manette de jeu vidéo, un drone à quatre hélices, une automobile ou un gyropode? Chacun de ces objets dissimule un minuscule gyromètre: une puce électromécanique de taille millimétrique qui mesure en temps réel la vitesse de rotation de l'objet et qui peut, par intégration temporelle, en déduire son orientation dans l'espace, étape indispensable pour stabiliser celle-ci.

Malgré leur modernité, ces dispositifs s'inspirent d'instruments et de principes connus au XIX^e siècle. Voyons lesquels et ce qu'il y a de nouveau.

S'ORIENTER À L'AVEUGLE

Pouvons-nous déterminer notre orientation dans l'espace et son évolution en l'absence de toute référence extérieure, par exemple dans une cabine de train dont

les volets sont baissés ou dans un avion en plein brouillard? Nous serions tentés de répondre oui. Lorsque nous sommes en voiture, nous savons même les yeux fermés que la voiture accélère parce que nous sommes collés contre le dossier du siège, et que nous tournons parce que nous sommes déportés sur le côté. Ces forces ressenties sont des forces d'inertie, mesurables par des dynamomètres ou par l'inclinaison d'un fil à plomb.

Cependant, la mesure de ces forces ne permet pas toujours d'en déduire notre orientation. Un exemple? Lorsqu'un avion exécute un virage, le pilote incline l'avion, afin que la force ressentie par les passagers reste toujours selon la verticale du plancher. Avec un dynamomètre, on mesurerait une accélération supérieure à l'accélération de la pesanteur; mais il en serait de même si l'avion suivait une trajectoire incurvée vers le haut.

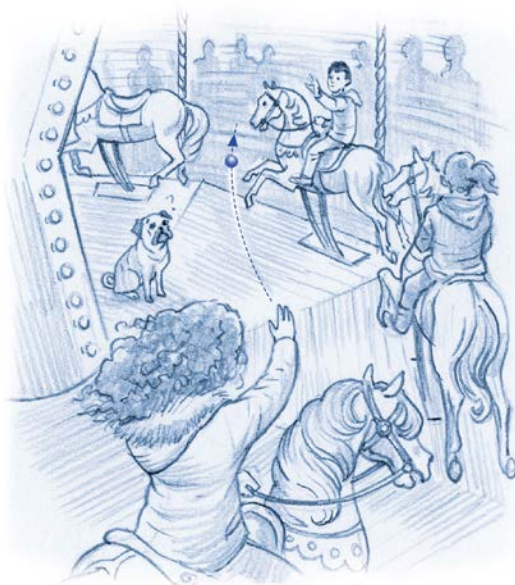
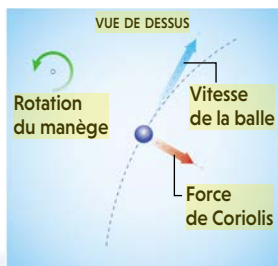
Le physicien français Léon Foucault a proposé deux solutions à cette difficulté.

La première tourne et la seconde oscille. La solution tournante, c'est le gyroscope, qu'il a perfectionné en 1852. Grâce à une suspension adaptée, une masse en rotation très rapide autour d'un axe est libre de pivoter dans toutes les directions. Dans ces conditions, l'axe conserve sa direction quels que soient les mouvements de la suspension, solidaire de l'objet en mouvement, l'avion dans notre exemple. Un ensemble de gyroscopes permet ainsi de déterminer à chaque instant l'orientation de la cabine. Ce dispositif a longtemps été au service des aviateurs, mais son efficacité avait un prix: un poids et un encombrement notables, problème que n'a pas



LA FORCE DE CORIOLIS

Dans un référentiel en rotation, une masse m en mouvement subit une force dite de Coriolis perpendiculaire à l'axe de rotation du système et à la vitesse de la masse. Plus précisément, cette force est égale à $2m$ fois le produit vectoriel du vecteur vitesse par le vecteur rotation (vecteur dirigé selon l'axe de rotation et de norme égale à la vitesse angulaire). Ainsi, dans le manège qui tourne ici dans le sens antihoraire, la trajectoire de la balle est déviée vers la droite. Vue d'un observateur extérieur au manège, c'est-à-dire dans le référentiel « fixe », la trajectoire est normale : pour cet observateur, la balle reste dans un même plan vertical.



Assistance à la tenue de route, stabilisation des prises de vue, jeux vidéo sur téléphone, navigation des avions... : les gyromètres sont omniprésents.

entièrement résolu le passage à des systèmes optiques (gyromètres à fibre optique, ou gyrolasers).

MESURER LES ROTATIONS GRÂCE À LA FORCE DE CORIOLIS

La solution oscillante est le « pendule de Foucault », qui met en évidence la rotation de la Terre sur elle-même. Il met à profit la force de Coriolis, une force d'inertie qui agit sur les objets en mouvement (ici la masse du pendule) dans un référentiel en rotation (ici la Terre). Cette force, perpendiculaire à la fois à l'axe de rotation du référentiel et à la vitesse de l'objet, est proportionnelle au produit de cette

dernière par la vitesse angulaire. Dans le cas de la rotation de la Terre sur elle-même, son intensité est faible : de l'ordre du millièème du poids pour un objet qui se déplace à 250 kilomètres par heure. Cependant, ses effets sont notables lorsqu'ils se cumulent sur une assez longue durée.

C'est le cas avec des phénomènes atmosphériques tels que les anticyclones et les dépressions, ou avec le pendule de Foucault. À chaque oscillation, la masse suspendue est légèrement déviée sur sa droite par rapport à sa trajectoire ; son plan d'oscillation tourne ainsi peu à peu, à une vitesse angulaire proportionnelle à celle de la Terre.

Ce sont ces deux caractéristiques (proportionnalité et orthogonalité de la force de Coriolis) qui sont à l'œuvre dans les gyromètres modernes. Pour obtenir des vitesses de déplacement suffisantes dans un espace limité, le système oscillant n'est plus un pendule, mais un système qui vibre à haute fréquence. Cela se prête bien aujourd'hui à la miniaturisation avec les systèmes microélectromécaniques (MEMS), fabriqués à l'aide des techniques de gravure et de lithographie développées pour l'électronique. Les gyromètres de nos téléphones tiennent ainsi dans une boîte de quelques millimètres de côté et de un millimètre d'épaisseur.

Un tel gyromètre est constitué de plusieurs composants similaires où sont ➤

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> 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.

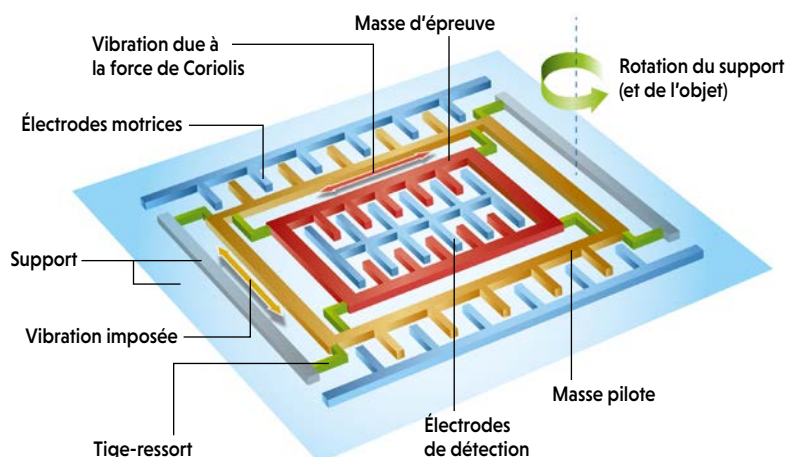
Cette force de Coriolis est sans effet sur le pilote, contraint à se mouvoir selon X. En revanche, la masse d'épreuve, libre de vibrer dans la direction Y, se met à osciller avec une amplitude proportionnelle à celle de la force (ici périodique) de Coriolis, elle-même proportionnelle à la vitesse angulaire 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.