

OMPP 7

Dipôles

École Centrale Pékin

2019-2020

Table des matières

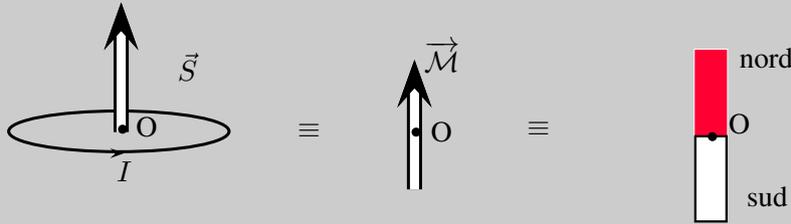
2	Le dipôle magnétique (ou magnétostatique)	2
2.1	Définitions	2
2.2	Potentiel vecteur et champ magnétique créés par un dipôle magnétique	3
2.3	Action d'un champ magnétique EXTERIEUR sur un dipôle magnétique	5

2 Le dipôle magnétique (ou magnétostatique)

2.1 Définitions

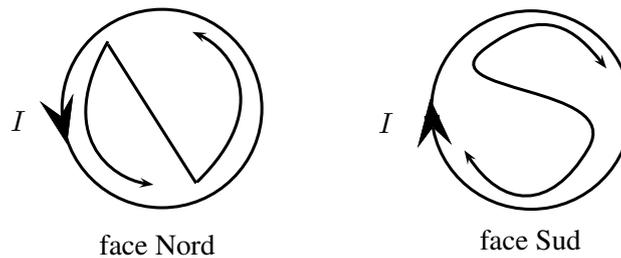
2.1.1 Définition du moment magnétique

Le moment dipolaire magnétique \vec{M} d'une boucle orientée parcourue par un courant d'intensité I est défini par $\vec{M} \triangleq I\vec{S}$ (unité : $A \cdot m^2$)



2.1.2 Face nord, face sud d'une boucle de courant

La notion de moment magnétique a été introduite, au paragraphe précédent, sur une boucle de courant ; on sait cependant que cette notion peut intervenir dans la matière sans la présence de quelconques générateurs : c'est le cas de la matière aimantée. Les aimants possèdent deux faces (la face nord est du côté de la pointe de la flèche de \vec{M} , la face sud à l'opposé) et l'on peut, par analogie à ces aimants, attribuer une face nord et une face sud à une boucle de courant. Le moyen mnémotechnique ci-dessous que l'on apprenait autrefois au collège, permet de retrouver la polarité de chaque face de la boucle :



2.1.3 Définition du dipôle magnétostatique (ou magnétique)

On appelle dipôle magnétique toute distribution de courants permanents dont le moment magnétique est non nul et dont les dimensions sont faibles par rapport à la distance à laquelle on décrit le champ magnétique qu'elle engendre.

On verra au paragraphe 2.2 que le moment dipolaire \vec{M} permet de caractériser quantitativement les propriétés du dipôle magnétique.

Remarque : On avait, dans le paragraphe ??, distingué le doublet de charges, du dipôle électrostatique (ce dernier correspondant au doublet «considéré à grande distance»). On peut, de même, distinguer la boucle de courant, du dipôle magnétique (ce dernier correspondra donc à une boucle de courant «considérée à grande distance»).

2.2 Potentiel vecteur et champ magnétique créés par un dipôle magnétique

2.2.1 Expressions

On admettra les résultats suivants dont on remarquera **qu'ils présentent une forte analogie avec le potentiel scalaire et le champ électrostatique créés par un dipôle électrostatique** ce qui permet de diminuer l'effort de mémorisation.

On considère un dipôle magnétique caractérisé par son moment dipolaire $\vec{M} = M\vec{u}_z$ placé en O. On adopte la base locale sphérique (voir figure 2.1).

- Un potentiel vecteur créé par ce dipôle en un point M de l'espace a pour expression :

- en coordonnées sphériques :
$$\vec{A}(M) = \frac{\mu_0 M \sin \theta}{4\pi r^2} \vec{u}_\varphi$$

- de manière intrinsèque :
$$\vec{A}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{M} \wedge \overrightarrow{OM}}{OM^3}$$

- Le champ magnétique s'écrit avec le choix des coordonnées sphériques :

$$\vec{B}_{dipole}(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_\varphi)(M) = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \begin{vmatrix} 2 \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{vmatrix}$$

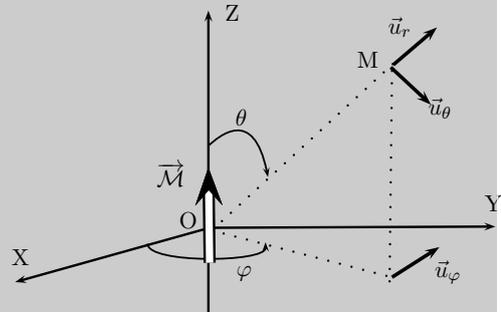


FIGURE 2.1

2.2.2 Allure des lignes de champ; comparaison avec le dipôle électrostatique

Les expressions des champs électrostatique et magnétostatique créés respectivement par les dipôles électrostatique et magnétostatique étant identiques, les lignes de champ sont identiques. On pourra donc se reporter au paragraphe ?? pour contempler à nouveau les fameuses lignes. Nous insistons ci-dessous sur la comparaison des lignes de champ créés par une boucle de courant (fig. 2.2) et le doublet de charges (fig. 2.3). On remarquera que les lignes de champ magnétostatique entourent la boucle de courant.

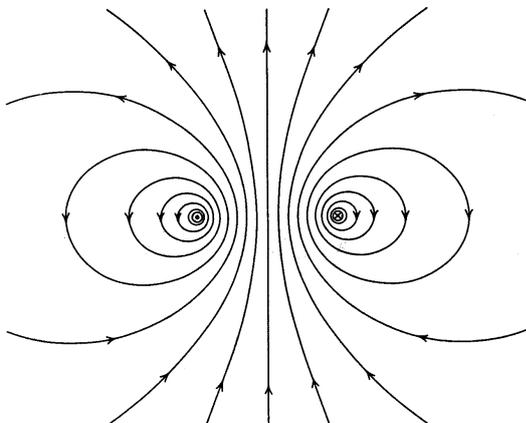


FIGURE 2.2 – Lignes de champ du doublet magnétique

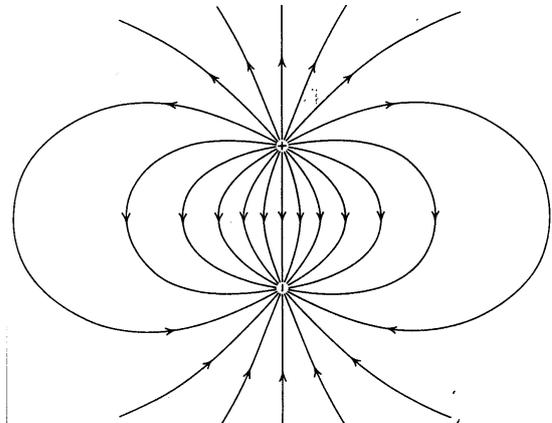
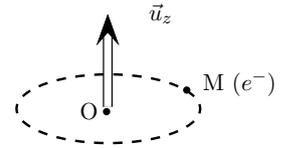


FIGURE 2.3 – Lignes de champ du doublet électrostatique

2.2.3 Exemples ; ordres de grandeur

■ Magnéton de Bohr

On considère un modèle pré-quantique d'atome (dit atome de BOHR) où l'électron a une trajectoire circulaire uniforme autour d'un point O. Déterminons le moment magnétique \vec{M} de cet édifice.



■ Champ magnétique terrestre

La Terre produit un champ magnétique terrestre équivalent à celui d'un dipôle magnétique placé en son centre mais orienté du nord géographique vers le sud géographique. Sa valeur est de l'ordre de $\|\vec{M}\| \sim 10^{23} \text{ A.m}^2$.

Le champ magnétique terrestre s'inverse durant des périodes allant de la dizaine de milliers à de nombreux millions d'années, avec un intervalle moyen de 250 000 ans environ. La dernière modification est peut-être survenue il y a 780 000 ans. Le mécanisme responsable de cette inversion géomagnétique n'est pas encore bien compris.

Culturel : Le champ magnétique terrestre est engendré par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la Terre. La Terre possédait déjà un champ magnétique il y a 3,2 milliards d'années. La magnétosphère créée par le champ magnétique terrestre, joue un rôle essentiel dans le développement de la vie sur Terre, en déviant les particules mortelles du vent solaire et des rayons cosmiques formant ainsi un des plus magnifique phénomène naturel : les aurores boréales et australes. Lorsque le noyau se sera refroidi (dans quelques... milliards d'années) et qu'en conséquence le champ magnétique aura disparu, il est probable que les formes de vie existantes ne pourront plus subsister. Ces conditions sont celles qui règnent aujourd'hui sur la Lune et Mars.

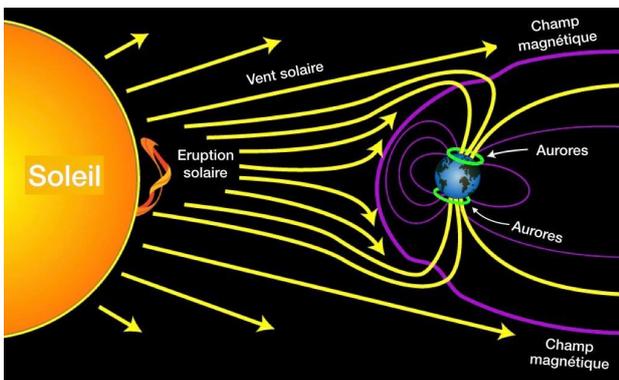


FIGURE 2.4 – La magnétosphère protège des vents solaires



FIGURE 2.5 – Aurore boréale

2.3 Action d'un champ magnétique EXTERIEUR sur un dipôle magnétique

Jusqu'à maintenant on s'est intéressé au champ créé par un dipôle magnétique. Dans ce paragraphe, on cherche à déterminer les actions mécaniques exercées par un champ magnétique (qu'on va nommer «extérieur» pour le distinguer du champ magnétique créé par le dipôle) sur le dipôle.

2.3.1 Actions exercées par un champ extérieur uniforme sur le dipôle

Le torseur des actions exercées par le champ extérieur \vec{B}_{ext} uniforme à l'échelle du dipôle est le couple ^a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F} = \vec{0} \\ \vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}_{ext} \end{array} \right\}$$

• L'énergie potentielle d'interaction du champ magnétique extérieur avec le dipôle magnétique est :

$$E_p = -\vec{M} \cdot \vec{B}_{ext}$$

• Le champ extérieur \vec{B}_{ext} a *tendance* à aligner le dipôle magnétique \vec{M} dans sa direction et dans son sens.

a. On admettra que le résultat persiste si $\vec{B}_{ext}(t)$ dépend du temps t mais «qu'il ne varie pas trop vite» (approximation des états quasi-stationnaires).

2.3.2 Actions exercées par un champ extérieur quelconque sur le dipôle

Le torseur des actions exercées par le champ extérieur $\vec{B}_{ext}(M)$ s'écrit *au premier ordre* :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F} = (\vec{M} \cdot \text{grad}) \vec{B}_{ext}(M) \\ \vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}_{ext}(M) \end{array} \right\}$$

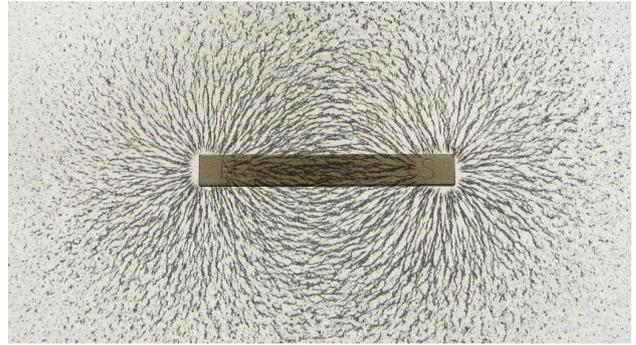
Ces résultats sont admis.

Applications :

1. Comment fonctionne une boussole (指南针)?



2. Matérialisation de lignes de champ magnétique grâce à la limaille de fer (铁屑).



3. Principe de fonctionnement d'un moteur synchrone (同步电机).

On considère N spires carrées de côté a parcourues par un courant I_0 maintenu constant (par un dispositif non explicité) et dont le vecteur normal $\vec{n}(t)$ fait un angle $\beta(t) = \omega' t + \varphi$ avec Ox . Cet ensemble de spires est entraîné en rotation (à la vitesse angulaire ω' que l'on cherche à déterminer) autour de l'axe Oz par un champ magnétique extérieur tournant de norme constante B_0 contenu dans le plan xOy et faisant un angle $\alpha(t) = \omega t$ avec Ox . On n'étudiera pas ici les modalités de la réalisation d'un tel champ.

 Calculer $\langle \vec{\Gamma} \rangle$, valeur moyenne du couple des forces de Laplace appliqué au circuit. Pourquoi appelle-t-on ce dispositif moteur synchrone? Quelle inconvénient ce moteur présente-t-il au démarrage?

