

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 >



Magnéto est un supervillain 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^e 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.

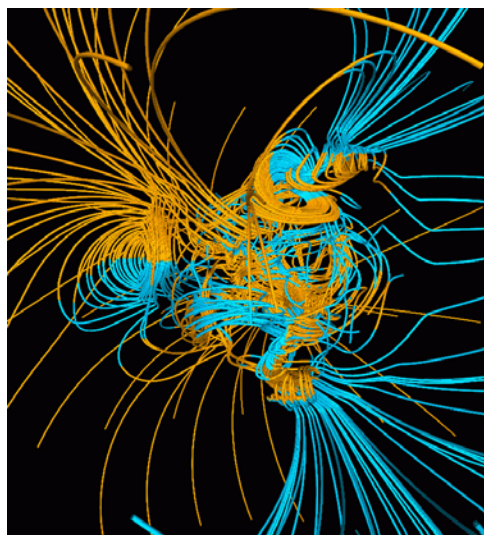
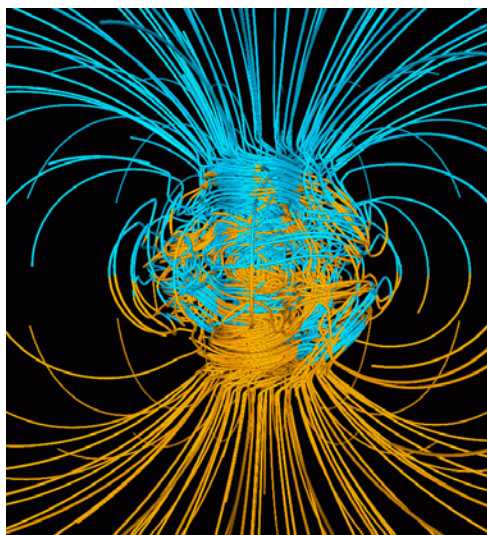
Les sources de champ magnétique sont de diverses natures: les aimants permanents (du fait d'une direction privilégiée du moment magnétique des atomes du matériau), le déplacement des charges électriques (le courant!) ou la variation temporelle d'un champ électrique (phénomène d'induction magnétique). 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

Pour voir Magnéto extraire le fer du sang du gardien de prison et s'échapper (âmes sensibles s'abstenir) : 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.

ce métal dans les tissus se nomme «hémossidérose» (du grec *haima*, le sang et *sideras*, le fer). Cette pathologie touchant diverses espèces est soit accidentelle (comme chez certains canards qui sont la cible de chasseurs utilisant de la grenaille alternative au plomb), soit héréditaire (chez l'humain, elle est fréquente, mais pas toujours bien diagnostiquée). Elle est alors due à un dérèglement des cellules (les macrophages) censées digérer le fer de l'hémoglobine, lequel se retrouve stocké dans divers organes (pancréas, cœur, foie); cette accumulation peut provoquer de graves lésions et autres symptômes tels que fibroses ou nécroses.

Dans le film *X-Men: l'Affrontement final* (Brett Ratner, 2006), Magnéto cherche à libérer d'autres mutants prisonniers sur l'île d'Alcatraz. Pour ce faire, il arrache et transporte dans les airs le pont du Golden Gate de San Francisco, énorme structure d'environ 900 000 tonnes au total (dont 75 000 tonnes d'acier)!

A priori, tous les matériaux sont, à des degrés divers, sensibles à un champ magnétique. Cette sensibilité est caractérisée par une grandeur nommée susceptibilité magnétique, qui quantifie la faculté du matériau à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique externe. Les matériaux dont la susceptibilité est positive sont dits paramagnétiques (l'aimantation est dans le même sens que le champ externe); ceux dont la susceptibilité est négative sont dits diamagnétiques. Les corps paramagnétiques ayant une susceptibilité élevée sont nommés ferromagnétiques. Ce sont les plus sensibles à l'action d'un champ magnétique et certains tels le fer, le cobalt et le nickel, sont capables de conserver leur aimantation même en l'absence de champ magnétique: ils servent à fabriquer des aimants permanents.

FAIRE VOLER DES PONTS ET LÉVITER DES GRENOUILLES

L'aimantation induite par le champ magnétique s'accompagne aussi de l'apparition d'une force mécanique du champ sur le matériau. Cette force est proportionnelle à la variation spatiale – ou gradient – du carré de l'intensité du champ magnétique. Autrement dit, ce n'est pas l'intensité du champ qui compte, mais la façon dont il varie dans l'espace. Pour manipuler le pont du Golden Gate, Magnéto doit donc créer un champ dont le gradient est élevé, et sa tâche est facilitée par le fait que la structure métallique du pont est ferromagnétique. La force résultante est dirigée vers l'endroit où le champ magnétique est le plus intense (sans doute Magnéto lui-même!), la susceptibilité d'un matériau ferromagnétique étant positive.

Si le champ magnétique agit sur un diamagnétique, la lévitation magnétique stable est

Le champ magnétique terrestre s'est inversé près de 300 fois depuis 200 millions d'années

possible. Dans ce cas, la force magnétique est dirigée vers les zones où le champ magnétique est le moins intense, la susceptibilité d'un diamagnétique étant négative. Le carbone pyrolytique, matériau artificiel voisin du graphite, a l'une des plus grandes susceptibilités diamagnétiques connues et lévite facilement au-dessus d'aimants permanents commerciaux. Mais l'idéal est de disposer d'un matériau supraconducteur, dont la susceptibilité magnétique négative est égale à -1 (de l'ordre de 100 000 fois celle du carbone pyrolytique). C'est ainsi que fonctionnent les trains à lévitation magnétique, dont seulement six lignes sont actuellement en fonction, pour une longueur cumulée de 70 kilomètres.

En 1997, les physiciens néerlandais Andre Geim et britannique Michael Berry ont utilisé la lévitation diamagnétique sur une petite grenouille vivante, sans dommage pour elle, en la plaçant dans un important gradient de champ magnétique. Ce champ agit sur le diamagnétique naturel qu'est l'eau contenue dans les tissus; il crée une force globale et homogène sur l'animal. Pour cette expérience spectaculaire, les deux chercheurs ont reçu le parodique prix Ig Nobel de physique en 2000 (Andre Geim a aussi obtenu le prix Nobel en 2010 pour l'obtention du graphène et son étude!). Magnéto peut donc tout à fait soulever des organismes vivants, voire appliquer son superpouvoir à lui-même pour léviter tranquillement dans les airs.

Capable de manipuler les champs magnétiques dans l'espace et dans le temps, Magnéto est donc incontestablement redoutable. Persécuté durant son enfance, il refuse de se plier aux règles dictées par les humains qui considèrent les mutants comme des individus malades et dangereux. S'opposant alors à son ami Charles Xavier, mutant aux puissants pouvoirs mentaux et partisan d'une cohabitation pacifique avec les humains, Magnéto menace l'humanité d'inverser la polarité du champ magnétique terrestre. Il sera finalement neutralisé par les X-men.

>

➤ L'intensité du champ magnétique terrestre est comprise entre 25 et 65 millièmes de teslas, selon l'endroit où on le mesure. D'après les modèles des géophysiciens, ce champ géomagnétique serait engendré par des courants de convection du fer et du nickel liquides présents dans le noyau externe de la Terre, à une profondeur comprise entre 3400 et 1220 kilomètres et où la température varie de 5700 °C à 3500 °C environ.

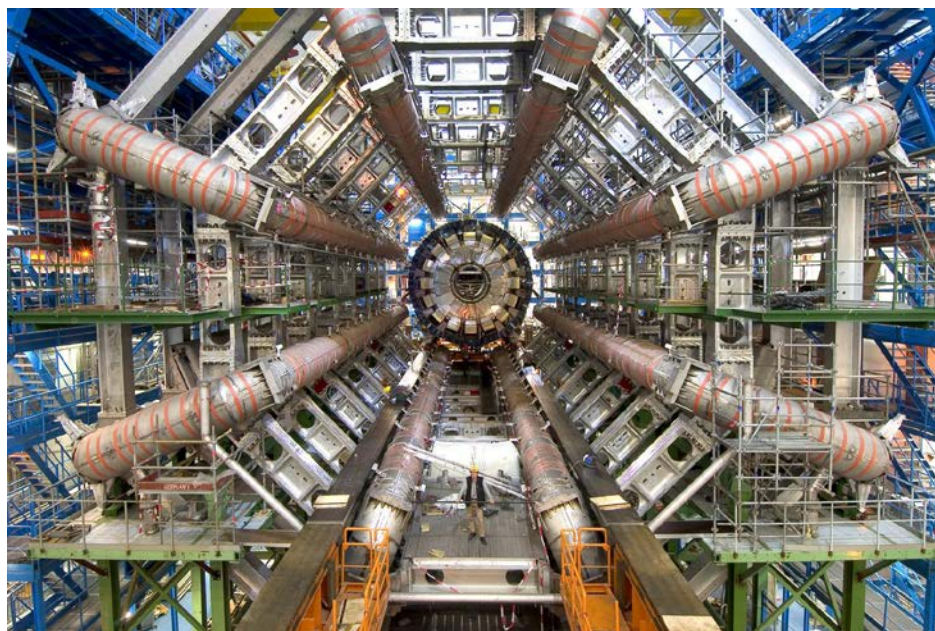
Schématiquement, on peut alors comparer la Terre à une sorte d'aimant géant dont l'axe des pôles magnétiques est incliné d'environ 11 degrés par rapport à son axe de rotation. Les lignes de champ de cet aimant tellurique géant émanent du pôle magnétique nord (actuellement situé non loin du pôle Sud géographique) et reviennent au pôle magnétique sud en dessinant ce que les spécialistes nomment la magnétosphère, dont la planète est enveloppée. Côté Soleil, cette magnétosphère est plus aplatie que du côté opposé où elle adopte une forme évoquant une queue de comète. La déformation de la magnétosphère du côté Soleil résulte de la pression exercée par le vent solaire. Ce flux de particules très rapides (200 à 1000 kilomètres par seconde) émises par l'étoile est une réelle menace pour les organismes vivants à la surface de la Terre, et la magnétosphère nous en protège, avec l'atmosphère.

LA COLÈRE DU SOLEIL

Plus dangereuses que le vent solaire, les « tempêtes solaires » sont des éruptions de matière solaire particulièrement intenses qui, malgré la magnétosphère, menacent les astronautes mais aussi les pilotes de ligne qui passent de nombreuses heures en haute altitude. Ces éruptions solaires peuvent aussi gravement perturber les appareils électroniques aussi bien en orbite (satellite, station spatiale) qu'en vol (avion, drone) ou même au sol (une panne massive du réseau électrique au Canada en 1989 a été provoquée par une telle tempête).

Si Magnéto inversait le champ magnétique terrestre, il annulerait les effets de la magnétosphère pendant un certain temps. Cela provoquerait une érosion partielle de l'atmosphère par le vent solaire. Des particules de haute énergie, mutagènes voire létales, pourraient atteindre la surface. Le supervillain serait alors à la fois maître du monde et seul au monde...

En fait, l'inversion du champ magnétique terrestre s'est déjà produite près de 300 fois durant ces 200 millions d'années passées ! Ces inversions naturelles du champ géomagnétique ne sont pas périodiques et seraient dues à des irrégularités de convection ou à des instabilités dynamiques du noyau terrestre (voir les figures de la page 88). Elles ont pour effet de perturber



la magnétosphère. Ces inversions pourraient donc avoir un effet sur l'évolution de la biodiversité, soumise au bombardement de particules de haute énergie, au cours des temps géologiques. Mais elles ne semblent pas corrélées avec les extinctions massives d'espèces qu'a connues la Terre.

La magnétosphère qui protège la vie sur Terre n'est pas propre à notre planète : Jupiter, par exemple, présente aussi une magnétosphère – qui est d'ailleurs considérablement plus importante que celle de la Terre – alors que d'autres corps célestes n'en ont pas ou plus, telle la planète Mars. En exobiologie, la présence d'un bouclier magnétosphérique est parfois considérée comme nécessaire, voire obligatoire, pour faciliter l'apparition de formes de vie à la surface d'une planète. C'est cependant oublier qu'une croûte de glace épaisse comme celle d'Europe ou d'Encelade – des lunes glacées de Jupiter et de Saturne – peut aussi faire office de bouclier. Si une vie existe sur ces petits corps, elle est protégée du vent solaire et du rayonnement cosmique par une épaisse couche de glace, et non par une magnétosphère (et une atmosphère).

Notons pour finir que le champ magnétique terrestre a un autre intérêt pour de nombreuses espèces, qui s'y fient pour se déplacer, s'orienter ou encore se reproduire. C'est le cas des oiseaux migrateurs, des baleines, des abeilles, mais aussi de bactéries dites magnéto-tactiques, qui suivent les lignes de champ magnétique pour se mouvoir. Ces bactéries sécrètent des magnétosomes, organites contenant des nanocristaux ferromagnétiques (greigite, Fe_3S_4 , et magnétite, Fe_3O_4). Comme Magnéto, le champ magnétique a plus d'un tour dans son sac. ■

Le détecteur *Atlas* du LHC, au Cern, comprend deux systèmes qui produisent des champs magnétiques. Sur ce cliché pris pendant la construction du dispositif, on distingue les huit éléments du champ magnétique toroidal externe. Il s'agit d'électroaimants supraconducteurs qui créent un champ non uniforme d'intensité comprise entre 2 et 8 teslas, dans un volume de 26 mètres de long pour 20 mètres de diamètre.

BIBLIOGRAPHIE

M. V. Berry et A. K. Geim, **Of flying frogs and levitrons**, *European Journal of Physics*, vol. 18, pp. 307-313, 1997.

R. E. Plotnick, **Relationship between biological extinctions and geomagnetic reversals**, *Geology*, vol. 8(12), pp. 578-581, 1980.

J.-S. Steyer et R. Lehoucq, **Les X-men, des mutants prometteurs**, *Pour la Science*, n° 440, juin 2014.

Tous les papiers se recyclent,
alors trions-les tous.

**C'est aussi
simple à faire
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio.

