

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

CECI N'EST PAS UN PUZZLE

Grâce à la radiographie,
on a retrouvé le dernier
fragment d'une toile
de Magritte que le peintre
avait découpée en
quatre pour en faire
de nouvelles œuvres.

E

n 1929, la crise venue des États-Unis débarque en Europe. Parmi ceux qu'elle a considérablement appauvris, on compte le peintre belge René Magritte. Il a quitté deux ans auparavant son pays pour Paris, où il a fréquenté les surréalistes (André Breton, Paul Éluard, Max Ernst...), mais il est contraint de rentrer, désargenté, à Bruxelles en 1930. En particulier, il est privé du soutien financier de la galerie bruxelloise Le Centaure, qui a fermé.

S'ouvre alors une période de vaches maigres qui durera plusieurs années. Pour s'adonner à son art, il est conduit à des actes extrêmes. C'est ainsi qu'il découpe en quatre morceaux l'une de ses toiles, *La Pose enchantée*, peinte en 1927 (voir page ci-contre). On connaît ces deux femmes nues accoudées sur des colonnes brisées grâce à une photographie, en noir et blanc, qui figure dans le *Catalogue raisonné* de l'artiste avec la mention: «Localisation inconnue [...] probablement détruite.» Que sont devenus les fragments?

La découverte de la dernière pièce du puzzle a été annoncée en novembre 2017

par une équipe conjointe des musées royaux des Beaux-Arts de Belgique et le Centre européen d'archéométrie de l'université de Liège. Reprenons l'enquête depuis le début.

ÉPARILLÉ PAR PETITS BOUTS

La première pièce, le tableau intitulé *Le Portrait*, peint en 1935, a été repérée en 2013 par Anne Umland et Michael Duffy, du musée d'Art moderne de New York, alors qu'ils préparaient une exposition. En remarquant qu'une autre œuvre se cachait sous celle visible, ils ont radiographié la toile: les rayons X ont révélé qu'il s'agissait du quart supérieur gauche de *La Pose enchantée*.

Encouragée par ce premier succès, la même équipe a pisté les toiles dont les dimensions pouvaient correspondre aux œuvres recherchées et a sondé la face cachée du *Modèle rouge*, peint en 1935 et conservé au musée Moderna, à Stockholm, en Suède. Gagné! C'était le quart inférieur gauche.

D'autres limiers ont ensuite pris le relais. Leur traque les a menés dans un musée de Norfolk, en Grande-Bretagne. Cette fois, en 2016, la radiographie mit en évidence le quart inférieur droit du tableau original sous *La Condition humaine*, elle aussi réalisée en 1935. Un seul morceau restait à trouver...

C'est là qu'entre en scène le projet *Magritte on practice*, qui a consisté à étudier chaque toile du musée Magritte, à Bruxelles, la plus vaste collection

d'œuvres de l'artiste. La pièce manquante était bien à Bruxelles, dissimulée sous les traits de *Dieu n'est pas un saint*, daté entre 1935 et 1936. La mission était accomplie et le dossier classé: *La Pose enchantée* était entièrement reconstituée.

On remarque que le réemploi des morceaux a attendu au moins cinq années. On peut y voir le signe d'une hésitation, Magritte ayant peut-être eu du mal à se résoudre à ce sacrifice. Y en a-t-il eu d'autres? Probablement, car certains spécialistes prêtent au peintre la fâcheuse habitude de recycler ses toiles.

Un autre indice vient du *Catalogue raisonné*, où de nombreux tableaux portent la mention «Localisation inconnue». Sont-ils là, sous nos yeux, et surtout sous d'autres couches de peintures?

Francisca Vandepitte, des musées royaux des Beaux-Arts de Belgique, le pense: «Si nous avons la possibilité de poursuivre ces recherches, il y a tout lieu de s'attendre à ce que d'autres tableaux disparus de Magritte fassent surface.»

Les 42 huiles et 21 gouaches que l'on connaît de l'artiste ne seraient alors que la face visible d'une œuvre beaucoup plus vaste. Les expositions dédiées à Magritte seront désormais multicouches! ■

Le communiqué de l'université de Liège:
<http://bit.ly/PLS-Magritte>



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

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.

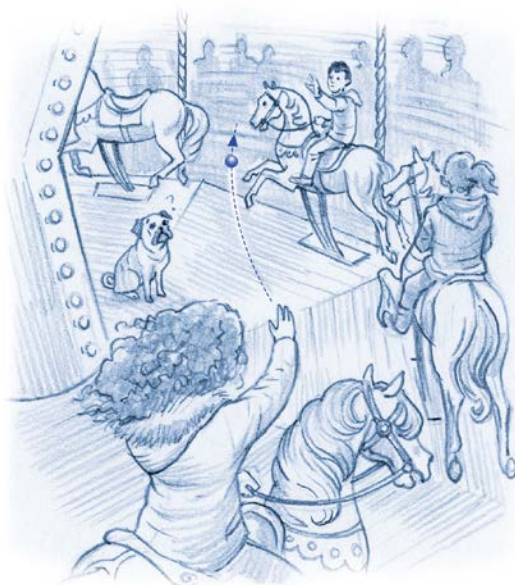
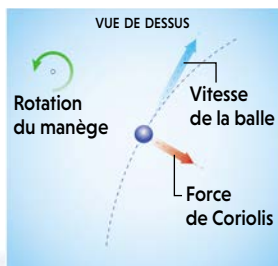
Le physicien français Léon Foucault a proposé deux solutions à cette difficulté.

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.

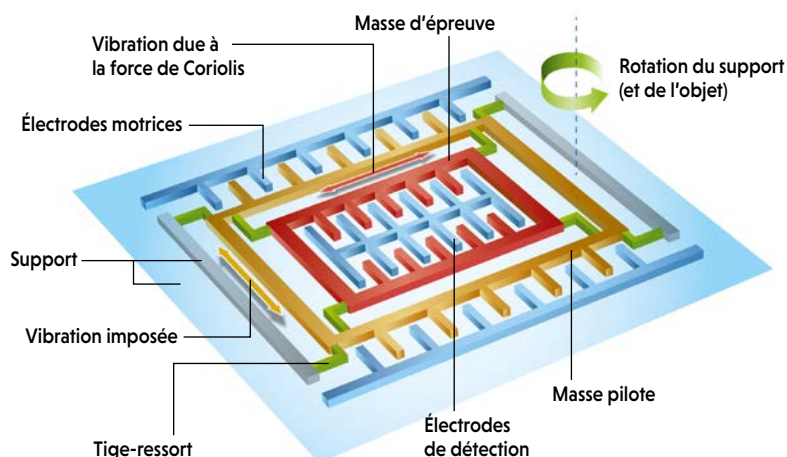
Cette force de Coriolis est sans effet sur le pilote, contraint à se mouvoir selon X. En revanche, la masse d'épreuve, libre de vibrer dans la direction Y, se met à osciller avec une amplitude proportionnelle à celle de la force (ici périodique) de Coriolis, elle-même proportionnelle à la vitesse angulaire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

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 >

