

> 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.

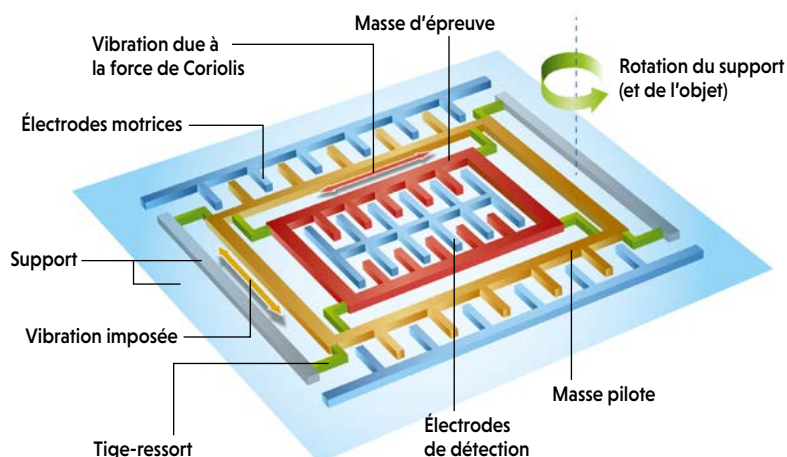
Cette force de Coriolis est sans effet sur le pilote, contraint à se mouvoir selon X. En revanche, la masse d'épreuve, libre de vibrer dans la direction Y, se met à osciller avec une amplitude proportionnelle à celle de la force (ici périodique) de Coriolis, elle-même proportionnelle à la vitesse angulaire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

**L**e 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](http://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 <sup>xix</sup><sup>e</sup> et <sup>xx</sup><sup>e</sup> 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 >





Magnéto est un supervilain capable de créer et manipuler des champs magnétiques pour déplacer des objets. Ici, on voit des débris s'aligner sur les lignes du champ magnétique à la façon de la limaille de fer en présence d'un aimant.

➤ l'individu. C'est le cas de Magnéto, qui ressemble à un humain ordinaire. Sa mutation ne change rien à son apparence, mais elle lui confère un superpouvoir : la capacité de créer de puissants champs magnétiques pour déplacer, faire léviter ou déformer à volonté divers objets, notamment ceux en fer ou en acier.

Sa biographie fictive, particulièrement soignée, nous apprend que ce personnage sensible, né juif polonais en 1926, est un rescapé des camps de concentration nazis. Son superpouvoir s'est exprimé pour la première fois sous le stress et la terreur lorsque, enfant, les nazis l'arrachèrent à sa mère : par la seule action de son esprit, il réussit alors à tordre avec facilité le portail métallique du camp de concentration.

### UN POUVOIR SOUS CONTRÔLE

En sciences de la vie, une mutation dont les effets ne s'expriment que dans certaines situations est dite conditionnelle. Les facteurs qui déclenchent l'expression de ce type de mutation sont variés ; ils peuvent être soit intrinsèques (par exemple une variation d'un autre gène, alors qualifié de modificateur), soit extrinsèques (par exemple des variations des conditions environnementales telles que la température). Si la mutation de Magnéto est conditionnelle, celui-ci a appris à contrôler son superpouvoir par la concentration, ce qui en fait rapidement un personnage très puissant. Mais, incompris et pourchassé par des humains qui le considèrent comme un danger potentiel, Magnéto répond par la violence... et utilise effectivement son superpouvoir comme une arme !

Le magnétisme est une propriété que, depuis l'Antiquité jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, on a associée aux aimants et à certains minerais riches en magnétite. La boussole en a été le symbole et l'application la plus célèbre. En 1820, le physicien danois Hans Christian

Ørsted a montré que l'aiguille d'une boussole est déviée par un courant électrique parcourant un fil à proximité. En 1831, le physicien britannique Michael Faraday en a donné l'explication en énonçant une loi qui lie électricité et magnétisme. Trente ans plus tard, le physicien écossais James Clerk Maxwell exposera une théorie cohérente de l'électromagnétisme, où l'électricité et le magnétisme sont deux facettes d'un phénomène plus fondamental, le champ électromagnétique. Dans le langage des mathématiques, le champ magnétique est une quantité vectorielle, c'est-à-dire définie par une direction, un sens et une intensité dont l'unité internationale est le tesla, choisie en l'honneur de l'ingénieur d'origine serbe Nikola Tesla (1856-1943), notamment inventeur de l'alternateur électrique.

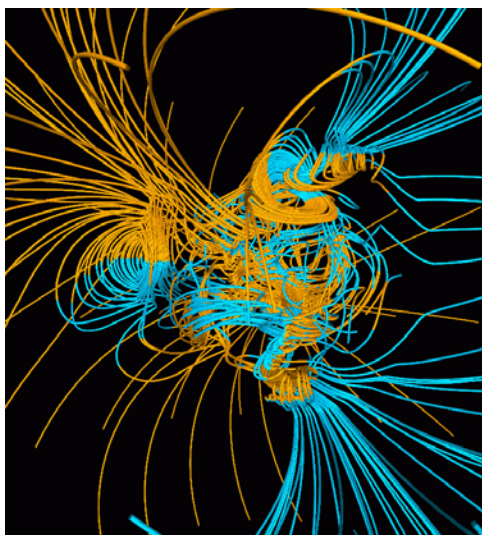
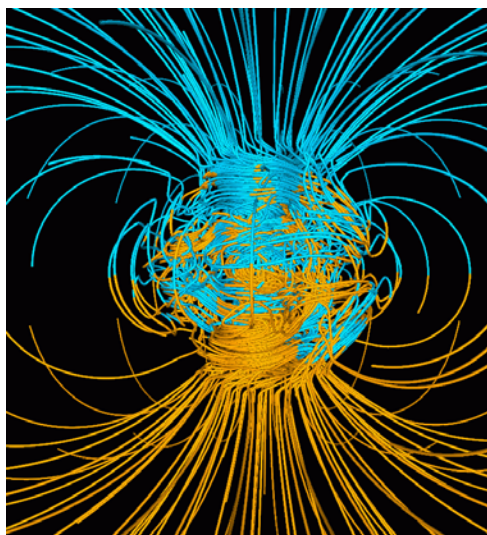
Les sources de champ magnétique sont de diverses natures : les aimants permanents (du fait d'une direction privilégiée du moment magnétique des atomes du matériau), le déplacement des charges électriques (le courant !) ou la variation temporelle d'un champ électrique (phénomène d'induction magnétique). Le spectre des intensités magnétiques est très vaste. Il va de quelques milliteslas pour le petit «magnet» qui tient la liste des courses sur la porte de votre réfrigérateur à 100 gigateslas pour certaines étoiles à neutrons – nommées pour l'occasion *magnetic stars* ou magnétars – en passant par les quelques teslas de l'électroaimant de votre enceinte haute-fidélité.

Grâce à son superpouvoir, Magnéto a vite compris qu'il pouvait manipuler une grande gamme de matériaux, à commencer par le fer et ses dérivés. Dans le film *X-Men 2* (Bryan Singer, 2003), pour s'échapper de sa prison de plastique haute sécurité, il extrait le fer du sang d'un gardien afin d'en faire de petites billes qu'il propulse à la vitesse de balles de fusil. Si l'hémoglobine contient effectivement des atomes de fer, l'accumulation anormale de

### SUR LE WEB

Pour voir une expérience d'extraction du fer contenu dans vos céréales préférées : [http://bit.ly/PLS483\\_SF1](http://bit.ly/PLS483_SF1)

Pour voir Magnéto extraire le fer du sang du gardien de prison et s'échapper (âmes sensibles s'abstenir) : [http://bit.ly/PLS483\\_SF2](http://bit.ly/PLS483_SF2)



Le champ magnétique terrestre est produit par un effet dynamo dû aux mouvements de convection du fer dans la partie liquide du noyau de la planète. Ces simulations ont été réalisées par Gary Glatzmaier, de l'université de Californie à Santa Cruz, et Paul Roberts, de l'université de Californie à Los Angeles, d'après leur modèle qui décrit la géodynamo. Dans la situation actuelle (à gauche), le champ magnétique est relativement régulier et comparable à un aimant géant doté de deux pôles bien définis. Lors de l'inversion du champ magnétique (à droite), la structure du champ magnétique devient chaotique.