

I. Le champ magnétique

I.1. Présentation

Sans en connaître l'origine, sans en savoir le fonctionnement, nous sommes déjà familiarisés aux manifestations du champ magnétique, par exemple les petites magnettes qui permettent de maintenir une feuille sur le réfrigérateur, les petits blocs qui permettent garder fermées les portes des meubles

Il y a d'autres phénomènes :

au quotidien - Champ magnétique terrestre

- Boussole

- Téléphone

- Moteur de petites voitures

- .../...

en laboratoire - RMN (résonance magnétique nucléaire)

- Spectrographie de masse

- Accélérateur courbe de particule

- .../...

• Historique

Antiquité: Le début de l'électromagnétisme se situe vers 600 av. J.-C., par l'observation d'interactions entre « aimants ». Les pierres de l'*île de Magnésie* avaient d'étranges propriétés de répulsion et d'attraction, d'où le nom de magnétisme et de champ magnétique.

Moyen-âge: A la fin du moyen-âge, on voit apparaître en Europe le début de l'utilisation de la boussole: une petite aiguille aimantée, mobile autour d'un axe, qui s'oriente différemment d'un point à l'autre de la terre. La terre elle-même agit donc comme un aimant, on en déduit l'existence d'un champ magnétique terrestre.

Remarque: Les chinois naviguaient déjà à la boussole depuis au moins le XI^e siècle.

I.2. Sources de champ magnétique

I.2.1. Action d'un aimant sur une charge

• Charges immobiles

Si on approche un aimant d'une charge immobile rien ne se passe.
Le champ magnétique n'a pas d'action sur les charges immobiles

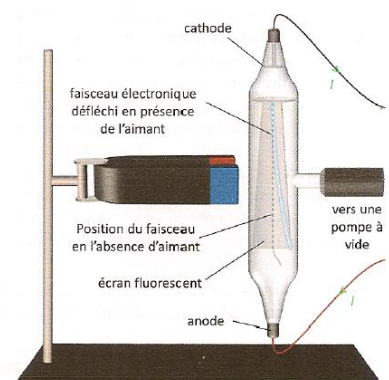
• Charges mobiles

Soit un faisceau d'électrons dans un tube cathodique

1.

2. On approche un aimant sur le côté du tube, on observe

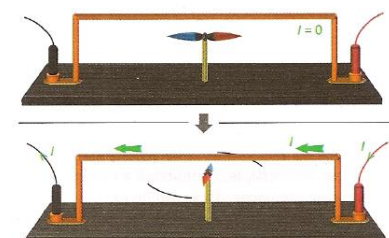
3. On approche le même aimant mais en changeant la face présentée, on observe



I.2.2. Action d'un courant sur un aimant

En 1820, Oersted observe par hasard qu'une boussole est déviée à proximité d'un fil parcouru par un courant I .

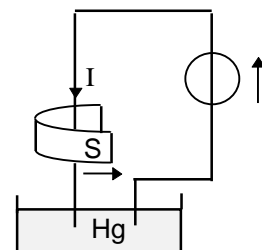
L'action d'un courant sur un aimant est analogue à l'action d'un autre aimant.



I.2.3. Action d'un aimant sur un courant ou d'un courant sur un autre courant

Puis Ampère, Laplace, Biot et Savart ont poursuivi l'étude et dégagent les lois du phénomène.

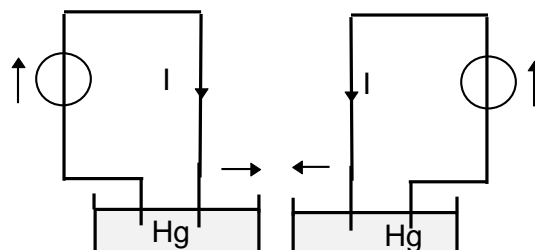
- Un fil parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique subit (lorsque cela est possible) un déplacement perpendiculaire au champ magnétique et au conducteur.



- Deux fils parcourus tous deux par des courants sont aussi en interaction.

→ Les deux courants sont dans le même sens, les deux fils ont tendance à se rapprocher.

→ Les deux courants sont en sens inverses, les deux fils ont tendance à s'éloigner.



Conclusion: Les courants et les aimants modifient les propriétés de l'espace. Ce sont les sources de champ magnétique. (Les aimants peuvent être considérés comme parcourus par des courants microscopiques).

I.3. Unités et ordres de grandeur

- Unités du champ magnétique

Relations connues :

Ainsi 1 Tesla correspond à

- Ordre de grandeur

Champ magnétique créé par une spire simple	$\approx 1 \mu\text{T}$	
Champ magnétique terrestre	$\approx 50 \mu\text{T}$	
Champ magnétique créé par aimant permanent usuel	$\approx 10 \text{ mT}$	
Champ magnétique créé par bobine utilisée en TP	$\approx 10 \text{ mT}$	
Champ magnétique utilisé en imagerie IRM	$\approx 10 \text{ T}$	
Champs magnétiques les plus intenses créés par des bobines supraconductrices	$\approx 50 \text{ T}$	

II. Champ scalaire et champ vectoriel

II.1. Définitions

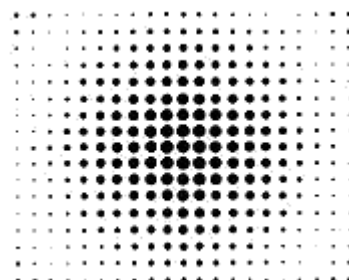
Soit \mathcal{D} une région de l'espace physique à 3 dimensions.

A chaque point M de \mathcal{D} on associe une grandeur scalaire ou vectorielle $G(M)$:

Champ : $\forall M \in \mathcal{D}, M \rightarrow G(M)$

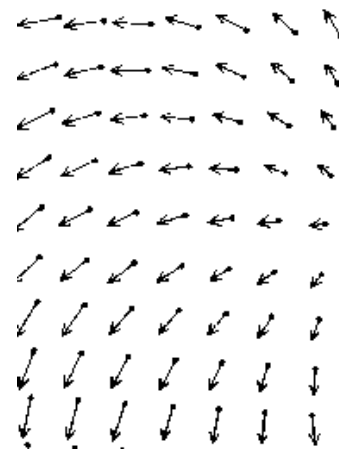
Si $G(M)$ est un scalaire on a ainsi défini un champ scalaire.

Exemples :



Si $G(M)$ est un vecteur on a ainsi défini **un champ vectoriel**.

Exemples :



La définition d'un champ exige que l'on précise les limites de l'espace concerné ainsi que la valeur de la grandeur G à ces limites (conditions aux limites).

II.2. Champ uniforme-Champ stationnaire

Soit $G(M,t)$, la valeur prise par le champ en $M(\vec{r})$ à l'instant t .

Champ uniforme : si à t donné, $G(M,t)$ a la même valeur en tout point $M(x,y,z)$ de \mathcal{D} .

Ce qui traduit la non-dépendance

Champ stationnaire : si en un point M donné, $G(M,t)$ a la même valeur à tout instant t .

Ce qui traduit la non-dépendance

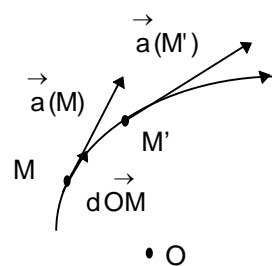
On dit aussi champ constant ou permanent.

II.3. Lignes de champ

Soit $\vec{a}(M)$ un champ de vecteurs.

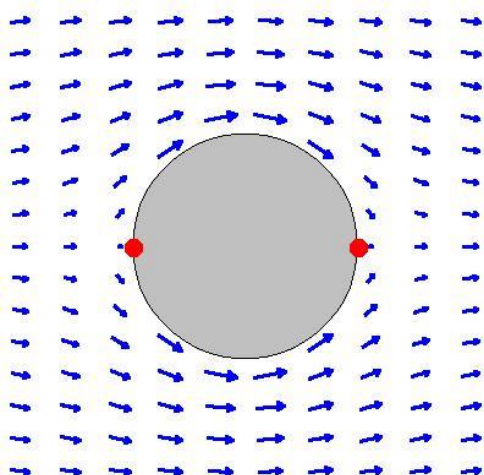
Ligne de champ c'est une courbe orientée tangente en chaque point M au vecteur $\vec{a}(M)$

Soit M un point d'une ligne de champ et O l'origine du repère choisi :

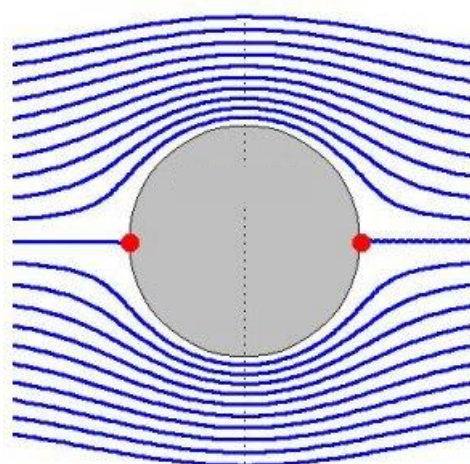


En coordonnées cartésiennes l'équation des lignes de champ est obtenue à partir de :

Ligne de
(M).



champ = courbe orientée en chaque point M par \vec{a}

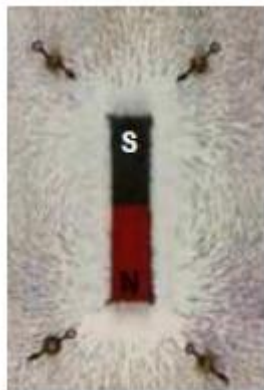


III. Quelques cartes de champ magnétique

III.1. Topologie du champ magnétique

- Obtention expérimentale d'une carte de champ

On peut tracer les lignes d'un champ magnétique grâce à de la limaille de fer dont chaque petit grain constitue une aiguille aimantée.



On pose sur un barreau aimanté une plaque de plexiglass sur lequel on saupoudre la limaille



Un aimant droit longueur 6 cm et diamètre 1 cm, entouré de limaille dans une éprouvette à gaz d'huile ; l'aimant est retenu par une collerette de matière plastique trouée, de même diamètre que celui de l'éprouvette soit 38 mm

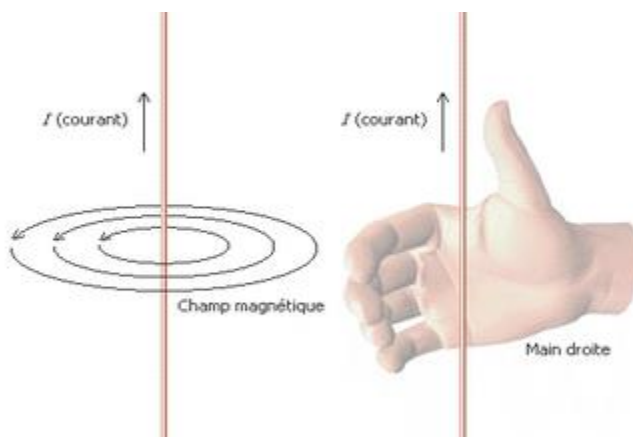
- Propriétés

On admet ici deux propriétés importantes qui sont illustrées par les exemples qui suivent.

→ Première propriété

Les lignes de champs magnétiques sont dans la plus part des cas des courbes fermées qui s'enroulent autour des courants électriques qui créent le champ magnétique.

L'orientation de la ligne de champ et le sens du courant sont liés par la règle de la main droite : si on met le pouce en direction du courant les doigts de la main droite tournent dans le sens de la ligne de champ et inversement.



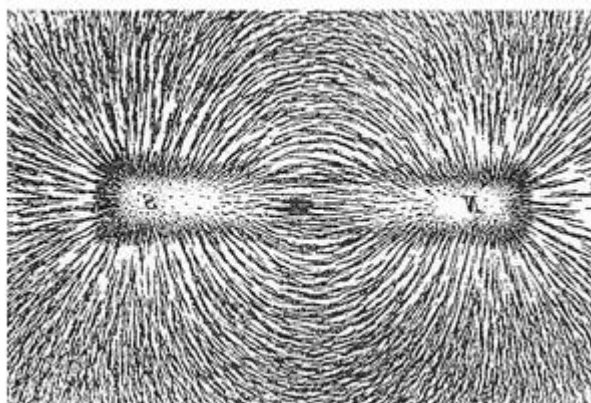
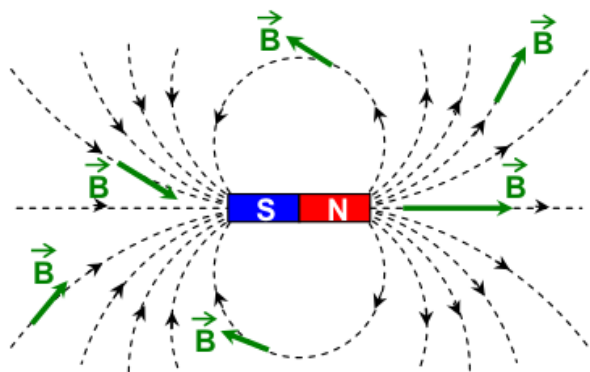
→ Deuxième propriété

Sur une carte de ligne de champ magnétique, le champ magnétique est le plus intense là où les lignes de champ se resserrent.

Les zones les plus actives d'un aimant sont appelées ses pôles (nord et sud). Deux pôles de même nature se repoussent, deux corps de nature différente s'attirent.

III.2. Champ créé par un aimant droit

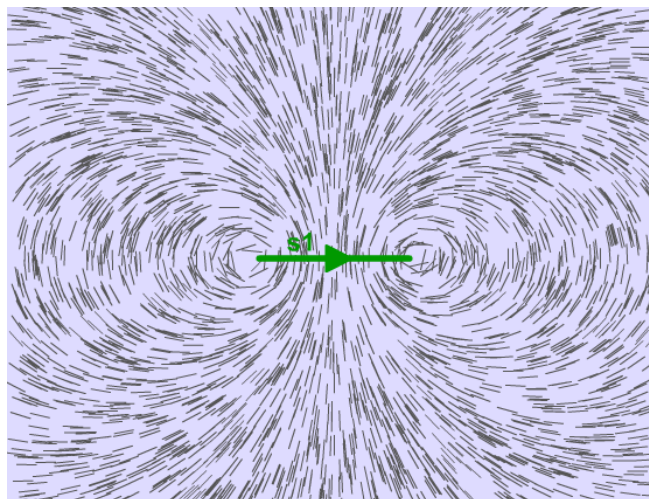
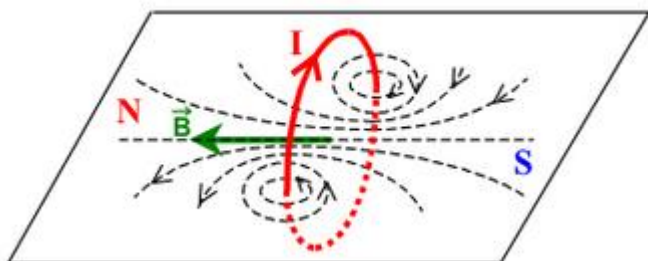
Sur le dessin de gauche, on a représenté le champ magnétique à l'aide de lignes de champ. Leur espacement révèle l'intensité relative du champ magnétique. De plus, ce sont des lignes qui s'orientent toujours du pôle nord vers le pôle sud.

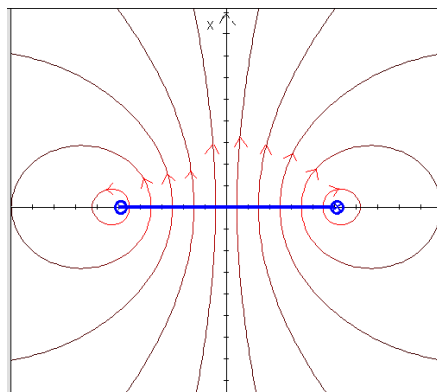


III.3. Champ créé par une spire circulaire

- Modèle : spire = cercle de centre O et de rayon a parcouru par un courant I. On oriente l'axe de la spire par la règle de la main droite.

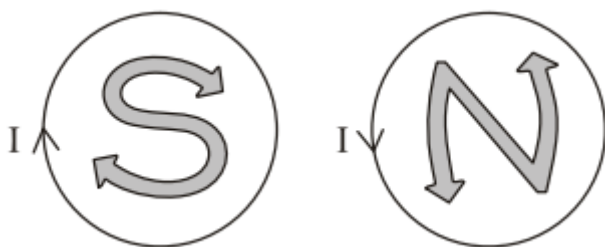
On examine les lignes de champ créées par le circuit le plus simple : une spire circulaire parcourue par un courant d'intensité constante dû à un générateur non représenté.





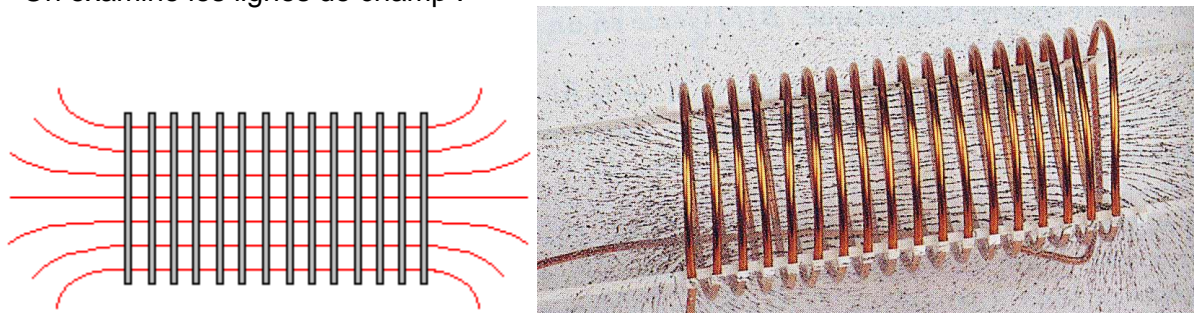
• Observations

-
-
- La norme du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant.
Application numérique: $a = 10 \text{ cm}$; $I = 10 \text{ A}$, le champ magnétique est maximal au centre de la spire
 $B_{\text{max}} \approx 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ ordre de grandeur de celui du champ terrestre.
-

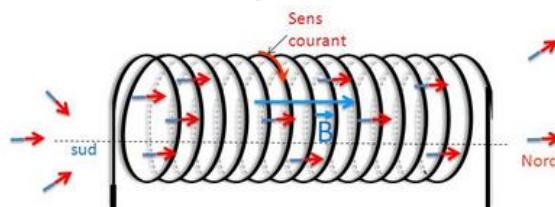


III.4. Champ créé par une bobine longue

- On appelle solénoïde un fil enroulé régulièrement en hélice de façon à former une bobine longue. Lorsque le solénoïde est parcouru par un courant, il crée des effets magnétiques analogues à ceux créés par un aimant droit : le solénoïde parcouru par un courant est une source de champ magnétique.
- On examine les lignes de champ :



- Méthode pour déterminer le sens du vecteur champ magnétique :
Le vecteur champ magnétique sort toujours par la face ou pôle Nord de la source de champ magnétique. En empoignant la bobine avec la main droite, dans le sens du courant, on écarte le pouce des autres doigts de la main ; le pouce ainsi écarté indique la face Nord, autrement dit la face par laquelle sort le vecteur champ magnétique.



- Intensité du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde :

Activité : Faire les activités demandées sur l'animation proposée sur le site de la classe.

On considère un fil bobiné à spires jointives sur un cylindre (solénoïde).

On remarque que le champ magnétique est quasi-uniforme à l'intérieur de la bobine, les lignes de champ restent parallèles sans se resserrer ni s'éloigner.

Pour un solénoïde très long ($L/R > 10$), bobiné avec n spires par unité de longueur, parcourues par un courant d'intensité I , on montre que l'induction magnétique à l'intérieur est pratiquement uniforme et que son intensité est donnée par la relation

$$B = \mu_0 n I$$

n est le nombre de spires par unité de longueur ; si le solénoïde a une longueur L et est constitué de N spires (boucle) alors, $n = N/L$

La constante μ_0 est la perméabilité du milieu dans lequel baigne le solénoïde. Dans le vide elle vaut: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$.

La formule est valable partout sauf tout près des extrémités des enroulements

Application numérique : $n = 1000 \text{ spires/m}$ $I = 1 \text{ A}$ alors $B = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.

IV. Le moment magnétique

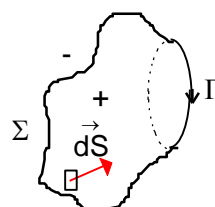
IV.1. Vecteur surface

- Soit Σ une surface s'appuyant sur un contour fermé Γ . Le sens de la normale en un point M de la surface est lié de façon conventionnelle au sens de circulation positif sur le contour.

Règles pratiques

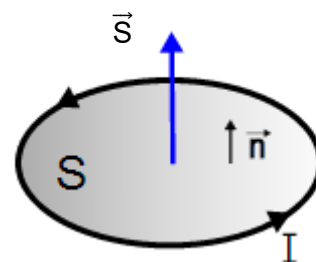
➤ « **Le tirebouchon de Maxwell** » On fait tourner le tirebouchon dans le sens de rotation positif choisi pour Γ . Le sens de translation du tirebouchon donne le sens de la normale positive.

➤ « **La règle de la main droite** » Les doigts de la main droite épousent le sens de rotation positif choisi pour Γ , le pouce ouvert donne le sens de la normale positive.



- **Vecteur élément de surface** : Soit M un point de Σ entouré d'un élément de surface dS : $\vec{dS} = dS \vec{n}$ avec \vec{n} normale positive.

Dans le cas d'une spire de courant c'est le sens de parcours du courant qui donne l'orientation de la spire et donc le sens du vecteur de surface.



IV.2. Le moment magnétique

Un dipôle magnétique est une boucle de courant de petite dimension, dont on étudie les effets à grande distance (par rapport aux dimensions de la boucle). Leur importance théorique est considérable pour un grand nombre de raisons :

- Un circuit localisé se comporte comme un dipôle magnétique pour tous les effets à grande distance.
- On n'a jamais pu mettre en évidence des charges magnétiques, qui seraient le pendant des charges électriques. Les sources ultimes du magnétisme de la matière sont les dipôles magnétiques correspondant aux petites boucles de courant dues aux électrons orbitant autour des noyaux.
- Les particules élémentaires, habituellement considérées comme des points matériels (électron, proton, neutron), portent en général un moment magnétique. Le champ magnétique créé par ces particules est celui d'un dipôle magnétique ponctuel.
- Enfin, un dipôle magnétique sert de base à la description du champ magnétique terrestre.

Soit une boucle parcourue par un courant d'intensité I constante.

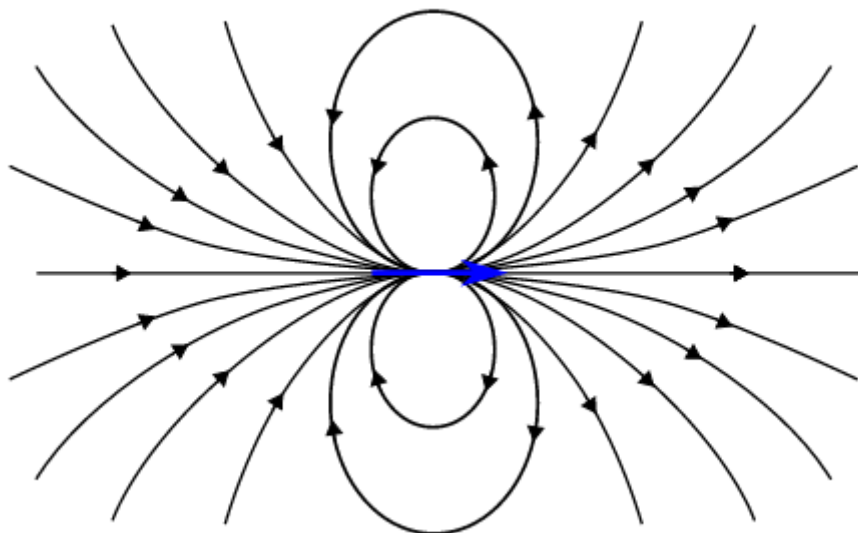
Si cette distribution de courant est étudiée à grande distance (la distance séparant M de la distribution est grande devant les dimensions caractéristiques de celle-ci) alors elle constitue un dipôle magnétique caractérisé par son moment magnétique noté \vec{m} définie par

$$\vec{m} = I\vec{S}$$

m s'exprime en $A.m^2$.

IV.3. Les lignes de champ d'un moment magnétique

Un moment magnétique représente tout aussi bien une boucle de courant qu'un aimant. Il présente de manière unifié le champ magnétique créé à grande distance.



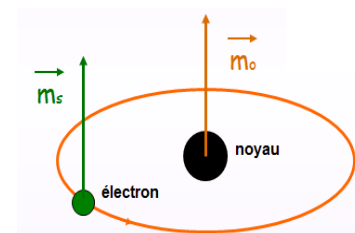
IV.4. La matière et le magnétisme

- Au niveau atomique :

-
-

- Tous les atomes ont-ils un moment magnétique ?

Non pas tous, il est nécessaire d'avoir des couches non saturées : les gaz rares sont donc exclus.

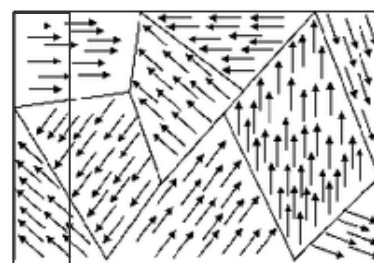


Si les atomes possèdent des couches incomplètes alors ils possèdent un moment magnétique atomique.

Le remplissage des couches électroniques devient complexe après les 18 premiers éléments et en particulier pour les métaux de transition: Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu ... Ils possèdent des couches incomplètes.

- Les matériaux ferromagnétiques

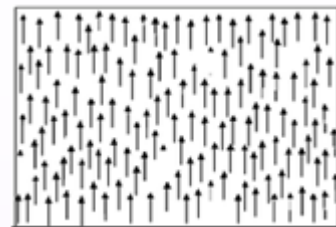
Lorsque l'on regarde, au niveau microscopique la structure de la matière d'un matériau ferromagnétique, on remarque l'existence de petits domaines d'aimantation homogène c'est à dire des lieux où les moments atomiques « jouent » collectifs, ils sont orientés dans une même direction. On appelle ces domaines les domaines de Weiss. Pierre Weiss (1865-1940), physicien, membre de l'académie des sciences.



→ L'aimant droit :

C'est un aimant permanent: un corps ferromagnétique qui, une fois aimanté, conserve un état très ordonné des moments magnétiques atomiques. Le moment magnétique permanent macroscopique:

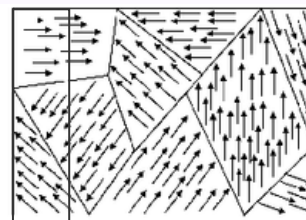
$$\vec{m} = \sum \vec{m}_{atomiques} \text{ (qui sont tous parallèles)}$$



→ Le clou

C'est un corps ferromagnétique qui peut s'aimanter.

$$\text{Le moment magnétique macroscopique: } \vec{m} = \sum \vec{m}_{atomiques} = \vec{0}$$



Si l'aimant s'approche du clou, il « excite » le clou:

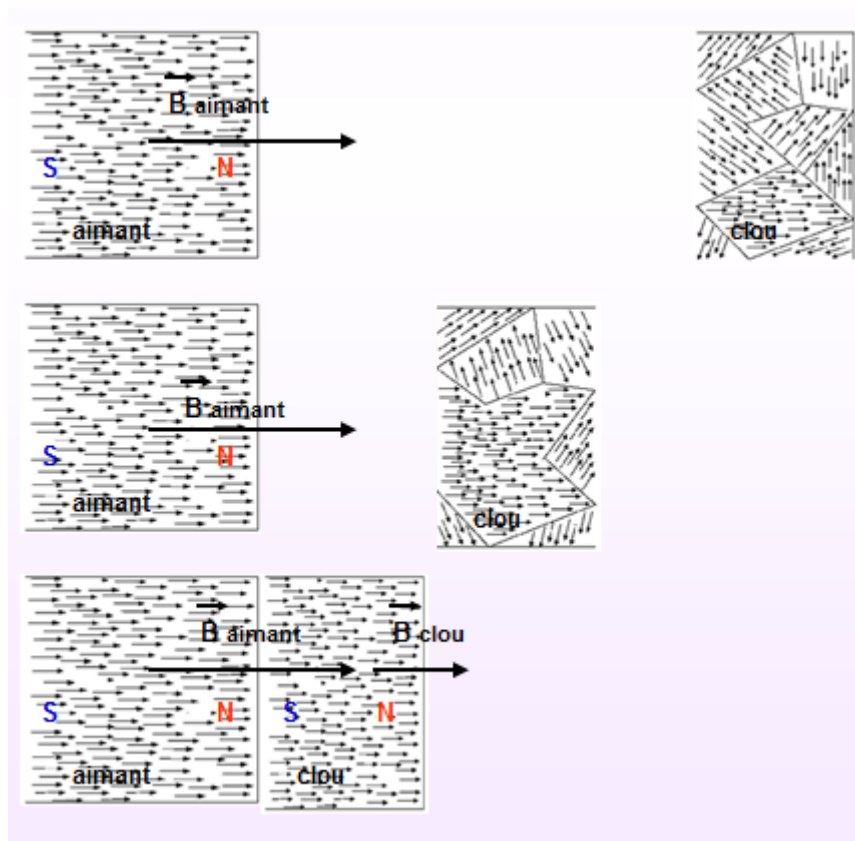
Le champ magnétique produit par l'aimant devient une excitation magnétique.

Les moments magnétiques des atomes du clou s'ordonnent

parallèlement à l'excitation magnétique. Le clou s'aimante, il produit alors lui aussi son propre champ magnétique.

Des pôles nord et sud sont apparus sur le clou, il y a attraction.

Au final, le champ magnétique créé par l'ensemble est la somme vectorielle des deux champs.



IV.5. Ordres de grandeur

Au niveau atomique ou nucléaire, les moments magnétiques sont quantifiés par :

- le magnéton de Bohr $m_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ A.m}^2$ correspondant au moment magnétique de l'électron,
- le magnéton de nucléaire $m_{BN} = 5.05 \cdot 10^{-24} \text{ A.m}^2$ correspondant au moment magnétique du proton.

Le moment magnétique d'un aimant dépend de sa taille. L'ordre de grandeur magnétique d'un aimant usuel est d'environ 10 A.m^2 , le moment magnétique de la Terre vaut $7.9 \cdot 10^{22} \text{ A.m}^2$

<u>I. Le champ magnétique</u>	<u>1</u>
<u>I.1. Présentation</u>	<u>1</u>
<u>I.2. Sources de champ magnétique</u>	<u>1</u>
I.2.1. Action d'un aimant sur une charge	1
I.2.2. Action d'un courant sur un aimant	1
I.2.3. Action d'un aimant sur un courant ou d'un courant sur un autre courant.....	2
<u>I.3. Unités et ordres de grandeur</u>	<u>2</u>
<u>II. Champ scalaire et champ vectoriel</u>	<u>2</u>
<u>II.1. Définitions</u>	<u>2</u>
<u>II.2. Champ uniforme-Champ stationnaire</u>	<u>3</u>
<u>II.3. Lignes de champ</u>	<u>3</u>
<u>III. Quelques cartes de champ magnétique</u>	<u>4</u>
<u>III.1. Topologie du champ magnétique</u>	<u>4</u>
<u>III.2. Champ créé par un aimant droit</u>	<u>5</u>
<u>III.3. Champ créé par une spire circulaire</u>	<u>5</u>
<u>III.4. Champ créé par une bobine longue</u>	<u>6</u>
<u>IV. Le moment magnétique</u>	<u>7</u>
<u>IV.1. Vecteur surface</u>	<u>7</u>
<u>IV.2. Le moment magnétique</u>	<u>7</u>
<u>IV.3. Les lignes de champ d'un moment magnétique</u>	<u>8</u>
<u>IV.4. La matière et le magnétisme</u>	<u>8</u>
<u>IV.5. Ordres de grandeur</u>	<u>9</u>

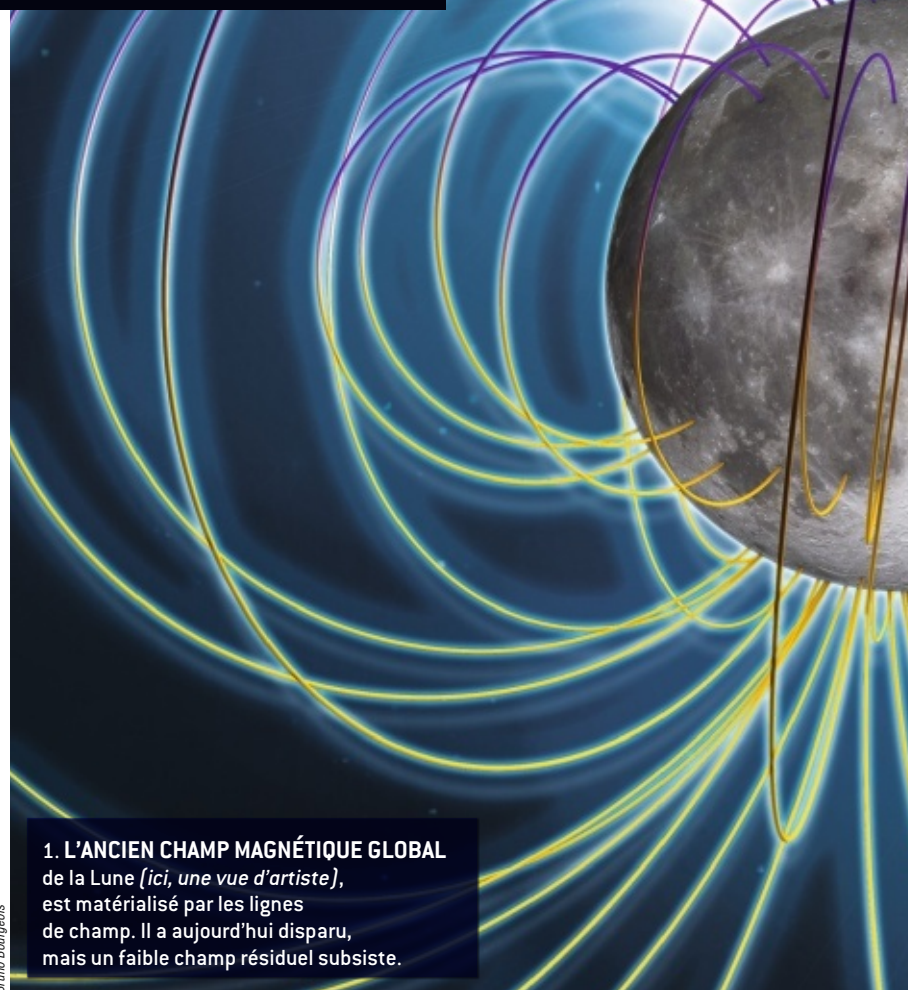
Le magnétisme de la Lune

D. Cébron, M. Le Bars et M. Wieczorek

Les échantillons de roches lunaires rapportés par les missions *Apollo* indiquent que la Lune présentait, dans le passé, un champ magnétique global. Son origine semble très différente de celle du champ magnétique terrestre.

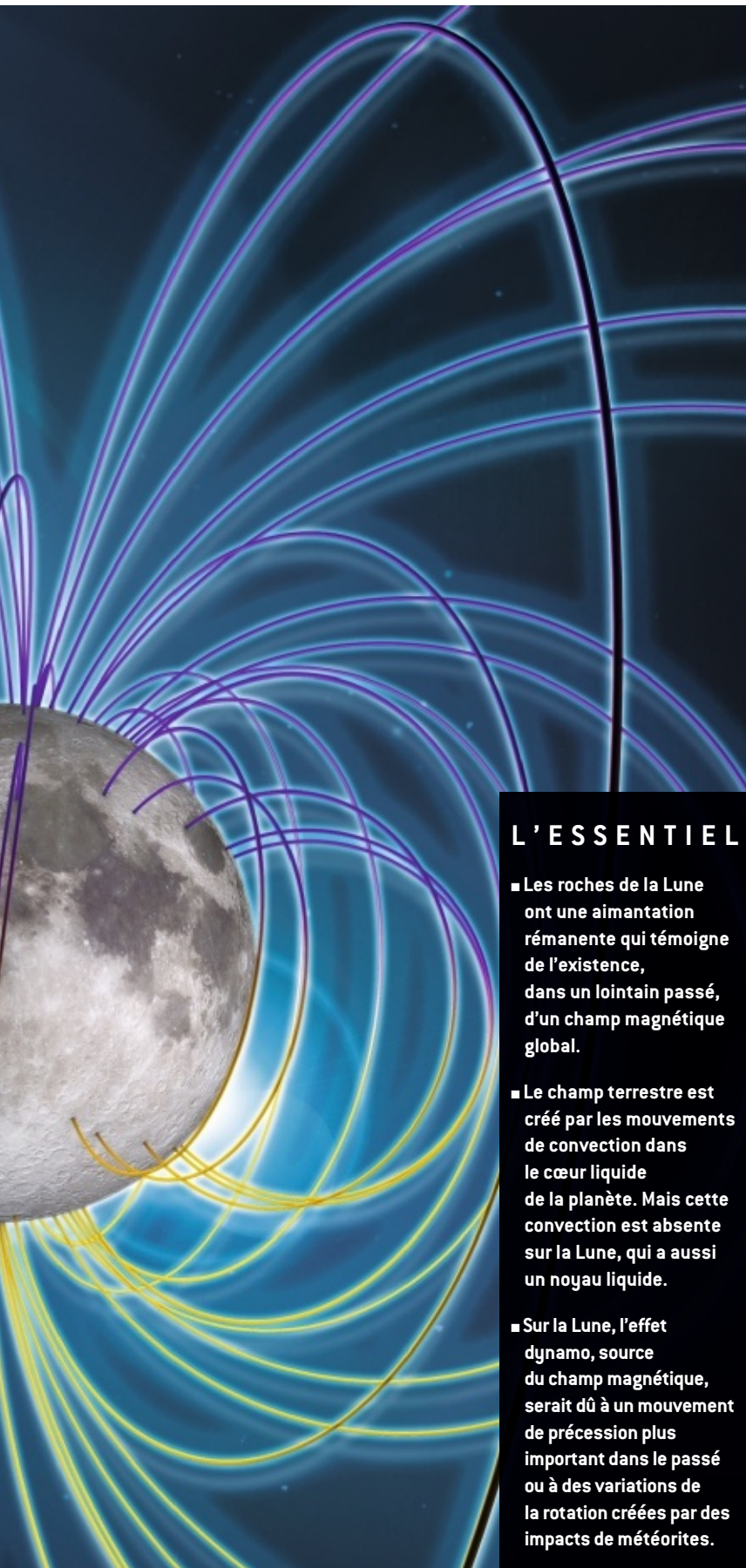
La Lune a-t-elle, comme la Terre, un champ magnétique global ? La réponse est non, ce qui s'accorde avec l'image que l'on a de notre satellite, celle d'un astre mort et froid. Mais plusieurs indices montrent qu'il n'en a pas toujours été ainsi. Dans un lointain passé, la Lune a été pourvue d'un champ magnétique. Comment était-il produit ? Et pourquoi a-t-il disparu ? Les mécanismes connus, tels les mouvements de convection qui agitent la partie liquide du noyau de notre planète, ne peuvent pas expliquer le champ magnétique lunaire. Aussi les scientifiques ont-ils proposé d'autres scénarios.

Le champ magnétique de la Terre nous protège du bombardement des particules chargées en provenance du Soleil et contribue à préserver l'atmosphère. La Terre n'est pas un cas unique ; de nombreuses planètes – Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune – présentent aussi un tel champ. D'autres astres, tels Mars ou la Lune, semblent avoir eu dans leur passé un champ magnétique global. Dans le cas de la Lune, les échantillons de roche rapportés lors des missions *Apollo* présentent des traces d'un champ magnétique datant de plusieurs milliards d'années.



1. L'ANCIEN CHAMP MAGNÉTIQUE GLOBAL de la Lune (*ici, une vue d'artiste*), est matérialisé par les lignes de champ. Il a aujourd'hui disparu, mais un faible champ résiduel subsiste.

Bruno Banaag



L'ESSENTIEL

- Les roches de la Lune ont une aimantation rémanente qui témoigne de l'existence, dans un lointain passé, d'un champ magnétique global.
- Le champ terrestre est créé par les mouvements de convection dans le cœur liquide de la planète. Mais cette convection est absente sur la Lune, qui a aussi un noyau liquide.
- Sur la Lune, l'effet dynamo, source du champ magnétique, serait dû à un mouvement de précession plus important dans le passé ou à des variations de la rotation créées par des impacts de météorites.

Une nouvelle analyse de ces échantillons par des techniques modernes, les missions spatiales récentes vers la Lune ainsi que des expériences de laboratoire et des simulations numériques en magnétohydrodynamique – l'étude des fluides conducteurs d'électricité –, permettent aujourd'hui de lever un coin du voile sur la question de l'origine du champ magnétique global de la Lune. Plusieurs scénarios expliquent comment un tel champ a pu être produit et décrivent l'origine de certaines anomalies observées dans la cartographie du champ résiduel.

Mesurer un champ magnétique

Pour mesurer le champ magnétique d'une planète, les astrophysiciens utilisent des magnétomètres embarqués sur des satellites, tel *Cersted* pour la Terre, ou sur des sondes d'exploration, par exemple *Lunar Prospector* pour la Lune, *Mars Global Surveyor* pour Mars ou encore *Galileo* pour Jupiter. Le champ magnétique d'une planète a deux origines possibles : dynamique, *via* des mouvements de fluides conducteurs dans l'une des couches internes de la planète (par exemple du fer liquide dans le noyau terrestre), ou statique, *via* une aimantation figée des roches de son enveloppe externe. Dans le second cas, il s'agit de la rémanence d'un champ magnétique dynamique qui a disparu au cours de l'évolution de la planète.

On distingue deux mécanismes responsables d'un champ magnétique dynamique. Le premier est lié à la présence proche d'un autre corps céleste qui crée un champ magnétique ambiant. Ce dernier est dévié par les mouvements du fluide interne de la planète, ce qui, par un phénomène d'induction, produit un champ planétaire propre. Le second mécanisme de formation d'un champ magnétique, spontané et autoentretenu, s'appuie sur la conversion de l'énergie cinétique des écoulements fluides en énergie magnétique ; on parle alors d'effet dynamo.

Dans les deux cas, l'intensité et la direction du champ créé présentent de fortes variations temporelles, reliées aux déplacements du fluide conducteur. Cependant, seul un mécanisme de type dynamo est capable d'expliquer un champ magnétique intense comme celui de la Terre. L'effet dynamo est un mécanisme complexe dont la compréhension agite la communauté scientifique depuis plus d'un siècle : l'une des questions fondamentales est d'identifier

ANALYSES PALÉOMAGNÉTIQUES DES ROCHES LUNAIRES

Les échantillons de roches anciennes présentant une aimantation rémanente permettent d'obtenir des informations sur le champ magnétique présent au moment de son enregistrement dans les minéraux de la roche. L'âge de la roche peut être déterminé par datation radiométrique, ou radiodation. Cette méthode de datation absolue exploite la variation régulière au cours du temps de la proportion de radio-isotopes des éléments (par exemple l'argon, l'uranium ou le thorium) que contiennent les minéraux d'une roche. Une fois l'âge déterminé, il s'agit de remonter au champ magnétique présent au moment de l'aimantation de la roche. Pour ce faire, l'aimantation rémanente est tout d'abord mesurée avec un magnétomètre de précision. On soumet en-

suite l'échantillon à une succession de désaimantations, par exemple par chauffage, et d'aimantations contrôlées sous champ constant afin de construire un abaque – une courbe de référence – de l'aimantation rémanente en fonction du champ magnétique externe imposé. Le report sur cet abaque de l'aimantation initiale fournit alors une mesure du champ magnétique passé.

Si le principe de la mesure est simple, sa mise en application soulève un grand nombre de difficultés. Il faut en particulier s'affranchir des aimantations parasites de l'environnement pour aboutir à une mesure précise et fiable. En outre, l'échantillon peut résulter d'une histoire géologique complexe ou avoir subi des aimantations successives, par choc ou par chauffage.



NASA/Johnson Space Center photograph S73-19456

Cet échantillon de roche lunaire a été rapporté par la mission *Apollo 17* en 1972. Il a été analysé entre autres par I. Garrick-Bethell et ses collègues en 2009. De façon surprenante, cet échantillon a révélé qu'un champ magnétique intense régnait sur la Lune il y a 4,2 milliards d'années.

■ LES AUTEURS

David CÉBRON est postdoctorant à l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse.

Michael LE BARS est chargé de recherche au CNRS à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre de Marseille.

Mark WIECZOREK est directeur de recherche au CNRS à l'Institut de physique du globe de Paris.

les mouvements fluides pouvant donner lieu à une dynamo, et le moteur de ces écoulements (voir l'encadré page 39).

Ainsi, sur Terre, le champ magnétique global est produit par la convection dite thermosolutale, liée à la fois au refroidissement de la Terre et à la solidification progressive de la partie interne du noyau, la « graine ». Ce champ est surtout dipolaire, avec des pôles magnétiques Nord et Sud reliés par des lignes de champ selon lesquelles s'alignent les boussoles, par exemple. Mais il présente aussi des fluctuations spatiales et temporelles : il peut parfois s'inverser, le pôle Nord magnétique devenant le pôle Sud, et inversement. La première preuve de l'origine convective de la dynamo terrestre et des renversements associés du champ magnétique a été apportée en 1995 par les simulations numériques des géophysiciens américains Gary Glatzmaier et Paul Roberts. Leur étude a ouvert la voie à de nombreux travaux et modèles de plus en plus élaborés, qui cherchent à reproduire les particularités du champ terrestre ou à expliquer, par un même mécanisme de dynamo convective, les champs magnétiques actuels de Mercure et de Ganymède (une lune de Jupiter), ou ceux de Mars et de la Lune, aujourd'hui disparus.

L'une des particularités de ce mécanisme est le renversement du champ magnétique. Certains minéraux ferromagnétiques, présents au sein des roches terrestres, mettent en évidence ce phénomène. Ces matériaux s'aimantent dans le sens du champ magnétique ambiant et conservent cette aimanta-

tion même après la disparition du champ extérieur. On parle d'aimantation rémanente. Ces aimants permanents peuvent acquérir leur aimantation de différentes façons : sur Terre, la plus commune est l'aimantation thermorémanente, acquise lors du refroidissement après un chauffage intense. Une partie du champ magnétique ambiant est enregistrée dans la roche lorsque la température de celle-ci redescend au-dessous d'un certain seuil, la température de Curie.

La roche : témoin d'un champ magnétique

Ce phénomène est à l'origine de l'aimantation des roches volcaniques sur les flancs des volcans ou au niveau des dorsales océaniques. D'ailleurs, en 1963, Lawrence Morley, Frederick Vine et Drummond Matthews ont utilisé l'alternance d'orientation du champ rémanent des roches du plancher océanique atlantique – associé au renversement des pôles – et leur symétrie par rapport à l'axe de la dorsale pour prouver le phénomène d'expansion océanique, un élément clef dans le modèle de la tectonique des plaques.

L'aimantation rémanente est aussi utile en archéologie. Les matériaux ferromagnétiques contenus dans les argiles travaillées au feu (céramiques, fours, etc.) enregistrent l'orientation du champ magnétique lors de leur dernier chauffage. En mesurant ce champ rémanent, on parvient alors à dater ces vestiges.

À l'échelle d'une planète, les roches réparties à sa surface et présentant une

aimantation rémanente produisent un champ magnétique de faible intensité, avec d'importantes fluctuations locales en amplitude et en direction, mais constant dans le temps. C'est ce type de champ magnétique que l'on observe sur la Lune aujourd'hui.

Cartographie du champ rémanent lunaire

Les données obtenues lors des survols de la Lune par les missions spatiales telles que la sonde américaine LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*), lancée en 2009, indiquent que le champ magnétique actuel à la surface de la Lune est figé et de faible intensité – il est environ 5000 fois inférieur au champ magnétique à la surface de la Terre. Il provient donc de l'aimantation rémanente des roches de la croûte (*voir la figure 2*).

Un champ magnétique rémanent est le vestige d'un champ magnétique global aujourd'hui disparu. Pour que ce champ global ait aimanté la roche lunaire, celle-ci a dû atteindre des températures élevées. Par quel phénomène ?

L'échauffement ayant conduit à l'aimantation mesurée est attribué aux impacts météoritiques : lors de la chute d'une météorite, la zone d'impact subit une élévation intense de température, avant de se refroidir lentement. Au début, l'agitation thermique empêche la roche de développer une aiman-

BIBLIOGRAPHIE

R. C. Weber *et al.*, **Seismic detection of the lunar core**, *Science*, vol. 331, pp. 309-312, 2011.

C. A. Dwyer *et al.*, **A long-lived lunar dynamo driven by continuous mechanical stirring**, *Nature*, vol. 479, pp. 212-214, 2011.

M. Le Bars *et al.*, **An impact-driven dynamo for the early Moon**, *Nature*, vol. 479, pp. 215-218, 2011.

I. Garrick-Bethell *et al.*, **Early lunar magnetism**, *Science*, vol. 323, pp. 356-359, 2009.

L. L. Hood et N. A. Artemieva, **Antipodal effects of lunar basin-forming impacts : initial 3D simulations and comparisons with observations**, *Icarus*, vol. 193, pp. 485-502, 2008.

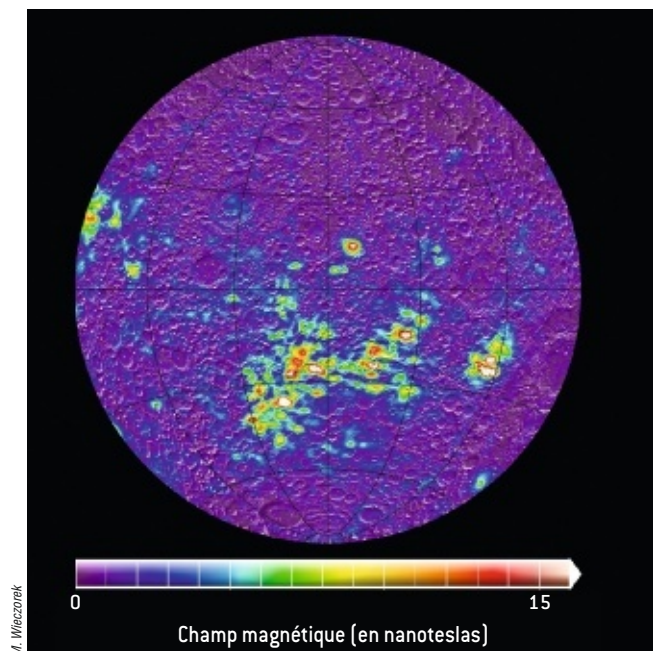
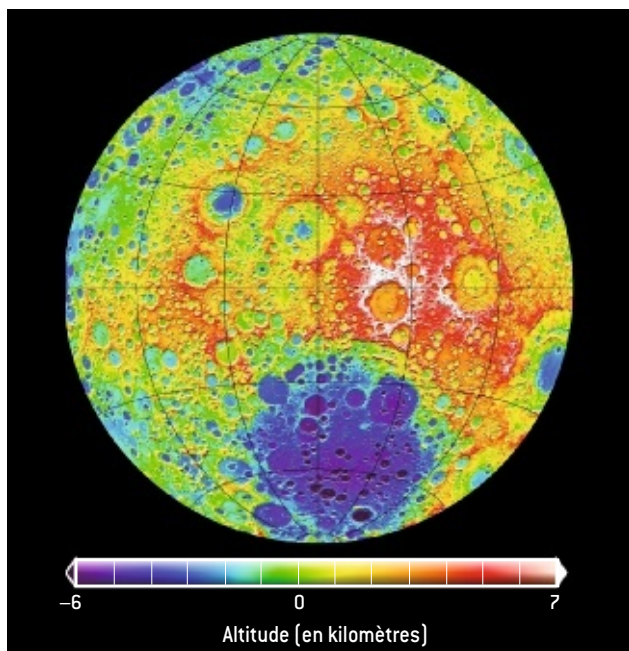
A. Tilgner, **Precession driven dynamos**, *Physics of Fluids*, vol. 17, 034104, 2005.

G. Glatzmaier et Peter Olson, **La géodynamo : une histoire turbulente**, *Pour la Science*, n° 331, mai 2005.

tation stable. Mais après une durée qui peut atteindre une centaine de milliers d'années, selon la puissance de l'impact météoritique et la profondeur considérée, la température des roches repasse au-dessous de la température de Curie : l'agitation thermique devient assez faible pour que l'aimantation se fige et s'aligne sur le champ magnétique externe (*voir la figure 3*). Le champ rémanent actuel résulte de la superposition de l'ensemble des aimantations enregistrées dans la croûte au fil des multiples impacts qui ont ponctué l'histoire de la Lune : il varie beaucoup sur de petites échelles de distance, et il n'existe aujourd'hui pas de champ global. Le magnétisme rémanent de la croûte ne permettrait donc pas à un astronaute de s'orienter avec une boussole !

Les cartes du champ magnétique de la Lune mettent aussi en évidence des régions où le champ rémanent est plus intense, surtout au sein de six grands cratères d'impact ainsi qu'aux antipodes de quatre grands bassins d'impact. L'existence de ces anomalies du champ rémanent peut aussi être expliquée à partir de collisions avec des météorites (*voir l'encadré page 38*).

Les mesures effectuées depuis l'espace fournissent une information instantanée sur l'état actuel du magnétisme rémanent, mais elles ne donnent aucune information sur l'origine du champ magnétique global : provenait-il de la Lune elle-même ? De la



2. CARTES DU RELIEF ET DU CHAMP MAGNÉTIQUE de la face cachée de la Lune. Ce côté est plus exposé aux bombardements de météorites, qui ont formé de nombreux cratères (*à gauche*). Le champ

magnétique rémanent (*à droite*) est faible sur l'ensemble de la surface, à l'exception de certaines anomalies qui correspondent à des cratères ou aux antipodes d'un impact de météorite.

Les anomalies du champ rémanent

Grâce au bombardement massif par des météorites, les roches ont enregistré le champ magnétique global de la Lune (voir la figure 3 ci-dessous). Les impacts météoritiques permettraient aussi d'expliquer certaines des anomalies magnétiques observées sur la carte du champ rémanent lunaire actuel (voir la figure 2). Plusieurs zones, situées aux antipodes de certains grands cratères, présentent un champ d'intensité plus élevé.

Les simulations numériques réalisées en 2008 par Lon Hood (Université de l'Arizona) et Natalia Artemieva (Université de Tucson, États-Unis, et Institut de dynamique de la géosphère de

l'Académie des sciences à Moscou) montrent qu'à la suite d'un impact important, un immense nuage de plasma se forme. Les particules de matière éjectée acquièrent une charge électrique et leur mouvement crée des courants électriques transitoires ainsi que des champs magnétiques au sein du nuage. Ce dernier, très bon conducteur, est aussi sensible au champ magnétique déjà existant (par exemple celui du vent solaire) ; il l'amplifie soit en concentrant ce champ dans l'onde de choc à la frontière du nuage, soit par confinement entre le nuage et le manteau supérieur lunaire faiblement conducteur.

Quand le nuage arrive aux antipodes – en environ une heure –, le champ magnétique peut être amplifié d'un facteur allant jusqu'à 100. En retombant, les débris de roche présents dans le nuage constituent autant de chocs possibles, qui font fondre le sol, lequel enregistre le champ magnétique intense sur une zone réduite.

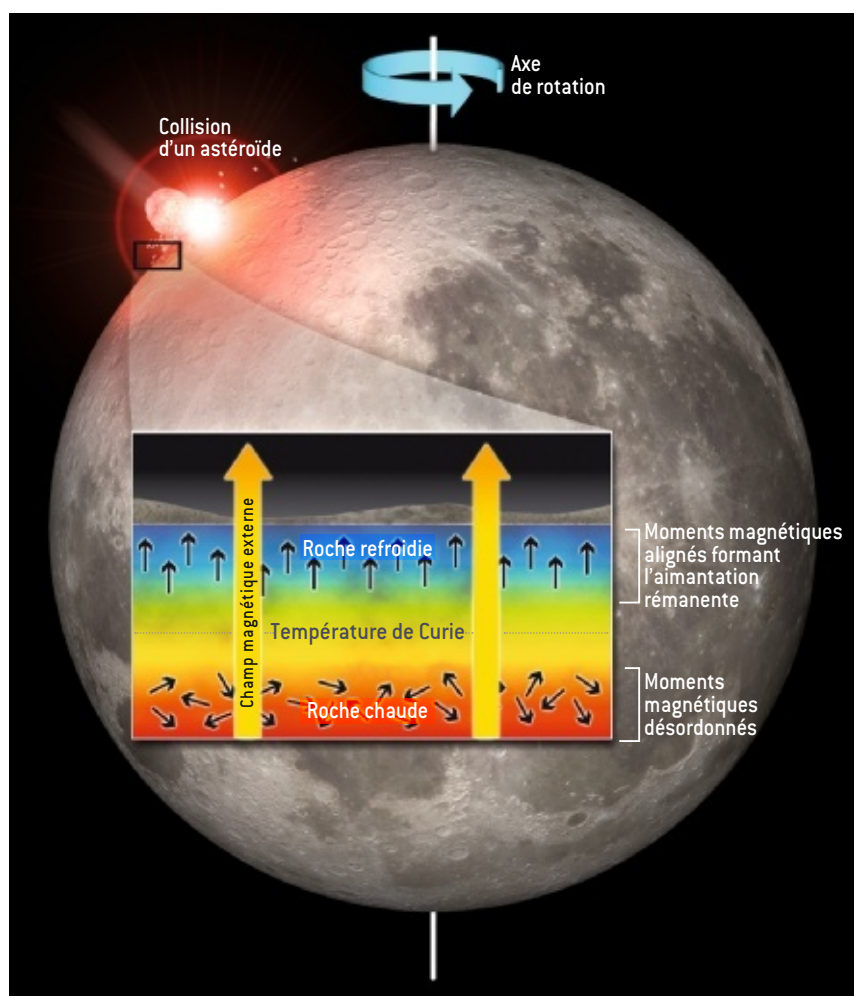
Ce mécanisme explique une partie des anomalies magnétiques observées, mais il n'explique pas l'intégralité de l'aimantation rémanente des roches lunaires. L'existence d'un mécanisme de dynamo interne à la Lune semble indispensable.

Terre ? Était-il lié à un mécanisme d'induction ou de dynamo ? Les échantillons de roches rapportés lors des missions *Apollo* complètent les mesures spatiales et aident à répondre à ces questions. Leur analyse permet de déterminer, par radiodation, le temps écoulé depuis que la roche s'est solidifiée et d'estimer, par une série de désaimantations et d'aimantations contrôlées, l'amplitude du champ ambiant à l'époque (voir l'encadré page 36). Ces mesures, en particulier celles réalisées en 2009 par Ian Garrick-Bethell, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collègues indiquent que les roches les plus aimantées se sont formées dans un intervalle de quelques millions d'années, il y a environ quatre milliards d'années, en présence d'un champ magnétique intense, compris entre 1 et 100 microteslas (celui de la surface de la Terre est de l'ordre de 50 microteslas). Cette période correspondrait, selon certains scénarios, à une époque où la surface de la Lune était intensément bombardée par des météorites qui ont permis, en faisant fondre les roches, d'y enregistrer le champ magnétique ambiant.

Un tel champ magnétique, du même ordre de grandeur que celui à la surface de la Terre aujourd'hui, était trop important pour être dû à un phénomène d'induction. Ainsi, la Lune était dotée de son propre champ magnétique, produit par un mécanisme de dynamo, dont il reste à expliquer l'origine.

Le mystère de la dynamo lunaire enfin résolu ?

Un premier élément de réponse a été apporté par Renee Weber, du Centre de vol spatial Marshall de la NASA, à Huntsville aux États-Unis, et ses collègues. Ces chercheurs ont repris en 2011 les données sismiques recueillies par les quatre sismomètres déployés sur la Lune lors des missions *Apollo*. Ces mesures avaient déjà permis, dans les années 1970, d'évaluer l'épaisseur de la croûte lunaire à environ 50 kilomètres et de prévoir l'existence d'une couche riche en métaux à la base du manteau lunaire. En appliquant des méthodes modernes d'analyse, l'équipe de R. Weber a fourni la première preuve de la présence d'un noyau liquide sous la surface lunaire, à 1 400 kilomètres de profondeur. La Lune actuelle, que l'on pouvait croire entièrement solide, possède aujourd'hui encore un cœur



3. L'AIMANTATION RÉMANENTE APPARAÎT SUITE À UNE COLLISION D'UN ASTÉROÏDE, qui fait fondre la roche en profondeur. Lorsque la température est élevée, le moment magnétique des atomes n'a pas de direction privilégiée. L'agitation thermique empêche les moments de s'aligner sur le champ magnétique global. Après le choc, la température de la roche diminue et passe sous la température de Curie : les moments s'alignent alors tous sur le champ externe.

liquide de métal conducteur. La température élevée dans le cœur viendrait de la présence d'éléments radioactifs – comme c'est le cas d'une partie de l'énergie entretenant le cœur liquide terrestre. Le liquide conducteur est l'ingrédient principal pour obtenir un effet dynamo. Il faut cependant que le liquide soit parcouru de mouvements turbulents pour créer un champ magnétique.

Par analogie avec la Terre, Dave Stegman, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont proposé en 2003 que la dynamo de la Lune résultait d'un mécanisme de convection. Cependant, du fait de sa petite taille, la Lune s'est refroidie en quelques centaines de millions d'années

après sa formation, ce qui a arrêté tout phénomène convectif : dans ces conditions, le scénario d'une dynamo par convection est peu réaliste. Pour expliquer une éventuelle dynamo lunaire, il faut trouver une autre source de mouvements dans son noyau.

En 2011, notre équipe européenne et une équipe américaine ont proposé simultanément, mais de façon indépendante, que l'énergie nécessaire à ces mouvements pouvait être apportée par la rotation de la Lune, suivant une idée proposée dès 1968 par Willem Malkus, de l'Université de Californie à Los Angeles. Cependant, il est possible de prouver qu'un mouvement de rotation en bloc d'un noyau liquide, qui suit la rotation

du manteau, est trop simple pour amorcer un effet dynamo. Comment obtenir des écoulements intenses et turbulents ?

Une première possibilité provient du mouvement de précession de l'axe de rotation de la Lune. Au fil du temps, l'axe de rotation d'une planète ou d'un satellite change lentement de direction, et décrit un cône autour de la perpendiculaire au plan de son orbite. Par exemple, l'axe de rotation de la Terre, incliné d'environ 23 degrés, décrit un tel cône en environ 26 500 ans, ce qui est à comparer aux cinq degrés d'obliquité de la Lune et à sa période de précession de 18,6 ans. La précession d'une planète peut exciter des instabilités hydrodynamiques à

L'EFFET DYNAMO : UN DÉFI THÉORIQUE, EXPÉRIMENTAL ET NUMÉRIQUE

Un champ magnétique planétaire de grande échelle est créé grâce aux écoulements des fluides conducteurs d'électricité, tels ceux du noyau liquide terrestre. Ce mécanisme est nommé effet dynamo, car, comme pour la dynamo d'un vélo, un champ magnétique et un courant électrique naissent d'un mouvement. Le mécanisme de dynamo fluide, proposé par le physicien irlandais Joseph Larmor dès 1919, nécessite des écoulements particuliers et suffisamment vigoureux pour compenser son amortissement par effet Joule – dissipation de l'énergie en chaleur.

Malgré de nombreux travaux, ce problème magnétohydrodynamique reste assez mal compris et son étude demeure un défi, que ce soit pour l'approche théorique, expérimentale ou numérique. En fait, les travaux théoriques n'ont pas permis d'obtenir de conditions générales d'existence de l'effet dynamo. Au contraire, des théorèmes dits antidynamo stipulent que des écoulements trop simples ne produisent pas de champ magnétique. Les écoulements doivent être complexes, et très peu de modèles théoriques ont pu être développés à ce jour.

À ces difficultés s'ajoute celle de reproduire l'effet dynamo dans une expérience contrôlée. En effet, les fluides très conducteurs utilisables à l'échelle du laboratoire, tels que le mercure ou le sodium, sont dangereux et donc difficiles à manipu-

ler : le mercure est neurotoxique et le sodium réagit de façon explosive en présence d'eau. Cela impose des mesures de précaution drastiques. Par ailleurs, la force et la complexité des écoulements nécessaires imposent de construire des expériences

semaines d'intervalle, un effet dynamo a été obtenu dans un écoulement contraint pendant quelques dizaines de secondes à Riga, juste avant qu'une fuite de sodium liquide ne mette fin à l'expérience. Un autre effet dynamo a été obtenu



L'expérience de l'Université du Maryland est constituée de deux sphères imbriquées – la plus grande ayant un diamètre de trois mètres. La géométrie s'approche des conditions régnant au sein d'une planète. Elle devrait permettre de reproduire un champ magnétique du type de celui de la Terre à partir de l'effet dynamo.

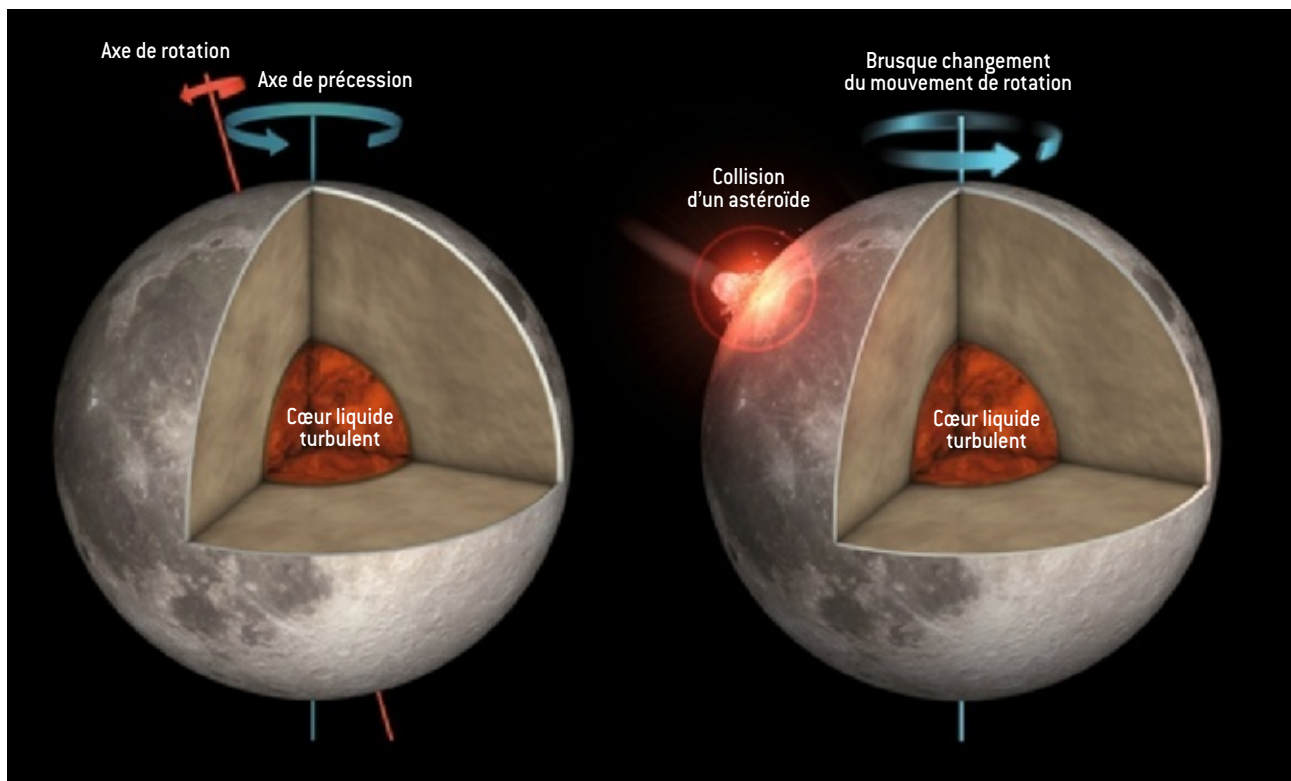
de grande dimension, mues par de puissants moteurs capables de produire des vitesses d'écoulement importantes.

À ce jour, la reproduction de l'effet dynamo fluide n'a été réussie que par trois expériences différentes. Tout d'abord, en 1999, à quelques

semaines d'intervalle, un effet dynamo a été obtenu dans un écoulement contraint pendant quelques dizaines de secondes à Riga, juste avant qu'une fuite de sodium liquide ne mette fin à l'expérience. Un autre effet dynamo a été obtenu

Enfin, l'expérience VKS (pour *Von Karman Sodium*), développée par l'École normale supérieure de Paris et celle de Lyon et par le CEA à Saclay, a produit en septembre 2006 la première dynamo fondée sur un écoulement libre et turbulent, produit par des disques tournants. Ce dispositif a mis en évidence des renversements du champ magnétique. D'autres projets sont en cours : dans le Maryland et à Madison, aux États-Unis, et à Dresde, en Allemagne.

Enfin, l'étude de l'effet dynamo par le biais de simulations numériques est tout aussi complexe. Elle nécessite la résolution simultanée du système d'équations non linéaires couplées de la magnétohydrodynamique pour des écoulements complexes et rapides. Malgré l'utilisation des méthodes numériques les plus performantes et des supercalculateurs les plus puissants, les régimes de paramètres des planètes et des étoiles restent inaccessibles aux simulations. Ces études ont néanmoins remporté quelques succès tels que la reproduction numérique d'un effet dynamo produit par des écoulements convectifs, de son caractère dipolaire et de ses inversions, comme c'est le cas au sein du noyau terrestre actuel. Plus récemment, en 2005, la simulation d'Andreas Tilgner, de l'Université de Göttingen, en Allemagne, a montré qu'il est possible de créer un effet dynamo à partir de la précession d'une cavité fluide en rotation.



Bruno Bourgeois

4. LES MODÈLES DE DYNAMO LUNAIRE nécessitent la production de turbulences dans le cœur liquide du satellite. Une possibilité est que, peu après la formation de la Lune, le mouvement de précession – de l'axe de rotation de la Lune, qui décrit un cône – aurait pu être assez intense, avec une forte inclinaison et une vitesse de rotation élevée, pour créer des turbulences (à gauche). L'équipe des auteurs a mis en évidence une autre

possibilité, fondée sur l'instabilité elliptique. La Lune a une forme légèrement elliptique du fait de l'attraction terrestre. Une variation dans la vitesse de rotation, due à la collision avec une météorite, peut créer des mouvements turbulents dans le cœur de la Lune (à droite). Les données actuelles ne permettent pas de préciser les rôles respectifs de ces mécanismes, qui pourraient d'ailleurs être complémentaires.

l'origine d'écoulements turbulents dans le noyau liquide tout entier, selon l'influence de trois paramètres essentiels : une vitesse de précession élevée, un angle de précession important ou un fort aplatissement aux pôles (comme pour la Terre, la rotation d'une planète sur elle-même déforme la sphère, qui s'aplatit aux pôles et forme un renflement à l'équateur). L'effet dynamo de ce type d'écoulement a été prouvé en 2005 par les simulations numériques de Andreas Tilgner, à l'Université de Göttingen, en Allemagne.

En 2011, Christina Dwyer, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collègues ont étudié un tel scénario de dynamo par précession dans le cas de la Lune. Leurs résultats montrent que la précession actuelle ne peut alimenter une dynamo lunaire. Mais les conditions de rotation ont pu être différentes par le passé. En effet, la Lune est issue d'une collision gigantesque entre la Terre primitive et un planétoïde de la taille de Mars, survenue 42 millions d'années à peine après la naissance du Système solaire. La Lune s'est ensuite formée par accrétion d'une partie des débris de

la collision, éjectés dans l'espace sur une orbite très proche de la Terre.

Soumise à des rotations propre et orbitale très rapides ainsi qu'à des forces gravitationnelles intenses exercées par la Terre, la Lune était alors sujette à des mouvements de précession plus marqués autour d'un angle d'inclinaison plus grand, voire à des basculements de son axe de rotation.

La dynamo lunaire activée par la précession

Il y a environ quatre milliards d'années, un effet dynamo aurait ainsi persisté pendant quelques centaines de millions d'années, jusqu'à ce que la Lune s'éloigne assez de la Terre et voie ses mouvements de rotation et de précession s'atténuer progressivement, pour finalement atteindre le calme relatif de sa situation actuelle.

Les impacts météoritiques pourraient aussi être un vecteur de conversion de l'énergie de rotation de la Lune en déplacements fluides dans son noyau. La Lune a subi de nombreux impacts au cours

de son histoire, en particulier durant la période du « grand bombardement tardif », entre 4,1 et 3,9 milliards d'années. À cette époque, la Lune était déjà, comme aujourd'hui, en rotation synchrone : elle tourne sur elle-même dans le même temps qu'elle accomplit une révolution autour de la Terre, lui présentant ainsi toujours la même face. Certains cratères lunaires atteignant 700 kilomètres de diamètre ont été produits par des météorites de quelques dizaines de kilomètres de rayon voyageant à plusieurs kilomètres par seconde. Ils témoignent de collisions assez puissantes pour avoir désynchronisé pendant un certain temps la rotation de la Lune autour de la Terre. Par ailleurs, en raison des forces gravitationnelles intenses exercées par la Terre, la Lune a une forme elliptique un peu allongée dans la direction de la Terre. Pour étudier ces phénomènes, notre équipe (Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre à Marseille, Institut de physique du globe de Paris et l'Observatoire royal de Belgique), a utilisé des expériences de laboratoire, des simulations numériques et

des modèles théoriques. En 2011, nous avons montré que dans cette configuration, une désynchronisation sous l'effet d'un impact crée des mouvements fluides qui pourraient avoir excité une instabilité hydrodynamique dite elliptique, rendant l'écoulement turbulent et donc favorable à l'effet dynamo. Le champ magnétique présent sur la Lune il y a quatre milliards d'années aurait ainsi pu résulter d'une succession d'épisodes de dynamo associés aux turbulences dues aux impacts. Le champ magnétique lié à chaque impact aurait alors eu une durée de vie d'une dizaine de milliers d'années, échelle de temps nécessaire à la Lune pour se synchroniser de nouveau.

Des scénarios complémentaires

Ainsi, le champ magnétique lunaire résulte sans doute de mécanismes qui puisent leur énergie dans la rotation de la Lune ou dans les impacts météoritiques. Ces deux modèles de dynamo lunaire sont assez séduisants, car ils expliquent pourquoi

le champ magnétique a pu exister dans le passé et avoir aujourd'hui disparu.

Loin de s'exclure mutuellement, ces mécanismes sont d'ailleurs compatibles, voire complémentaires. Ainsi, un champ magnétique continu pourrait avoir été engendré par une dynamo de précession, à laquelle se seraient superposées des périodes transitoires où le champ magnétique était plus intense en raison de l'impact d'une météorite. Pour distinguer ces différents mécanismes ou établir leur chronologie, il faudrait disposer d'un jeu de données paléomagnétiques précis et complet, échantillonné sur toute la surface et sur toute l'histoire de la Lune. Ce qui serait difficilement réalisable.

Les différents modèles proposés soulèvent de nouvelles questions. Par exemple, l'origine de l'instabilité hydrodynamique de précession reste mal connue, et la production d'un champ magnétique par ce biais n'a été caractérisée que dans des configurations limitées et peu turbulentes, accessibles aux simulations numériques. Une expérience magnétohydrodynamique visant à compléter ces résultats est actuelle-

ment en cours de développement à Dresde, en Allemagne. De même, le modèle de dynamo produit par l'instabilité elliptique est sans doute correct, mais il reste à le prouver, par exemple par des simulations numériques. L'absence de symétrie de révolution, hypothèse souvent exploitée pour mener à bien les simulations, impose de développer de nouvelles approches pour aborder la magnétohydrodynamique dans une géométrie ellipsoïdale.

Ces différents scénarios, développés pour expliquer le magnétisme lunaire, ont en outre une portée plus générale. Ils montrent que les modèles développés pour comprendre la Terre ne sont pas transposables. Contrairement à ce qui a longtemps été admis, la présence d'un champ magnétique planétaire n'implique pas toujours des mouvements de convection au sein d'une couche fluide interne. Comme pour la Lune, d'autres mécanismes seront sans doute nécessaires pour comprendre les champs magnétiques de Mercure, de Ganymède ou des planètes extrasolaires, voire de certains gros astéroïdes. ■



france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélié Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

en partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

© 2013 France Culture. Tous droits réservés. Photo: M. D. / Getty Images. 2013

Quand la limaille fait des ronds

Soumise au champ d'un aimant, la limaille de fer déposée à la surface de l'eau dessine des formes inattendues.

En 1991, un inconnu, Hristo Dichev, publiait un résultat contredisant près de deux siècles d'observation. En faisant agir un aimant sur de la limaille de fer flottant à la surface de l'eau, cet ingénieur bulgare a obtenu des anneaux concentriques. Or tous les physiciens s'attendraient à voir se former des lignes concourantes. Une nouvelle propriété du champ magnétique était-elle passée inaperçue à des générations de scientifiques ? Comme on l'enseigne aux lycéens, les particules de limaille se regroupent selon des lignes de champ magnétique de l'aimant – des courbes où, en chaque point, la tangente indique la direction du champ magnétique. Même cela mérite explication : pourquoi les lignes formées par la limaille sont bien séparées les unes des autres, alors que le champ magnétique emplit continuellement l'espace ? Qu'il doit être difficile d'enseigner la physique à des écoliers curieux !

L'expérience de la limaille de fer est classique (voir la figure 1). On place un aimant sous une feuille de papier ou

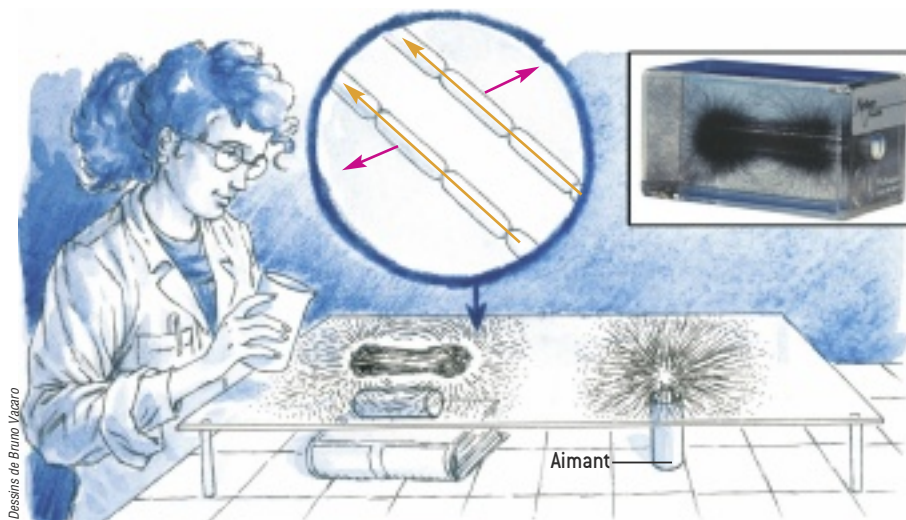
une plaque de verre, puis on saupoudre la surface plane avec de la limaille de fer assez fine. Enfin, on tapote légèrement la surface afin que la limaille se range progressivement le long de courbes allant d'un pôle à l'autre de l'aimant.

Attraction ou répulsion ?

En regardant de près, on constate que les particules, de forme allongée, sont alignées. Pourquoi ? Un grain de fer sphérique placé dans un champ magnétique acquiert une aimantation parallèle à la direction du champ auquel il est soumis. En revanche, les grains de limaille, sortes de petites aiguilles, acquièrent une aimantation dirigée selon leur axe, même quand elles sont placées de biais dans le champ magnétique. Chaque grain de limaille se comporte ainsi comme une petite boussole et, s'il est libre de pivoter, s'aligne dans la direction du champ magnétique. Et en s'attirant et se touchant, pôle Nord de l'un contre pôle Sud de l'autre, les grains constituent une ligne.

Ainsi, le long d'une même ligne de champ, la situation des grains est magnétiquement stable. En revanche, deux lignes de limaille voisines se repoussent, car leurs aimantations ont mêmes direction et sens (comme deux aimants disposés côte à côte). Cela empêche la limaille de s'agglomérer : un compromis s'établit entre la répulsion mutuelle des lignes et l'attraction des grains de limaille vers les zones où le champ magnétique est le plus intense.

Pourquoi tapote-t-on après avoir versé la limaille ? À cause des frottements solides avec la surface, les grains ne bougent que si les forces magnétiques excèdent un certain seuil. Initialement bloqués à l'endroit où ils sont tombés, les grains sont décoincés par le tapotement et se répartissent



Dessins de Bruno Vacaro

1. La limaille de fer saupoudrée sur une plaque de verre au-dessus d'un aimant s'arrange selon des lignes de champ magnétique. Les petites particules de fer, de forme allongée, s'aimantent selon leur axe et s'attirent mutuellement le long d'une même ligne. En revanche, deux lignes parallèles et voisines se repoussent (flèches rouges) car elles ont des aimantations (flèches orange) de mêmes direction et sens. C'est pourquoi les lignes de limaille sont séparées. Un tel motif peut être formé en trois dimensions en utilisant une suspension liquide de particules de fer (voir le cartouche).

dans la configuration la plus favorable énergétiquement : ils s'alignent en file indienne le long de lignes de champ, tandis que les lignes de limaille ainsi formées se repoussent et gardent leurs distances.

Le résultat peut être superbe. Mais il dépend en grande partie du coup de main de l'expérimentateur, qui doit taper ni trop ni trop peu. Afin d'obtenir à coup sûr un beau motif, les physiciens ont eu l'idée de remplacer le papier ou le verre par un liquide contenant de la limaille très fine en suspension. Pour éviter que les particules de fer ne sédimentent trop vite, on utilise de l'huile siliconée très visqueuse. On place alors au centre du récipient un barreau aimanté, et une belle structure en trois dimensions de lignes de champ apparaît progressivement.

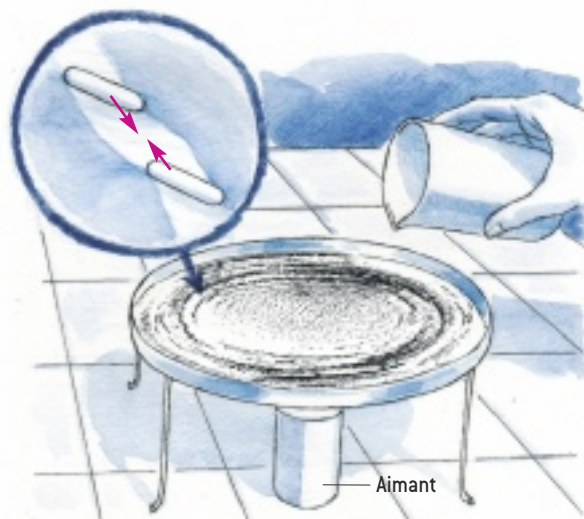
Cependant, les grains, mobiles, viennent peu à peu s'agglomérer aux pôles de l'aimant. Comment éviter cette migration ? Une solution est de confiner la suspension entre deux pellicules de mylar (un matériau fin, résistant et transparent). Le sandwich ainsi formé a alors l'apparence d'un film plastique épais. Le fluide est choisi avec une viscosité assez élevée pour que les aiguilles de fer aient du mal à se déplacer, mais demeurent libres de pivoter sur elles-mêmes, d'où l'alignement avec le champ magnétique. Le film apparaît translucide et clair lorsque le champ magnétique, et donc les aiguilles, sont alignés dans la direction d'observation, alors que le film est opaque et sombre quand les aiguilles sont perpendiculaires ; on a ainsi un moyen commode de visualiser la direction du champ.

Un match capillaro-magnétique

Pour éviter la coagulation tout en évitant les frottements visqueux, H. Ditchev eut l'idée de déposer délicatement la limaille sur de l'eau. Les grains de fer, bien que plus denses que l'eau, ne coulent pas – la surface de l'eau est analogue à une membrane élastique et peut supporter, grâce aux forces capillaires, de petits poids sans se « déchirer ». En plaçant sous le récipient d'eau un aimant vertical, c'est-à-dire un pôle en haut et l'autre en bas, H. Ditchev vit la limaille dessiner des cercles concentriques au lieu de s'aligner selon des lignes de champ – ici, des lignes droites qui partent toutes du pôle de l'aimant car celui-ci est vu de dessus (voir la figure 2).

Lorsqu'il soumit à la revue scientifique *European Journal of Physics* son résultat, le directeur de cette publication était si intrigué qu'il tenta de reproduire l'effet – sans y parvenir. H. Ditchev lui envoya alors sa poudre bulgare en expliquant en détail la procédure suivie. L'éditeur refit l'expérience, observa à sa grande surprise la formation des « anneaux de Ditchev » et consentit à publier l'article.

Le motif en anneaux est dû à la compétition entre les forces magnétiques et les forces de capillarité – une explication suggérée par l'éditeur et qui sera confirmée quelques



2. Si la limaille de fer est délicatement déposée à la surface de l'eau, elle dessine un motif comportant des anneaux concentriques au lieu d'un motif de lignes radiales. Ce phénomène s'explique par les forces de capillarité. Les particules de fer, qui tendent à s'orienter dans la direction du champ magnétique, déforment la surface de l'eau. La déformation globale s'atténue si les deux particules se trouvent côte à côte se rapprochent. Il en résulte une attraction, de nature capillaire, qui s'oppose à la répulsion magnétique entre les deux particules.

mois plus tard. Chaque grain déforme la surface de l'eau à cause de son poids et de l'orientation que lui impose le champ magnétique. Or la surface de l'eau tend à minimiser sa déformation, à l'instar d'un film élastique. Cette propriété est responsable d'une attraction ou d'une répulsion, selon les cas, entre grains. Elle ajoute des forces supplémentaires, de nature capillaire, aux effets magnétiques. Voyons comment.

Au-dessus du pôle de l'aimant, la limaille tend à s'orienter selon la verticale. Un grain élève donc la surface de l'eau à l'une de ses extrémités et l'abaisse à l'autre (voir la figure 2). Cette déformation de la surface du liquide est encore accentuée avec deux grains de même orientation et placés l'un juste derrière l'autre. La déformation sera atténuée si les deux grains s'éloignent : cela correspond donc à une répulsion entre grains de limaille d'une même ligne de champ. Attirés par le pôle de l'aimant, mais se repoussant l'un l'autre, ces grains restent isolés et se répartissent de façon régulière. Tel est le motif observé à la surface de l'eau au-dessus du pôle de l'aimant.

Plus loin du centre, le champ magnétique étant plus faible et plus horizontal, les grains déforment moins la surface. Des filaments de grains à la queue leu leu peuvent se former. Prenons deux filaments proches et parallèles : la déformation totale de la surface s'atténue si les filaments se rapprochent. Il s'ensuit une attraction, analogue à celle de deux billes voisines posées sur une membrane élastique tendue. Attraction dans ce cas, mais répulsion, comme on l'a vu avec deux grains, si les deux filaments se suivent sur une même ligne : les forces de capillarité entre filaments s'opposent à la force magnétique. Lorsque la capillarité devient dominante, les filaments parallèles s'agglomèrent tandis que les filaments d'une même ligne de champ se repoussent. Des anneaux denses et distincts apparaissent. Le mystère, lui, disparaît.

H. DITCHEV, *Apparent circulation of a steady magnetic field*, in *European Journal of Physics*, vol. 12, pp. 101-102, 1991.

R. K. W. HASSELWIMMER, *The formation of Ditchev rings*, in *European Journal of Physics*, vol. 13, pp. 145-151, 1992.

Blog des auteurs : <http://faustroll.free.fr/blog/>