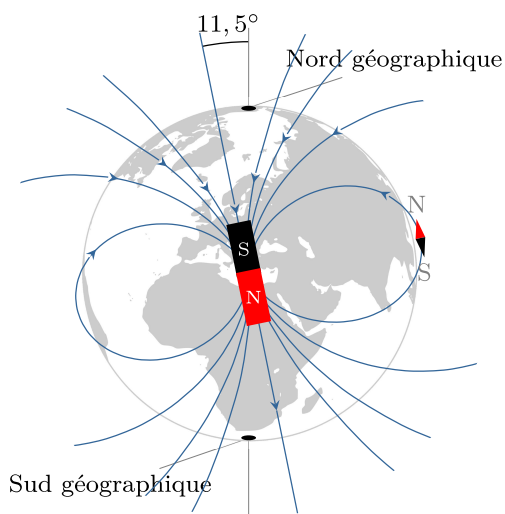




Thème I. Ondes et signaux (Induction)

Chapitre n°21 Champ magnétique



Au cours du moyen-âge, on a constaté qu'une aiguille aimantée susceptible de tourner librement sur un axe vertical prenait une direction privilégiée proche de celle d'un méridien appelée l'axe géomagnétique (incliné de $11,5^\circ$ par rapport à l'axe de rotation de la Terre). Cela a conduit à l'appellation « nord » et « sud » des extrémités d'un aimant.

Vidéo très intéressante : <https://youtu.be/FRteNtwuaWg> de 19 :50 à 37 :30.

Objectifs du chapitre

L'objectif de ce chapitre est d'introduire la notion de champ magnétique, et d'en décrire les propriétés.

En effet, tous les systèmes (moteurs, haut-parleur, plaques à induction, ...) décrits dans l'introduction que nous allons étudier dans les chapitres suivants mettent en jeu un phénomène d'induction qui se produit en présence de champs magnétiques.

Plan du cours

I Le champ magnétique 2

I.1	Notion de champ	2
I.2	Sources du champ magnétique	2
I.3	Cartes de champ magnétique	3

II Symétries et invariances des courants et conséquences 6

II.1	Symétries	6
II.2	Conséquences des symétries sur \vec{B}	7
II.3	Invariances	8
II.4	Forme générale de \vec{B}	8
III	Moment magnétique	9
III.1	Vecteur surface	9
III.2	Moment magnétique d'une boucle plane	10
III.3	Moment magnétique d'un aimant permanent	10

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Tracer l'allure des cartes de champ magnétique pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue.
- 2 – 😊 – 😞 – Comment peut-on réaliser un champ magnétique quasi-uniforme ?
- 3 – 😊 – 😞 – Donner les ordres de grandeur de champs magnétiques au voisinage d'un aimant usuel, dans un appareil à IRM et du champ magnétique terrestre.
- 4 – 😊 – 😞 – Donner les quatre phrases qui donnent les conséquences des symétries de la distribution de courant sur le champ magnétique. Associer ces phrases à des schémas illustratifs.
- 5 – 😊 – 😞 – Définir les invariances d'une distribution de courant, et en donner les conséquences sur le champ magnétique.
- 6 – 😊 – 😞 – Définir le vecteur surface associé à une boucle de courant plane.
- 7 – 😊 – 😞 – Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane.
- 8 – 😊 – 😞 – Donner l'ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.



FlashCards :

I Le champ magnétique

I.1 Notion de champ



Définition : Champ

- Un **champ** est associé à une propriété physique qui se manifeste en tout point de l'espace et à tout instant, qui est définie par une grandeur physique fonction de l'espace et du temps.
- On parle de **champ scalaire** lorsque la grandeur physique le représentant est une grandeur scalaire.
Ex : pression, température au sein d'un fluide, concentration volumique d'un constituant ...
On remarque sur ces exemples que les grandeurs correspondantes sont intensives.
- On parle de **champ vectoriel** lorsque la grandeur physique le représentant possède une valeur, une direction, un sens ; la grandeur est alors notée sous forme d'un vecteur.
Ex : champ de pesanteur, champ de vitesse d'un solide en rotation, champ gravitationnel, champ magnétique...
- Un champ est dit **permanent** ou **stationnaire** s'il ne dépend pas de t : la grandeur physique est identique à tout instant, en un point M donné.
- Un champ est dit **uniforme** s'il est indépendant de la position : la grandeur physique est identique en tout point, à t donné.

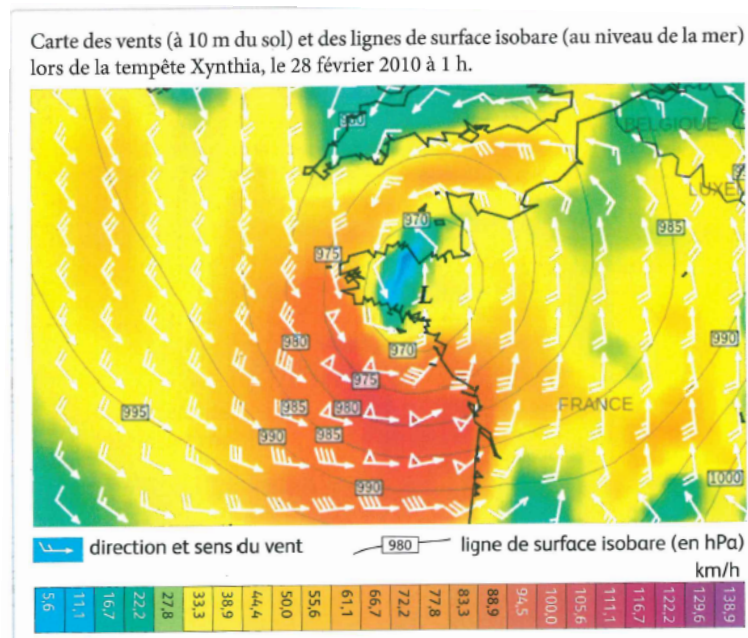


FIGURE 1 – Carte de champ en météo : vitesse du vent et pression

I.2 Sources du champ magnétique

Pour visualiser le champ magnétique créé par différents dispositifs (aimant et courants) :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Elec/Champs/topoB.php

I.2.a) La Terre

La Terre est la source d'un champ magnétique.

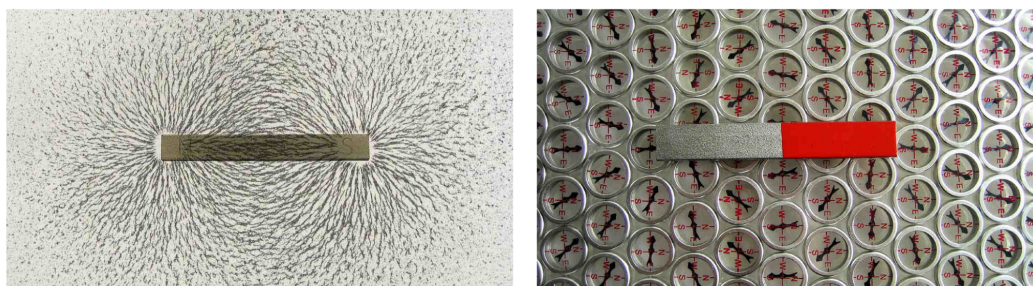
Vidéo très intéressante à ce sujet : https://youtu.be/TEp_9-ycjdI?si=xxLyY-mFVBhekEyc

1.2.b) Aimants

Dès l'antiquité, les hommes remarquent qu'un minéral naturel, appelé « magnétite » (essentiellement de l'oxyde de fer), a la propriété d'attirer de petits morceaux de fer. Cette interaction est appelée **magnétisme**, les solides capables d'attraction magnétique étant appelés **aimants**. On constate que les aimants, quelle que soit leur forme et leur taille, sont **polarisés** : ils possèdent un **pôle Nord** et un **pôle Sud**. Si un aimant est brisé, chacun des éclats aura à nouveau deux pôles. On observe que :

- le pôle Nord d'un aimant et le pôle Sud d'un autre aimant s'attirent ;
- les deux pôles de même polarité de deux aimants se repoussent

On peut visualiser le champ magnétique d'un aimant en disposant à sa proximité de la limaille de fer, c'est-à-dire de minuscules bouts de fil de fer. On constate que la limaille de fer se dispose selon une géométrie particulière : les copeaux de fer semblent former une ligne continue allant d'un pôle à un autre. Si on place un ensemble de boussoles (c'est-à-dire des petits aimants) au niveau de l'aimant, on remarque de plus que ceux-ci s'orientent dans la même direction le long d'une ligne.



1.2.c) Champs magnétiques créés par des courants

Capacité exigible : Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.

ØRSTED a constaté en 1820, qu'un circuit électrique parcouru par un courant électrique modifie également l'orientation de la limaille de fer et l'orientation d'une boussole. **Un courant électrique crée également un champ magnétique**. En 2^e année, vous apprendrez à établir l'expression des champs magnétiques créés par des courants avec le théorème d'Ampère.

♥ À retenir : Champ magnétique créé par un courant électrique

Un champ magnétique créé par un courant électrique est toujours proportionnel à l'intensité du courant électrique qui lui a donné naissance.

1.2.d) Ordres de grandeur

Capacité exigible : Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.

♥ À retenir : Sources et ordres de grandeur de champ magnétique

■ Le **champ magnétique**, noté \vec{B} est créé par des aimants, des conducteurs parcourus par des courants et la Terre.

Source du champ	Terre	Aimant usuel	Appareil IRM
Quelques ordres de grandeur :	$4,7 \cdot 10^{-5} \text{ T}$	0,1 T à 1 T	3 T

1.3 Cartes de champ magnétique

📖 Définition : Ligne et carte de champ

- Une **ligne de champ magnétique** est une courbe orientée tangente en tout point au champ magnétique.
- La visualisation globale du champ vectoriel, sur laquelle sont tracées plusieurs lignes de champ, est alors appelée **carte de champ**.

♥ **À retenir : Propriétés des lignes de champ magnétique**

- Les lignes de champ magnétique sont toujours fermées, elles font des boucles (sauf si elles partent à l'infini).
 - Si deux lignes de champ se coupent en un point, alors le champ est nul en ce point.
 - Dans une zone de champ magnétique uniforme, les lignes de champ magnétique sont parallèles entre elles.
 - Le champ magnétique augmente dans des zones où les lignes de champ se resserrent. Le champ magnétique diminue dans les zones où les lignes de champ s'éloignent.
- Cf 2^e année : c'est une conséquence du fait que \vec{B} est à flux conservatif.*

Capacité exigible : Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue.

♥ **À retenir : Cartes de champ magnétique**

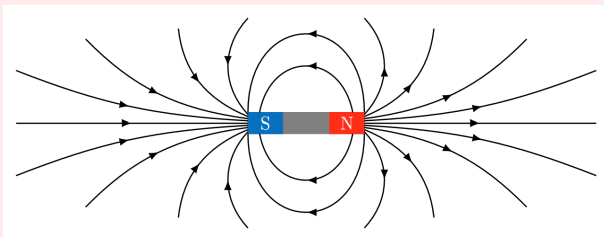


FIGURE 2 – Aimant droit

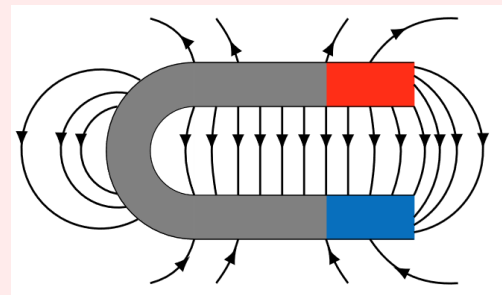


FIGURE 3 – Aimant en U

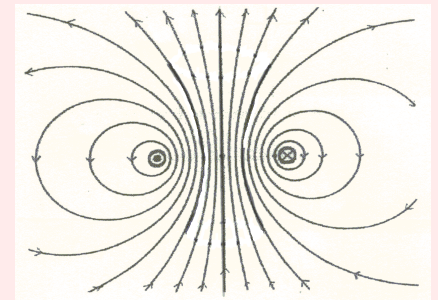
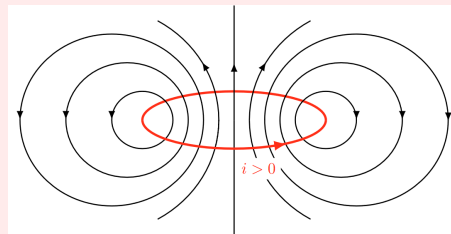
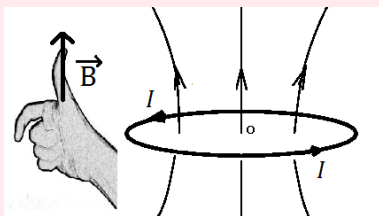


FIGURE 4 – Carte de champ magnétique d'une spire circulaire

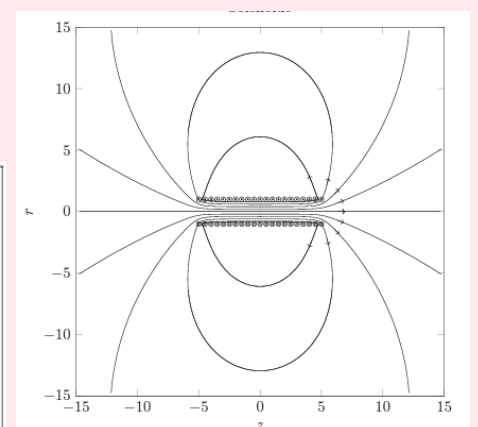
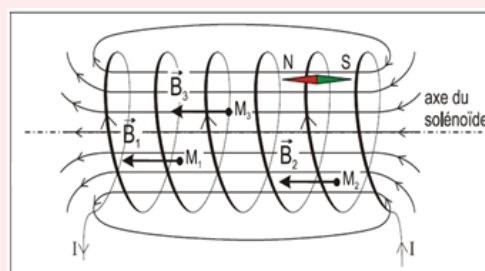
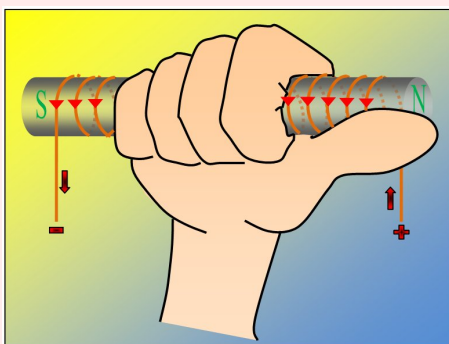


FIGURE 5 – Carte de champ magnétique d'une bobine longue

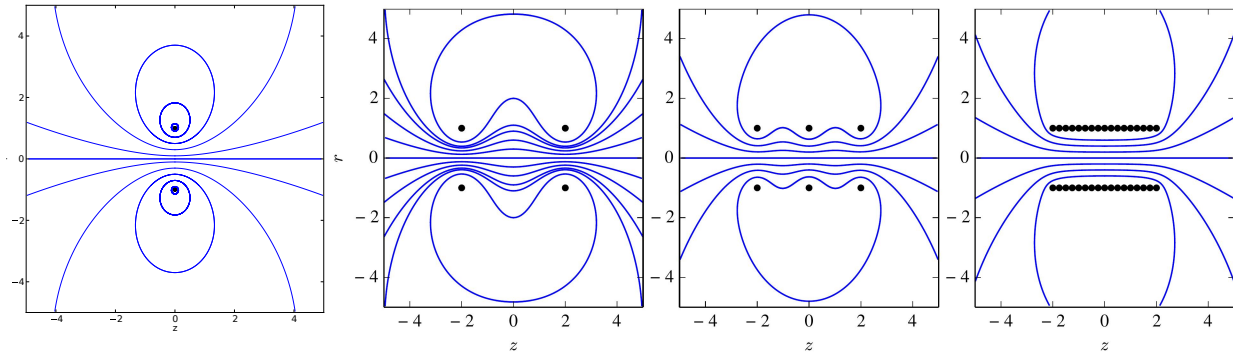


FIGURE 6 – Lignes de champ avec une, deux, trois, puis un grand nombre de spires

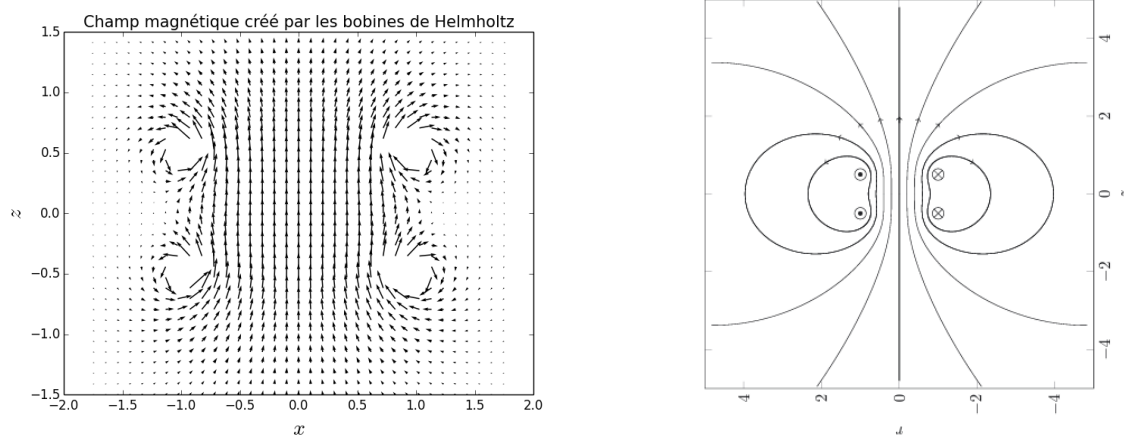


FIGURE 7 – Carte de champ magnétique des bobines de Helmholtz : 2 bobines plates identiques, parcourues par des courants I identiques, l'une à côté de l'autre en configuration de Helmholtz c'est-à-dire que la distance d les séparant est égale au rayon R de chacune des bobines.

💡 Méthode : Analyse d'une carte de champ

- Les **lignes de champ magnétique d'un aimant** quittent le pôle nord de l'aimant et entrent par le pôle sud.
- **Lignes de champ d'un circuit électrique**
 - Les lignes de champ magnétique d'un circuit électrique filiforme entourent les fils électriques : on dit qu'elles enlacent les courants qui les créent.
 - Le sens des lignes de champ magnétique est imposé par la **règle de la main droite** :
 - le courant entre par la base des doigts et le pouce donne le sens du champ magnétique
 - ou le courant entre par la base du pouce et les quatre autres doigts donnent l'orientation des lignes de champ qui entrent par la base des doigts.

Capacité exigible : Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme.

♥ À retenir : Production d'un champ magnétique uniforme

Les dispositifs suivants permettent de produire un champ magnétique uniforme :

- aimant en U : dans son entrefer (dans le U) ;
- bobine longue (de longueur grande devant son rayon) : à l'intérieur, loin des bords ;
- bobines de Helmholtz : entre deux bobines plates identiques parcourues par des courants identiques dans le même sens et séparées d'une distance égale au rayon.

II.2 Conséquences des symétries sur \vec{B}

Activité n°2 – Conséquences des symétries sur \vec{B}

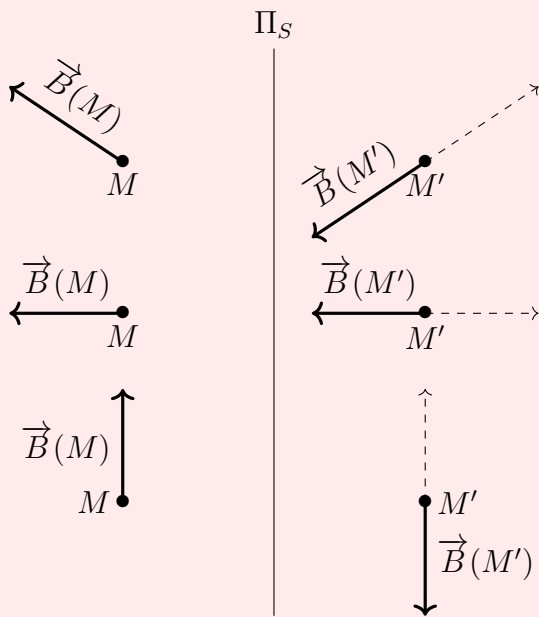
On reprend la situation précédente.

- Q1. Choisissez deux points M et M' symétriques par rapport à un plan d'antisymétrie de la distribution de courant. Représenter les champs magnétiques $\vec{B}(M)$ et $\vec{B}(M')$ en M et M' . Que pouvez-vous en dire ?
- Q2. Comment est le champ magnétique **en un point** M du plan d'antisymétrie ?
- Q3. Choisissez deux points M et M' symétriques par rapport à un plan de symétrie de la boucle de courant. Représenter les champs magnétiques $\vec{B}(M)$ et $\vec{B}(M')$ en M et M' . Que pouvez-vous en dire ?
- Q4. Comment est le champ magnétique **en un point** M du plan de symétrie ?

À retenir : Conséquences des symétries sur le champ magnétique

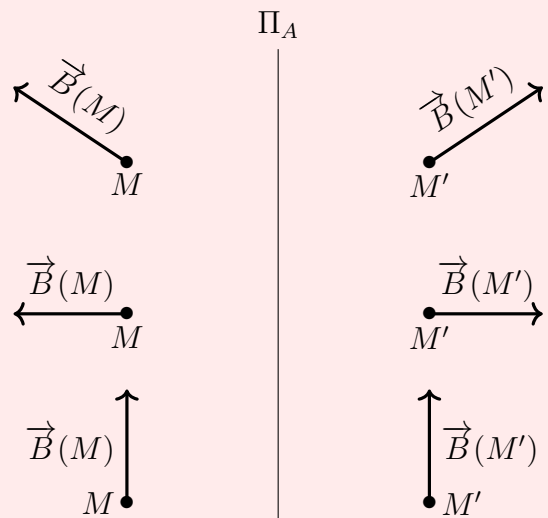
■ Le champ magnétique $\vec{B}(M')$ en un point M' symétrique du point M **par rapport à un plan de symétrie** de la distribution de courant est égal à l'opposé du symétrique du champ magnétique en M .

$$\vec{B}(M') = -\text{sym}_{\Pi_S}(\vec{B}(M))$$



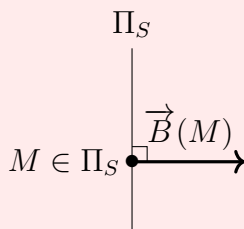
■ Le champ magnétique $\vec{B}(M')$ en un point M' symétrique du point M **par rapport à un plan d'antisymétrie** de la distribution de courant est égal au symétrique du champ magnétique en M .

$$\vec{B}(M') = \text{sym}_{\Pi_A}(\vec{B}(M))$$

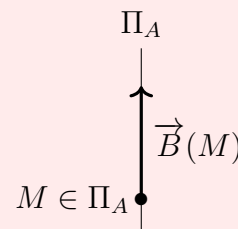


À retenir : Conséquences en un point d'un plan de symétrie/d'antisymétrie

En un point d'un plan de symétrie de la distribution de courant, le champ magnétique est orthogonal au plan de symétrie.



En un point d'un plan d'antisymétrie de la distribution de courant, le champ magnétique appartient au plan d'antisymétrie.



II.3 Invariances d'une distribution de courant et conséquences



Définitions : Invariances d'une distribution de courant

- Une distribution de courant est invariante par toute translation d'axe (Ox) ssi, vue des points $P_1(x_1, y, z)$ et $P_2(x_2, y, z)$, quelques soient x_1 et x_2 , la distribution de courant est la même.
- Une distribution de courant est invariante par toute rotation d'angle θ d'axe (Oz) ssi, vue des points $P_1(r, \theta_1, z)$ et $P_2(r, \theta_2, z)$, quelques soient les angles θ_1 et θ_2 , la distribution de courant est la même.



À retenir : Conséquences des invariances sur le champ magnétique

- Si la distribution de courant est invariante par toute translation d'axe (Ox) , alors les composantes du champ magnétique ne dépendent pas de x .
- Si la distribution de courant est invariante par toute rotation d'angle θ d'axe (Oz) , alors les composantes du champ magnétique ne dépendent pas de θ .

II.4 Comment déterminer la forme générale du champ magnétique ?



Méthode : Comment déterminer la forme générale d'un champ magnétique ?

1. Considérer un point M situé à un endroit quelconque de l'espace.
2. Choisir le système de coordonnées adapté.
3. Écrire la forme générale (dans le système de coordonnées adapté) :

$$\begin{aligned}\vec{B}(M) &= B_x(x, y, z)\vec{u}_x + B_y(x, y, z)\vec{u}_y + B_z(x, y, z)\vec{u}_z \\ \vec{B}(M) &= B_r(r, \theta, z)\vec{u}_r + B_\theta(r, \theta, z)\vec{u}_\theta + B_z(r, \theta, z)\vec{u}_z \\ \vec{B}(M) &= B_r(r, \theta, \varphi)\vec{u}_r + B_\theta(r, \theta, \varphi)\vec{u}_\theta + B_z(r, \theta, \varphi)\vec{u}_\varphi\end{aligned}$$

4. Étudier les plans de symétrie et d'antisymétrie, pour supprimer des composantes.
 - a) Déterminer un premier plan de symétrie/d'antisymétrie de la distribution de courant et **ÉCRIRE OBLIGATOIREMENT** la phrase ci-dessous :
« Le plan $(M, \vec{u}_{...}, \vec{u}_{...})$ est un plan (antisymétrique/symétrie) de la distribution de courant, donc le champ magnétique (appartient/est perpendiculaire) à ce plan, donc la/les composante/s du champ magnétique selon $\vec{u}_{...}$ (et $\vec{u}_{...}$) est/sont nulle/s. »
 - b) Barrer la/les composantes nulles.
 - c) Refaire les deux étapes précédentes, autant de fois qu'il y a de plans de symétrie/d'antisymétrie.

$$\vec{B}(M) = B_{...}(r, y, z)\vec{u}_{...}$$
 - d) Conclure : « Le champ magnétique est porté par $\vec{u}_{...}$: »

$$\vec{B}(M) = B_{...}(r, \theta, z)\vec{u}_{...}$$

$$\vec{B}(M) = B_{...}(r, \theta, \varphi)\vec{u}_{...}$$
5. Étudier les invariances, pour déterminer les variables d'espace dont ne dépendent pas les composantes. **ÉCRIRE OBLIGATOIREMENT** la(les) phrase(s) ci-dessous :
 - a) « La distribution de courant est invariante par toute translation selon / rotation autour de l'axe ... d'angle ... , donc la composante du champ magnétique ne dépend pas de la variable »
Barrer dans $B_{...}(\dots, \dots, \dots)$ la variable dont $B_{...}$ ne dépend pas.
 - b) Conclure : « La composante du champ magnétique ne dépend que de »
6. Conclure : $\vec{B}(M) = B_{...}(\dots)\vec{u}_{...}$

Exercice à maîtriser n°3 – Fil infini

On étudie le champ magnétique créé par un fil infini parcouru par un courant I permanent. On utilise les coordonnées cylindriques d'axe celui du fil.

Le champ magnétique présente, a priori, trois composantes qui dépendent des trois coordonnées cylindriques :

$$\vec{B}(M) = B_r(r, \theta, z)\vec{u}_r + B_\theta(r, \theta, z)\vec{u}_\theta + B_z(r, \theta, z)\vec{u}_z$$

Le but de l'étude des symétries est de **déterminer les composantes qui sont nulles**.

Q1. Faire deux schémas : un dans le plan du fil, et un dans le plan perpendiculaire au plan du fil. Placer sur les deux schémas les vecteurs unitaires de la base cylindrique associés à un point $M(r, \theta, z)$.

Q2. Déterminer un plan de symétrie et un plan d'antisymétrie de la distribution de courant passant par le point M .

En déduire les conséquences sur le champ magnétique. Quel vecteur unitaire porte le champ magnétique ?

Q3. En déduire l'allure des lignes de champ magnétique créé par le fil infini

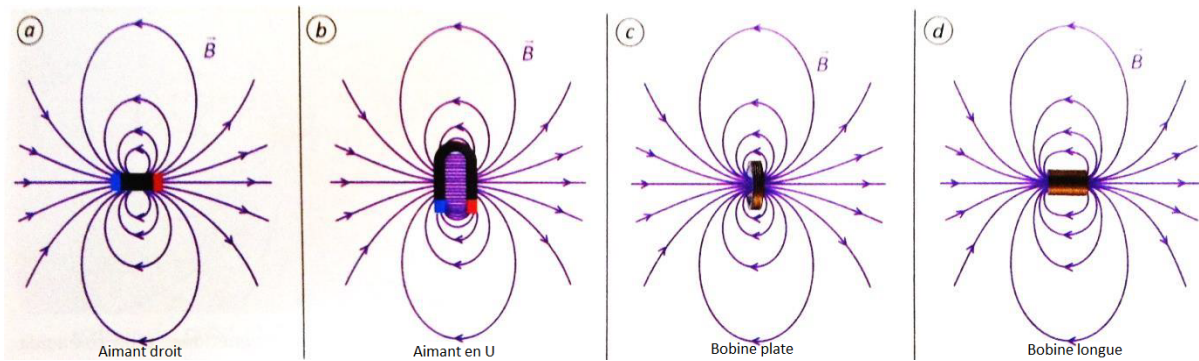
Le but de l'étude des invariances est de **déterminer les variables d'espace dont ne dépendent pas les composantes du champ magnétique**.

Q4. Déterminer les invariances de la distribution de courant.

En déduire les conséquences sur les composantes du champ magnétique.

Q5. En déduire la forme du champ magnétique créé par un fil infini.

III Moment magnétique



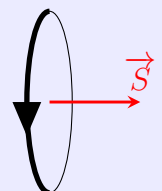
À distance d'observation grande devant la taille de la source du champ magnétique, on remarque que les cartes de champ d'un aimant droit, d'un aimant en U, d'une spire circulaire ou d'un solénoïde sont identiques. À grande distance de la source, ces dispositifs sont des **dipôles magnétiques**. En fait, tous ces dispositifs sont équivalents à grande distance à un dispositif de base : une spire circulaire. Afin de comparer ces dispositifs, on introduit leur moment magnétique \vec{M} .

III.1 Vecteur surface

Définition : Vecteur surface

Soit une boucle de courant plane. On commence par orienter la boucle plane : « On met une flèche sur le contour ». On définit le **vecteur surface** \vec{S} de la surface plane s'appuyant sur la boucle de courant plane orientée :

- direction : orthogonale au plan défini par la boucle plane.
- sens : donné par la **règle de la main droite**. La main droite enlace la boucle de courant avec la flèche allant de la base des doigts autres que le pouce vers le bout des doigts, le pouce indique alors le sens de \vec{S} .
- norme : la surface S .



III.2 Moment magnétique d'une boucle plane

Capacité exigible : Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane.

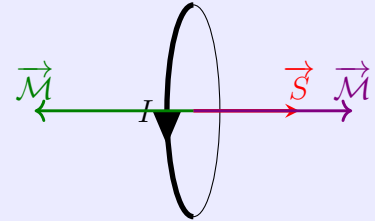
📖 Définition : Moment magnétique

Le **moment magnétique** d'une boucle de courant plane, orientée, de surface S , parcourue par un courant d'intensité I , est le vecteur

$$\vec{\mathcal{M}} = I \vec{S}$$

Caractéristiques du vecteur moment magnétique de la boucle de courant plane :

- direction : orthogonale au plan défini par la boucle plane
- sens :
 - Si $I > 0$: $\vec{\mathcal{M}}$ est de même sens que \vec{S} ;
 - Si $I < 0$: $\vec{\mathcal{M}}$ est du sens opposé à \vec{S} .
- norme : $\|\vec{\mathcal{M}}\| = |I| \times S$ en $A \cdot m^2$



♥ À retenir : Moment magnétique d'un circuit de N spires

Le moment magnétique d'un **circuit comportant N spires planes identiques coaxiales parcourues par le même courant** s'écrit

$$\vec{\mathcal{M}} = NI \vec{S}$$

avec \vec{S} le vecteur surface d'une des spires planes coaxiales.

III.3 Moment magnétique d'un aimant permanent

Capacité exigible : Associer à un aimant un moment magnétique, par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

- Les lignes de champ d'un **aimant** sont identiques à grande distance aux lignes de champ d'une boucle de courant plane. On étend donc la notion de moment magnétique aux aimants. MAIS il ne s'écrit pas en fonction d'une surface et d'un courant, car **aucun courant électrique ne circule dans un aimant**.

Le moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ d'un aimant part du pôle sud et va au pôle nord de l'aimant.

Pour un aimant Néodyme-Fer-Bore ($Ne_2Fe_{14}B$), la norme de son moment magnétique est généralement comprise entre $0,1 A \cdot m^2$ et $10 A \cdot m^2$.

- Le magnétisme terrestre est dû aux matériaux ferromagnétiques (fer et nickel) présents dans le noyau. Du point de vue magnétique, la Terre se comporte comme un dipôle magnétique qui serait situé en son centre, de moment $m_{\text{Terre}} \approx 8.10^{22} A \cdot m^2$, dont l'axe est actuellement incliné d'une dizaine de degrés par rapport à l'axe de rotation de la planète sur elle-même.

♥ À retenir : Moment magnétique d'un aimant permanent

Toute source de champ magnétique (aimant, circuit parcouru par un courant) est **caractérisée par son moment magnétique** : celui-ci permet de déterminer le champ créé à grande distance mais aussi l'action subie par le dipôle (aimant, circuit parcouru par un courant) placé dans un autre champ (cf chapitres suivants).

Pour un circuit parcouru par un courant électrique, $\|\vec{\mathcal{M}}\|$ dépend de l'intensité I du courant et de la surface du circuit. Pour un aimant, $\|\vec{\mathcal{M}}\|$ dépend du matériau et de son volume.

<u>Ordres de grandeur à connaître :</u>	Dipôle magnétique	Moment magnétique en $A \cdot m^2$
	Aimant usuel	$1 A \cdot m^2$
	Terre	$7,9.10^{22} A \cdot m^2$

R

ENDEZ-VOUS

P.86 Idées de physique
 P.90 Art & science
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

LA CLÉ DES CHAMPS FORTS

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
 professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

Il est difficile de créer des champs magnétiques à la fois permanents et très intenses. Les records actuels ne dépassent pas 50 teslas.

Produire des champs magnétiques très intenses est un enjeu de taille, tant en recherche fondamentale, pour sonder les propriétés de la matière, que du côté de la santé, pour augmenter la résolution de l'IRM (imagerie par résonance magnétique). Mais le champ à la surface des meilleurs aimants permanents n'atteint que quelques teslas, environ 30 000 fois le champ magnétique terrestre. Une valeur modeste et, de plus, limitée à de petits volumes.

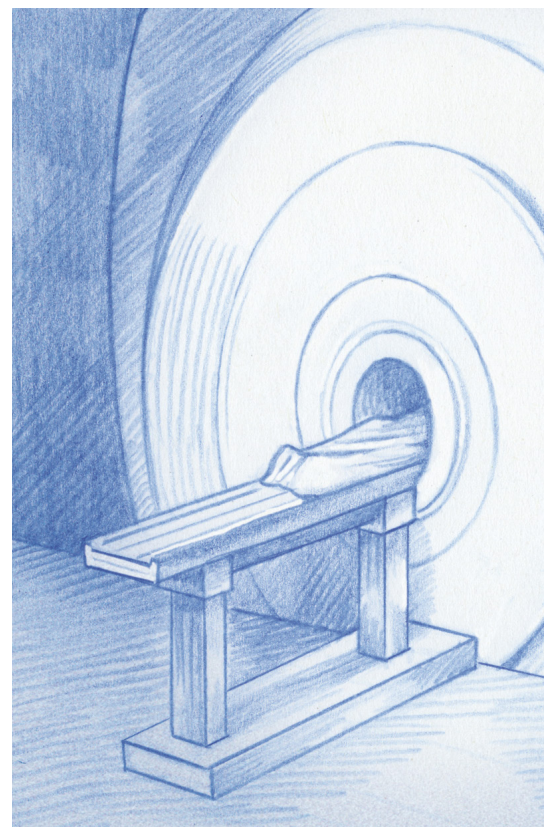
Pour des champs plus intenses et plus étendus, il y a les électroaimants, présents dans de nombreuses applications du quotidien, par exemple les moteurs électriques ou les verrouillages de porte. Mais des obstacles apparaissent dès que l'on souhaite des champs de plusieurs dizaines de teslas. Desquelles, et comment les surmonter ?

Voyons d'abord le principe d'un électroaimant. Tout courant électrique

crée un champ magnétique dans son voisinage. Celui-ci est toutefois très faible, même pour des courants intenses : pour atteindre 1 millième de tesla, il faut se placer à 2 centimètres d'un conducteur où circulent 100 ampères !

DU COURANT ÉLECTRIQUE AU CHAMP MAGNÉTIQUE

Afin d'obtenir un champ plus intense, on enroule le fil conducteur autour d'un cylindre. Le champ magnétique d'un tel solénoïde est non seulement plus intense que pour un fil droit, il est aussi quasiment uniforme à l'intérieur de cette bobine (voir l'encadré page ci-contre). Le champ central est proportionnel au courant et au nombre de tours de fil par unité de longueur de la bobine. Avec un courant de 10 ampères et 20 000 tours de fil par mètre, on atteint déjà 0,25 tesla. Ne suffit-il donc pas d'augmenter l'intensité et le nombre de tours par unité de longueur, bref de faire des

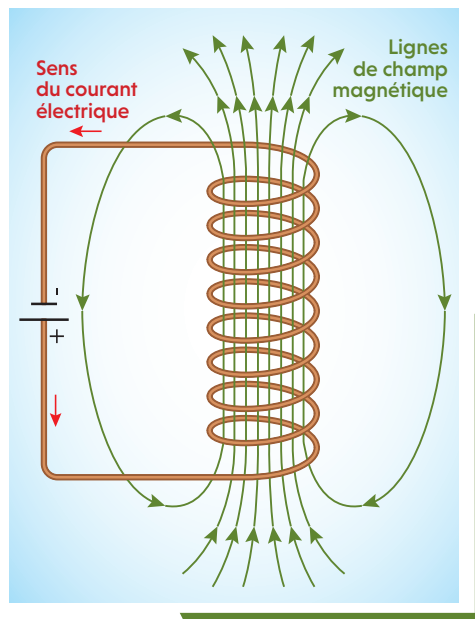
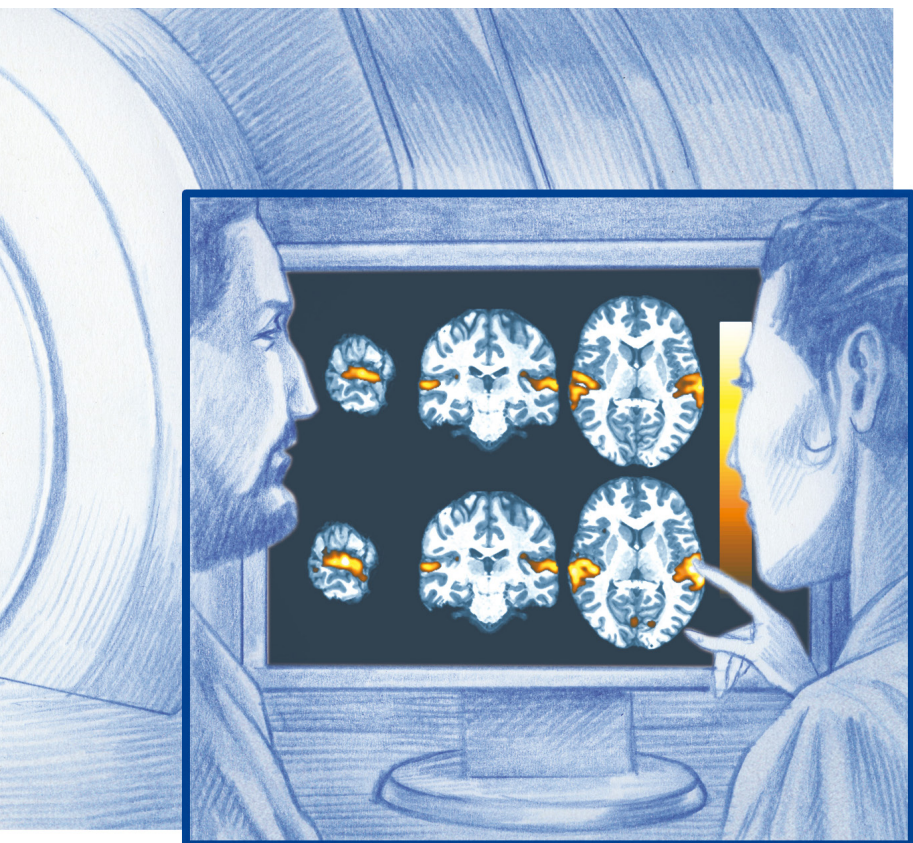


bobines géantes, pour obtenir des champs aussi forts que souhaité ?

On est vite confronté à deux problèmes. Le premier est l'effet Joule, c'est-à-dire la chaleur dégagée à cause de la résistance électrique du conducteur. Si notre bobine faisait 10 centimètres de long et de diamètre, avec du fil de cuivre de 1 millimètre carré de section, il faudrait un courant de 40 ampères pour obtenir 1 tesla, mais la puissance dissipée serait d'environ 16 kilowatts, de quoi faire fondre rapidement le dispositif. Et inutile de chercher à réduire cette valeur en augmentant le diamètre du fil comme on le fait pour les rallonges électriques des appareils électroménagers : pour garder un même encombrement, il faudrait réduire le nombre de tours, donc

PRINCIPE D'UN ÉLECTROAIMANT

Tout courant électrique s'accompagne d'un champ magnétique. Pour un fil conducteur rectiligne, ce champ, proportionnel à l'intensité du courant, est faible et décroît comme l'inverse de la distance au fil. En enroulant le fil conducteur autour d'un cylindre, on montre que le champ magnétique produit à l'intérieur de ce solénoïde est considérablement plus intense, car il est proportionnel au nombre de tours que fait le conducteur par unité de longueur mesurée le long de l'axe. De plus, ce champ est relativement uniforme à l'intérieur du solénoïde.



Au centre NeuroSpin du CEA, au sud de Paris, une infrastructure de neuro-imagerie par IRM est en passe d'utiliser un électroaimant supraconducteur de 11,7 teslas, un record pour ce type d'application.

augmenter le courant, et la puissance dissipée serait exactement la même.

Ce n'est pas tout. Un fil parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique subit une force dite «de Laplace». Il s'ensuit que les fils de la bobine se repoussent les uns les autres, avec une pression proportionnelle au carré du courant électrique – une dizaine d'atmosphères dans la bobine que nous avons considérée. En raison de la puissance dissipée ou des contraintes mécaniques, les bobines ne semblent donc pas adaptés à l'obtention de champs magnétiques très intenses.

Une solution parfois adoptée est d'accepter la destruction de la bobine! À ce prix, on produit des champs atteignant 300 teslas et, quitte à tout détruire, on

peut « comprimer le flux magnétique » avec des explosifs et obtenir ainsi près de 2000 teslas pendant quelques dizaines de microsecondes. Laissons de côté ces solutions extrêmes et concentrons-nous sur la production de champs forts permanents.

UN COURANT DANS LA MASSE

En 1933, le physicien américain Francis Bitter a proposé une solution consistant à utiliser un empilement de disques conducteurs percés, séparés par des isolants dont la découpe impose une circulation hélicoïdale du courant, afin d'engendrer un champ magnétique le long de l'axe (*voir l'encadré page suivante*).

Grâce à l'emploi d'un matériau massif, les contraintes mécaniques sont bien mieux supportées; par ailleurs, les perces

permettent la circulation d'eau qui refroidit efficacement le dispositif. Le National high magnetic field laboratory, au Nouveau-Mexique, a ainsi obtenu un champ de 35 teslas dans une zone cylindrique d'environ 3 centimètres de diamètre en faisant circuler 40000 ampères à 500 volts, soit 40 mégawatts de puissance électrique et 15000 litres d'eau par minute! On comprend pourquoi on n'envisage pas forcément de faire des électroaimants de Bitter encore plus gros... >

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



> Une autre solution pour obtenir des champs intenses est de faire appel aux matériaux supraconducteurs, qui perdent leur résistance électrique à température suffisamment basse. Pas de résistance, pas d'effet Joule et, cerise sur le gâteau, une alimentation électrique très réduite. Ainsi, les 9000 électroaimants du collisionneur LHC, au Cern, qui produisent un champ de 8 teslas, sont faits d'un alliage niobium-titane supraconducteur. Hélas, cette solution est elle aussi fortement limitée: la supraconductivité disparaît si le matériau est plongé dans un champ magnétique trop élevé, 9 teslas par exemple pour l'alliage niobium-titane à sa température de refroidissement au LHC.

LES SUPRACONDUCTEURS À LA RESCOUSSE

D'où l'idée de construire des électroaimants hybrides, avec un électroaimant extérieur supraconducteur et un électroaimant intérieur «résistif». Dans cette configuration, le champ magnétique à la périphérie du dispositif n'est pas suffisant pour faire perdre sa supraconductivité à l'électroaimant externe, tandis qu'au centre, les champs créés par les deux électroaimants s'ajoutent: on atteint aujourd'hui 45 teslas, mais au prix d'une grande consommation d'énergie.

Plusieurs équipes dans le monde cherchent à réaliser des dispositifs entièrement à base de supraconducteurs en utilisant des matériaux, tels les cuprates, qui restent supraconducteurs à des températures moins basses et à des champs de plusieurs dizaines de teslas, et qui supportent des courants très intenses – par exemple plus de 1000 ampères pour un fil en alliage ReBCO (pour *rare-earth barium copper oxyde*) de 1 millimètre carré de section.

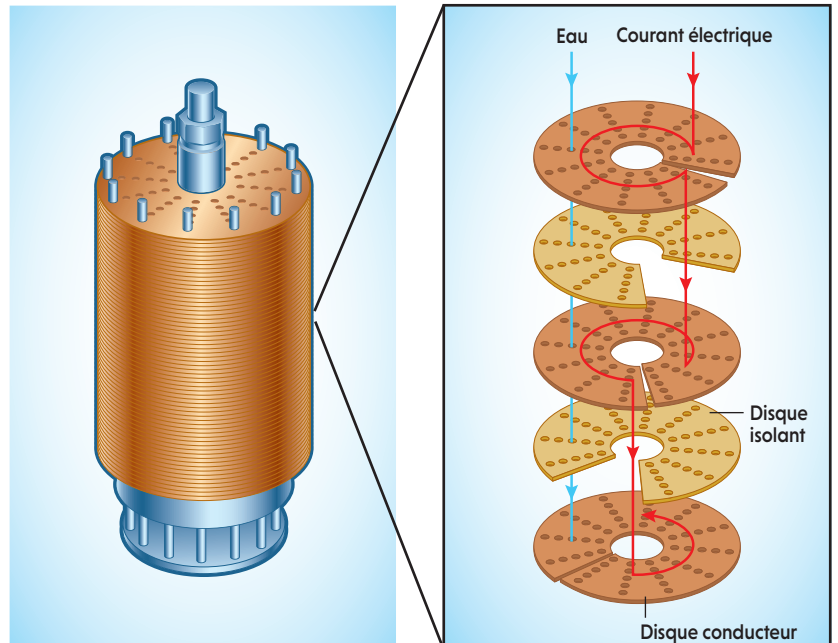
Pour des raisons de fabrication et de résistance mécanique, on élabore ces matériaux sous la forme de films de 1 micromètre d'épaisseur déposés sur un ruban isolant épais de quelques dizaines de micromètres et de largeur centimétrique. Les aimants sont alors construits en empilant plusieurs galettes obtenues en enroulant le ruban sur lui-même.

Reste une difficulté: pour des champs très intenses, le moindre incident peut faire perdre localement sa supraconductivité au matériau. L'effet Joule réapparaît, réchauffe le matériau, la perte de supraconductivité s'étend de proche en proche et le circuit tout entier est menacé d'endommagement par échauffement.

Pour remédier à ce problème, les physiciens du Laboratoire national des

LES ÉLECTROAIMANTS DE BITTER

Un électroaimant de Bitter est constitué d'un empilement qui alterne disques conducteurs et disques isolants. Ces disques sont fendus et disposés de telle façon que le courant, qui circule dans toute la masse du matériau conducteur, décrit globalement une trajectoire hélicoïdale, comme dans un solénoïde. Les disques sont par ailleurs percés de nombreux trous à travers lesquels circule de l'eau, ce qui assure un refroidissement efficace. La masse du conducteur autorise le passage d'un courant très intense et offre une bonne résistance aux contraintes mécaniques exercées par le champ magnétique, qui peut alors atteindre des valeurs record.



champs magnétiques intenses, à Grenoble, ont fait le choix d'utiliser, en guise d'isolant entre les enroulements de ruban... du métal. Lorsque tout fonctionne bien, le courant circule dans le supraconducteur, de résistance électrique nulle, plutôt que dans le métal: malgré sa faible résistance, ce dernier se comporte comme un isolant. Mais en cas d'incident, le courant bloqué par la perte de supraconductivité passe par le métal sur tout le périmètre de la bobine. Au lieu d'être local et destructeur, l'échauffement, réparti sur toute la galette, est bien plus faible et n'endommage plus le dispositif.

Ainsi, cette année à Grenoble, la bobine prototype nommée Nougat, placée pour être testée au sein d'un électroaimant classique produisant déjà 20 teslas, a permis d'atteindre un champ magnétique total de 32,5 teslas pendant plusieurs minutes. Ces expériences ouvrent la voie à la production de champs magnétiques très intenses – 30 à 50 teslas – en continu, par des dispositifs intégralement supraconducteurs, compacts et économes en énergie. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Battesti *et al.*, **High magnetic fields for fundamental physics**, *Physics Reports*, vol. 765-766, pp. 1-39, 2018.

P. Pugnat *et al.*, **Progress in the construction of the 43 T hybrid magnet at LNCMI-Grenoble**, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28(3), pp. 1-7, 2018.

LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

UN CERVEAU À CŒUR OUVERT

Comment fonctionne l'imagerie par résonance magnétique (IRM)? Par l'analyse du spin des protons placés dans un champ magnétique, et beaucoup d'astuces.

Début avril 2024, Iseult, un appareil d'imagerie par résonance magnétique (IRM), livrait ses premières images d'un cerveau humain avec une résolution inégalée (de l'ordre du millimètre) après avoir fait de même en 2021, lors de phases de tests, avec un... potimarron. Pour cet exploit, pas de rayonnements, comme les radios ou les scanners, mais un champ magnétique gigantesque. Comment l'expliquer?

LA TOUPIE DE LARMOR

L'IRM repose sur une propriété quantique des noyaux des atomes: le spin. Ici, nous avons juste besoin de savoir que, quand ce spin n'est pas nul, le noyau se comporte à la fois comme une petite toupie et comme un aimant élémentaire dont la direction Nord-Sud est alignée avec l'axe de la toupie. Retenez également que la mesure de l'aimantation, nommée

«moment magnétique», est proportionnelle à celle de la rotation (le moment cinétique), avec comme facteur de proportionnalité le rapport gyromagnétique.

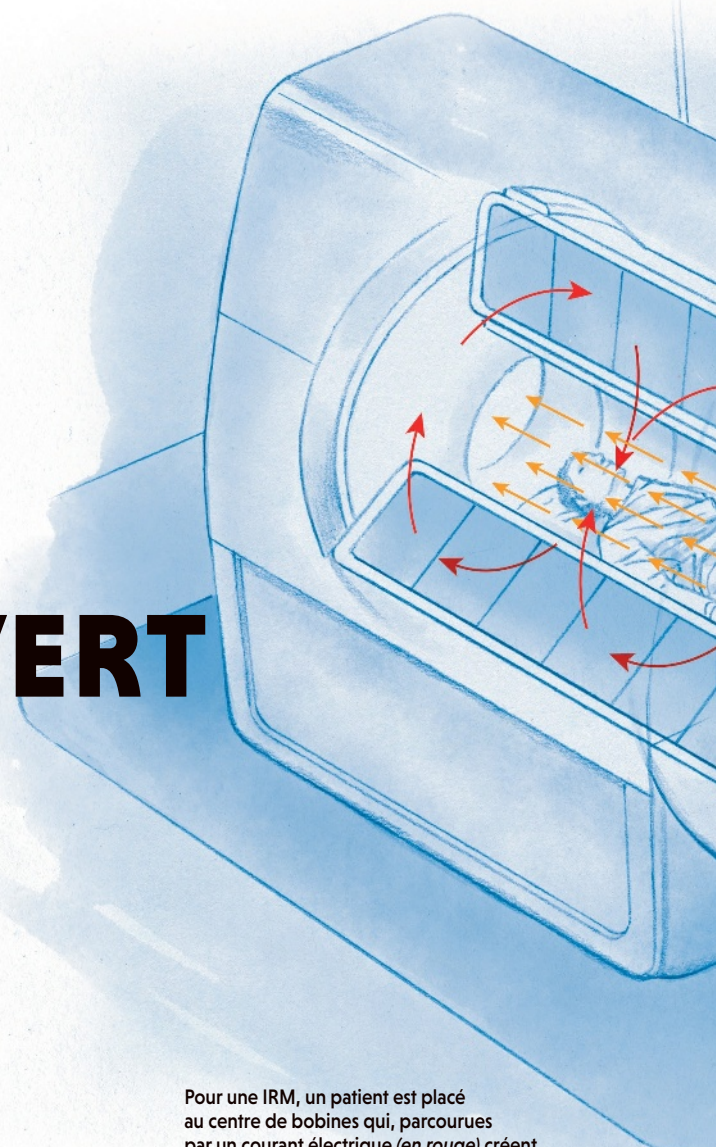
Que se passe-t-il lorsqu'on place un noyau de spin non nul dans un champ magnétique? Le champ magnétique exerce sur l'aimant un couple qui a tendance à aligner l'axe de ce dernier avec le champ magnétique. S'il ne s'agissait que d'un aimant, celui-ci basculerait dans la direction du champ magnétique, mais notre spin est aussi une toupie. Or une toupie soumise à un couple a un comportement particulier: elle ne bascule pas, elle se met à tourner en conservant son inclinaison comme les toupies des enfants sous l'effet de la gravité. Il en est de même pour notre spin qui se met à tourner – les physiciens parlent de «précession de Larmor» – autour du champ magnétique, avec une vitesse de rotation

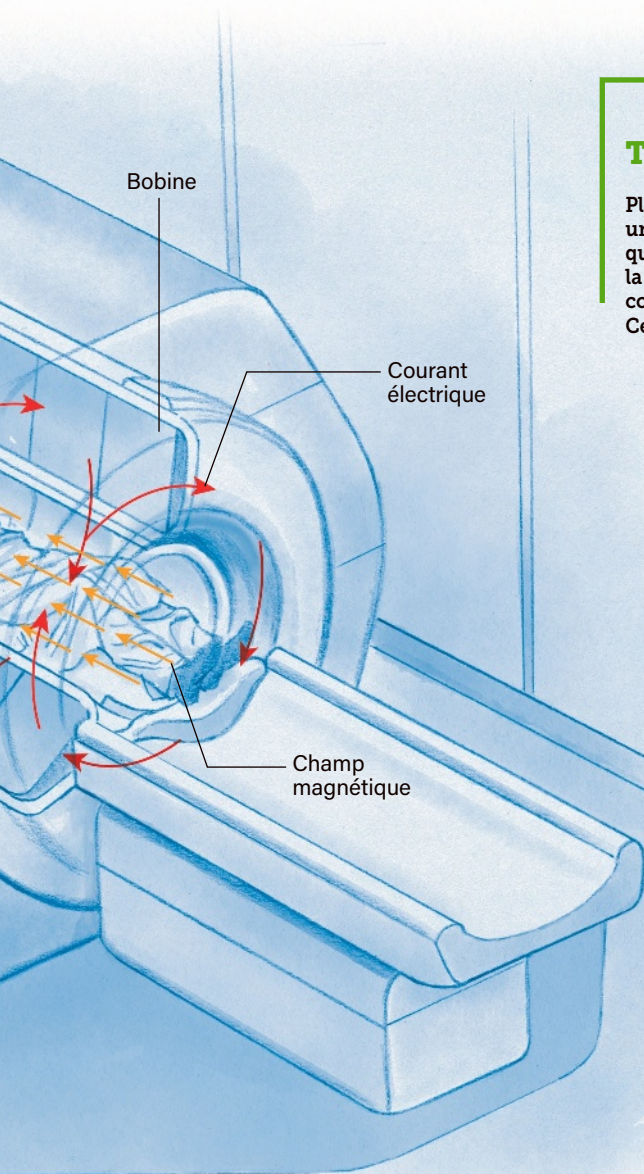
Pour une IRM, un patient est placé au centre de bobines qui, parcourues par un courant électrique (en rouge) créent un champ magnétique intense (en orange) dirigé selon l'axe du cylindre.

égale au produit du rapport gyromagnétique par le champ magnétique.

La fréquence (le nombre de tours par seconde) de cette précession est parfaitement connue. On obtient 42,57 MHz pour un proton, le noyau de l'atome d'hydrogène, dans un champ magnétique de 1 tesla (équivalent à celui des aimants au néodyme disponibles dans le commerce). En plein dans la bande des ondes radio! Ce phénomène est à la base de l'IRM, car il permet de mesurer la concentration d'atomes d'hydrogène présents dans notre corps tout en offrant des informations sur leur environnement, c'est-à-dire la nature des fluides ou des tissus dans lesquels ils se trouvent.

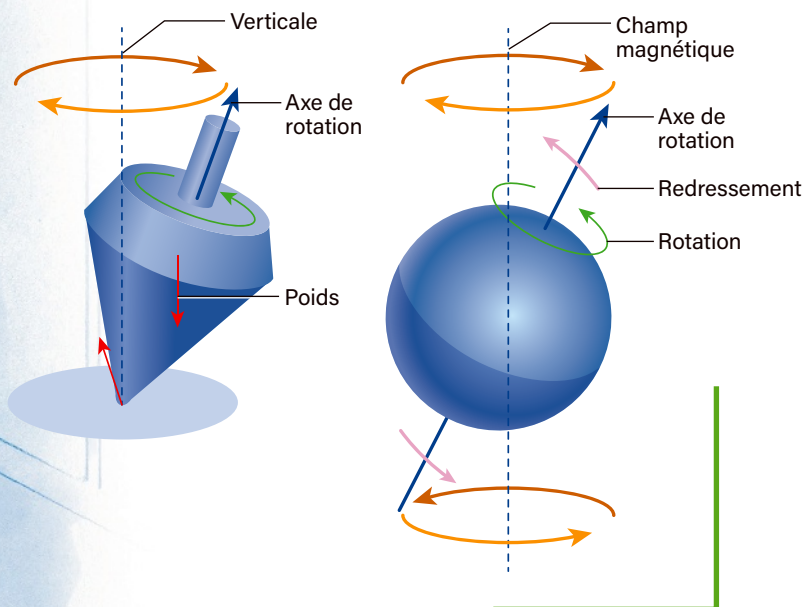
Comment? Individuellement, le signal d'un noyau d'hydrogène est bien trop faible pour être détecté. Ce n'est pas le cas de la somme des effets produits par tous les atomes d'hydrogène présents.





TOUPIE OR NOT TOUPIE

Placé dans un champ magnétique, un noyau (à droite) se comporte un peu comme une toupie (à gauche). On observe une précession, c'est-à-dire que l'axe de rotation tourne lui-même autour d'un axe et décrit un cône : la toupie pivote autour de la verticale alors que le noyau, qui se comporte comme un aimant élémentaire, tourne autour du champ magnétique. Ce dernier crée un couple qui tend à redresser le spin du noyau (flèches roses).



Qu'ils soient alignés ou pas, puisque les moments magnétiques et cinétiques sont pour chaque noyau proportionnels, il en sera de même pour leur somme : autrement dit, le rapport gyromagnétique est le même du noyau jusqu'à l'aimantation macroscopique. La fréquence de précession dans un champ magnétique uniforme est donc la même quelle que soit l'échelle à laquelle on se place ! Vous pouvez maintenant oublier l'origine quantitative du phénomène...

BASCULE AVEC DES ONDES RADIO

Entrons plus dans le détail, en prenant un peu d'eau. Du fait de l'agitation thermique, tous les spins nucléaires des atomes d'hydrogène sont orientés dans toutes les directions et l'aimantation est rigoureusement nulle. Plongeons maintenant le liquide dans un champ magnétique

uniforme : les spins effectuent une précession autour de ce dernier. C'est là qu'interviennent les interactions des spins avec leur environnement qui se traduisent par une dissipation, semblable aux frottements qui font perdre de l'énergie à une toupie d'enfant. Rapidement, la précession diminue et les spins ont tendance à s'aligner avec le champ magnétique. En réalité, l'alignement demeure faible, car l'agitation thermique règne encore.

On estime qu'en moyenne, pour un champ de 1 tesla et à la température du corps humain, cet alignement concerne un spin sur 300 000. Cela paraît peu, mais 1 millimètre cube d'eau contenant 7×10^{19} atomes d'hydrogène, c'est suffisant pour qu'apparaisse une aimantation macroscopique. Soumettons alors l'eau à une onde radio judicieusement choisie, notamment en accordant sa fréquence à celle de la précession. Il se

produit un phénomène de résonance, qui donne son nom à la technique d'imagerie. L'énergie de l'onde est absorbée, l'aimantation commence à basculer, à s'éloigner de la direction du champ magnétique jusqu'à se retrouver dans la direction opposée, puis se réaligne progressivement et ainsi de suite... Ce sont les oscillations de Rabi.

Pour une IRM, on applique l'onde juste assez longtemps pour que l'aimantation bascule à l'orthogonale du champ magnétique. Cette rotation produit elle-même une onde électromagnétique qu'il est possible de détecter avec des antennes, ici des

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



bobines placées autour de l'échantillon – vous ou un potimarron. En collectant les mesures, on observe une décroissance très rapide de l'aimantation dans le plan perpendiculaire au champ magnétique et une croissance plus lente de l'aimantation dans la direction du champ, jusqu'à retrouver l'aimantation de départ. Toutes ces informations (valeur de l'aimantation, vitesses avec lesquelles elle croît ou décroît selon les directions...) sont caractéristiques de l'environnement de nos atomes d'hydrogène.

C'est ce qui va permettre de distinguer le sang, les tissus, les graisses, les os... En pratique le champ magnétique utilisé dans la majorité des IRM en France est de 1,5 tesla (par comparaison, les électroaimants du LHC produisent chacun un champ de 8,4 teslas). C'est un champ intense qui nécessite d'énormes bobines de supraconducteurs et des cryostats pour les maintenir à très basse température d'où la taille intimidante de ces instruments. Iseult produit un champ de 11,7 teslas: les performances sont améliorées, mais il faut un aimant de 132 tonnes, de 5 mètres de long et autant de diamètre!

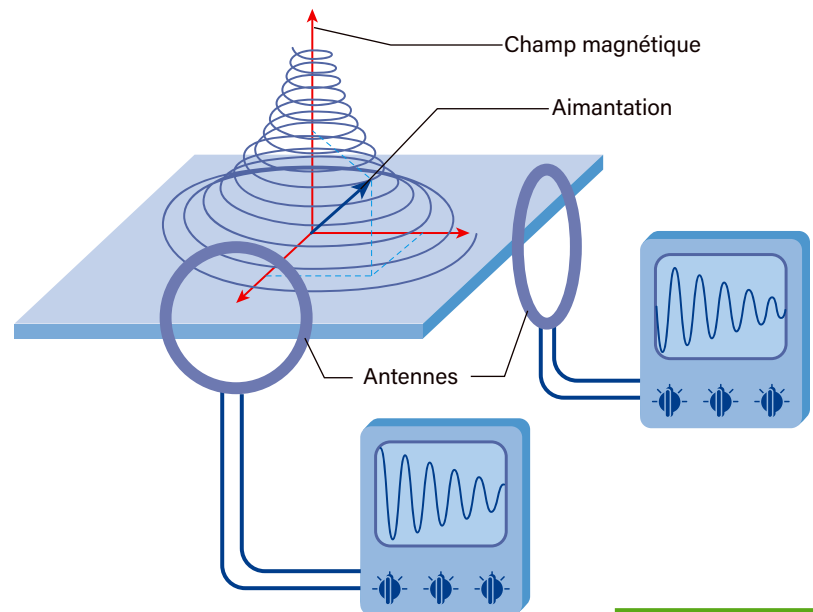
UN PATIENT DÉCOUPÉ EN TRANCHES

Nous disposons d'une méthode de détection et de caractérisation de l'environnement grâce à la résonance magnétique, mais toujours pas d'imagerie, car les mesures sont globales et non locales: il manque des informations spatiales. On les obtient en ajoutant au champ magnétique intense un gradient de champ: un champ plus petit, de même direction que le grand, mais dont la valeur dépend de la position. Pour ce faire, trois jeux de bobines créent des champs qui croissent lorsqu'on se déplace dans une direction et restent constants dans les directions perpendiculaires.

Avec ce gradient, la fréquence de précession de l'aimantation n'est plus identique dans tout l'échantillon: la résonance et le basculement des spins ne se produisent que dans un même plan. Les antennes fournissent alors la mesure de l'aimantation. En effectuant de telles mesures successivement en variant la fréquence de l'onde radio, on sélectionne des plans distincts, comme si l'on découpait le sujet étudié en tranches. Il reste à répéter l'opération en changeant la direction dans laquelle le petit champ varie et donc le plan où il est constant. Une transformation mathématique permet de croiser les

LA SPIRALE DU SPIN

Lors d'une IRM, soumise à une onde radio, l'aimantation des noyaux (flèche bleue) s'est éloignée de la direction du champ magnétique jusqu'à être orthogonale. Elle y revient en suivant une trajectoire en spirale, car tout en effectuant une précession autour de l'axe du champ magnétique (vertical), elle décroît dans le plan horizontal et croît dans la direction verticale. Deux antennes (les cercles bleus) mesurent l'évolution de cette aimantation. À partir des informations obtenues dans différents plans de coupe, on obtient une image.



informations dans des plans perpendiculaires pour reconstituer l'aimantation locale, donc d'obtenir une image.

En pratique, de nombreuses subtilités viennent compliquer ce principe général. On utilise en particulier ce qu'on appelle les échos de spin. La décroissance rapide de l'aimantation perpendiculaire au champ est due au fait que dans un tissu, le champ magnétique local n'est pas parfaitement homogène. Les spins individuels tournent à des fréquences légèrement différentes: ils se désynchronisent et l'aimantation perpendiculaire se brouille rapidement. On peut cependant les resynchroniser en appliquant l'onde radio suffisamment longtemps pour que les spins changent de sens à partir de la direction perpendiculaire au champ magnétique. C'est comme si on avait inversé le sens de rotation; on reconstitue ainsi en partie l'aimantation perpendiculaire qui croît de nouveau et crée comme un écho que l'on détecte dans les antennes. Cela livre des informations supplémentaires et favorise un meilleur diagnostic, même sur un potimarron... ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Boulant et al., Commissioning of the Iseult CEA 11.7 T Whole-Body MRI : Current Status, Gradient – Magnet Interaction Tests and First Imaging Experience, *Magn. Reson. Mater. Phys.*, 2023.

S. Grand et al., Principes fondamentaux de l'imagerie par résonance magnétique. Principes de l'IRM multimodalité, *Pratique Neurologique*, 2012.