Université Assane SECK de Ziguinchor

UE: Magnétisme et ondes dans le vide (PH2310)

Dipôle Magnétique

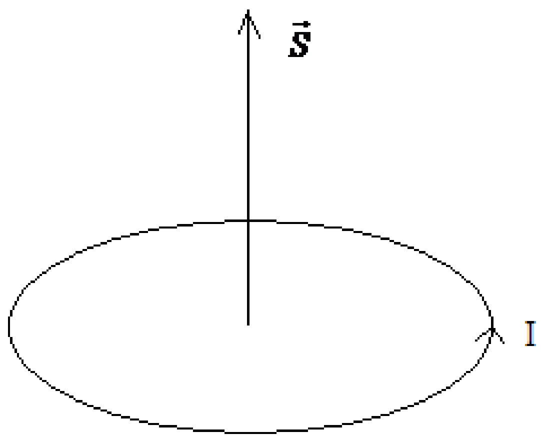
Dr. Ababacar NDIAYE

Enseignant-Chercheur
Département de Physique
UFR Sciences et Technologies

I. Définitions

I.1 Moment magnétique

Soit une boucle circulaire parcourue par un courant I. soit le vecteur surface orienté dont la valeur est la surface intérieure du cercle. La direction et le sens de cette surface sont connus en appliquant la règle du tire-bouchon de Maxwell en fonction du sens du courant dans la boucle.



Le moment magnétique de la spire est alors :

$$\vec{M} = I\,.\vec{S} = I\,.S.\vec{n}$$

L'unité du moment magnétique est l'ampère mètre carré ($A.m^2$) dans le SI. Cette définition reste valable pour toute boucle de courant de forme quelconque.

I.2 Expérience d'Oersted

En 1820, Oersted observe qu'un aimant (une boussole par exemple) est dévié lorsqu'on approche un fil parcouru par un courant continu. D'autre part, l'aimant s'oriente par rapport au fil de façon orthoradiale.
Si on refait la même expérience en remplaçant l'aimant par une spire, les résultats sont identiques.

I.3 Quelques ordres de grandeur de moment magnétique

Suivant l'échelle à laquelle on se place, une large plage d'ordres de grandeur est possible pour les moments magnétiques.

-Au niveau atomique ou nucléaire, les moments magnétiques sont quantifiés par le magnéton de Bohr ou par le magnéton nucléaire qui valent :

Magnéton de Bohr : $$\mu_B = \frac{eh}{2m_e} = \frac{1,6.10^{-19}10^{-34}}{2\times 9,1.10^{-31}} = 9,27.10^{-24}\,A.m^2$$

Correspondant au moment magnétique de l'électron,

Magnéton nucléaire : $$\mu_N = \frac{eh}{2m_P} = \frac{1,6.10^{-19}10^{-34}}{2\times 1,6.10^{-27}} = 5,05.10^{-27}\,A.m^2$$

Correspondant au moment magnétique du proton.

-Pour une boussole, le moment magnétique est de l'ordre de 10 A.m^2.

-Pour la terre qu'on assimile à un dipôle magnétique, le moment magnétique vaut 7,5.10^{22} A.m^2.

I.4 Dipôle 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 aux distances de la distribution aux autres éléments.

On adoptera comme modèle d'un dipôle magnétique une boucle de courant de surface orientée et parcourue par un courant I : cette boucle présente un moment magnétique $\vec{M} = I\,.\vec{S}$

On ne se préoccupera pas forcément de savoir s'il s'agit d'une distribution volumique ou d'une simple « petite » spire.

On s'intéresse dans la suite aux deux aspects suivants :

-Au rôle actif du dipôle magnétique: le dipôle crée un champ magnétique,

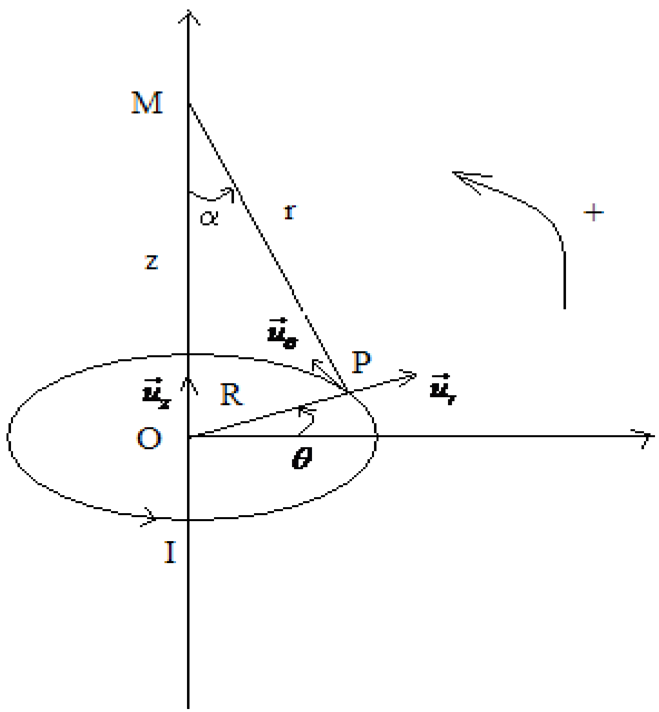
-En complément, au rôle passif du dipôle magnétique: le dipôle subit l'action d'un champ magnétique extérieur.

On garde en mémoire que lors de l'interaction de deux dipôles ces derniers auront à la fois un rôle passif et un rôle actif.

II. Champ magnétique créé par un dipôle magnétique

On commence par étudier le rôle actif du dipôle en déterminant le champ créé par un dipôle magnétique modélisé par une boucle de courant dont on étudie le champ à grande distance. On suppose dans un premier temps que la boucle de courant est circulaire.

II.1 Champ magnétique créé par une boucle de courant



On a établi dans le chapitre précédent que le champ magnétique créé par une spire circulaire le long de son axe s'écrit :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3 \alpha \, \vec{u}_z$$

Pour établir ce résultat, on a établi le fait que la distance du point M où on cherche le champ à n'importe quel point de la distribution est constante.
En revanche, si on se place loin de la spire, on pourra faire un développement limité et établir des résultats approchés pour tout point loin de la spire. On retrouve les mêmes idées que lors de l'étude du dipôle électrostatique: faire un développement limité pour avoir une expression approchée loin de la distribution.

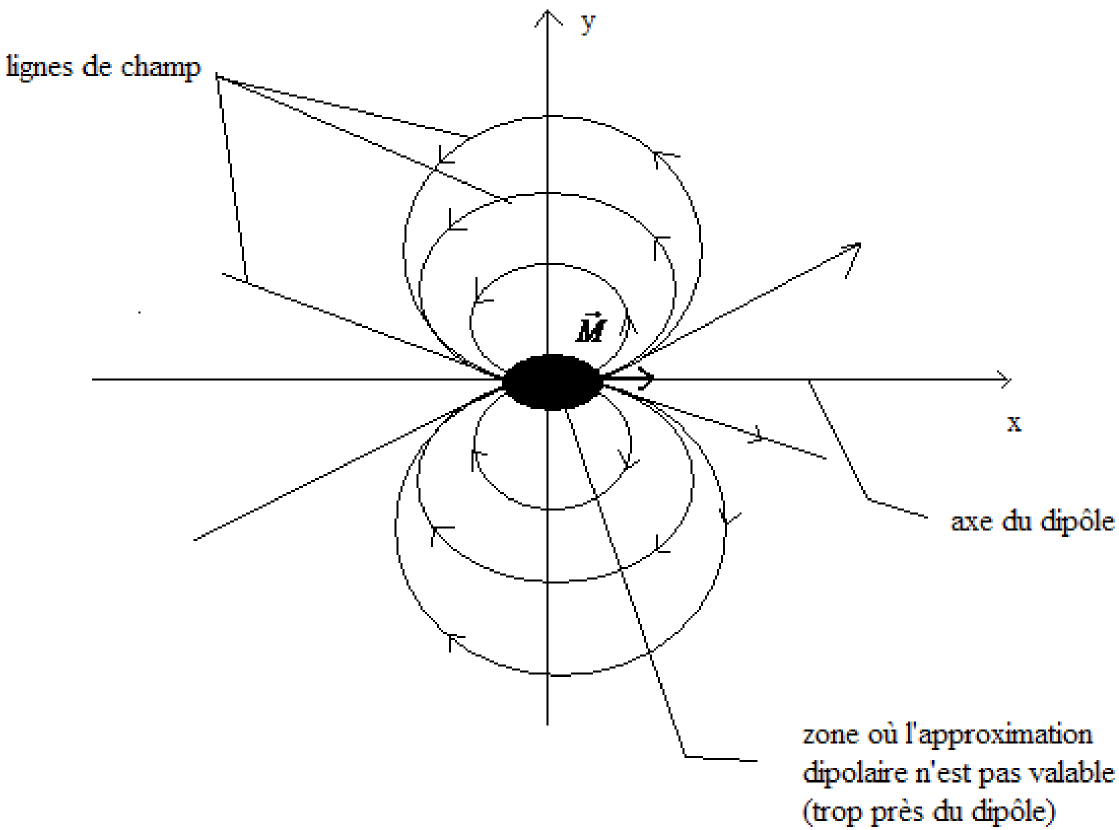
II.2 Topographie du champ loin du dipôle magnétique

On peut déterminer expérimentalement la topographie du champ magnétique loin du dipôle (par exemple avec un aimant et de la limaille de fer permettant de visualiser les lignes de champ).
Expérimentalement on observe que, loin du dipôle, ces lignes de champ sont les mêmes que celles d'un dipôle électrostatique. Or le champ créé en M par un dipôle de moment $\vec{P}$ placé en O s'exprimait par :

$$\vec{E}(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{3\left(\overrightarrow{OM}.\vec{P}\right)\overrightarrow{OM} - OM^2\vec{P}}{OM^5}$$

Par analogie, on a donc formellement la même expression en remplaçant le moment dipolaire $\vec{P}$ par le moment magnétique $\vec{M}$ et la constante $1/\varepsilon_0$ par μ_0.

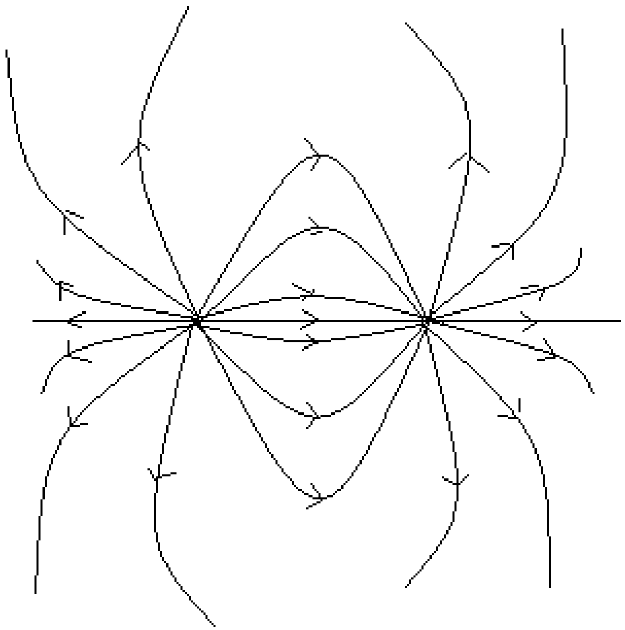
La figure suivante donne l'allure des lignes de champ loin de la spire. Elle est invariante par rotation autour de l'axe du dipôle.



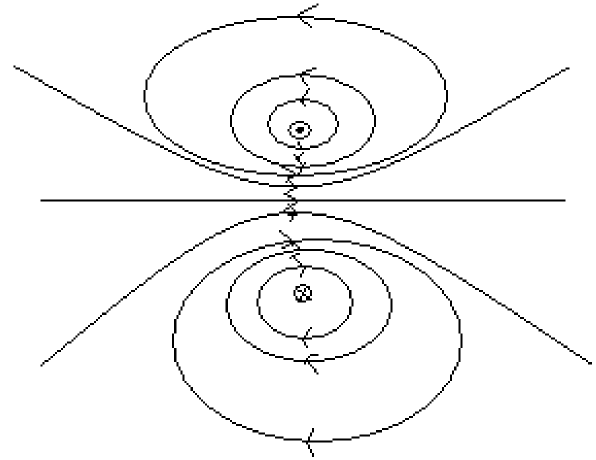
L'analogie ne s'étend pas à ce qui se passe à proximité du dipôle.

En effet, le modèle du dipôle électrique est celui de deux charges opposées: les lignes de champ tournent autour de la spire.

Au voisinage des dipôles, on obtient donc les cartes de champ suivantes:



Dipôle électrostatique



Dipôle magnétique

II.3 Champ magnétique créé par un dipôle magnétique

On note N dans ce paragraphe le point où on détermine le champ créé par le dipôle magnétique. D'après le paragraphe précédent, on a:

$$\vec{B}(N) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{3\left(\overrightarrow{ON}.\vec{M}\right)\overrightarrow{ON} - ON^2\vec{M}}{ON^5}$$

Ou encore dans la base sphérique, l'axe Oz étant celui du dipôle:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} M \left(2\cos\theta\,\vec{u}_r + \sin\theta\,\vec{u}_\theta\right)$$

Ce résultat pourrait s'établir par un développement limité comme annoncé précédemment.

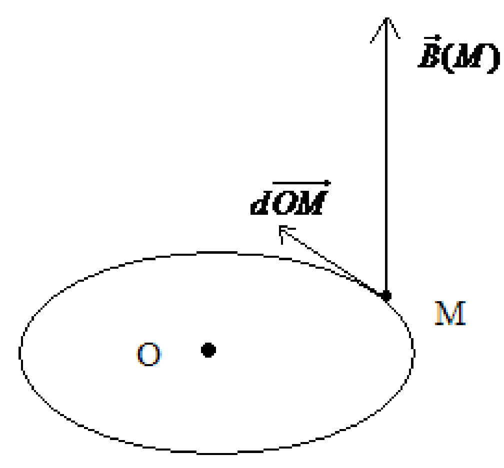
III. Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique

En guise d'approfondissement, on s'intéresse maintenant aux actions subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.

III.1 Résultante exercée sur un dipôle

On part de la force élémentaire de Laplace qui s'exerce sur la boucle de courant:

$$d\vec{F}(M) = I\,d\overrightarrow{OM} \wedge \vec{B}(M)$$



Résultante s'exerçant sur un dipôle

La résultante s'obtient en intégrant sur la boucle:

$$\vec{F} = \oint_{M \in C} I\, d\overrightarrow{OM} \wedge \vec{B}(M)$$

Si le champ est uniforme, on a :

$$\vec{F} = I \left(\oint_{M \in C} d\overrightarrow{OM} \right) \wedge \vec{B}$$

Car le courant I est constant et le champ uniforme. Or $\oint_{M \in C} d\overrightarrow{OM} = \vec{0}$ donc la résultante est nulle. $\vec{F} = \vec{0}$

Remarque

Si le champ n'est pas uniforme, on peut établir pour un dipôle rigide :

$$\vec{F} = \overrightarrow{grad}\left(\vec{M} . \vec{B}\right)$$

III.2 Moment exercé sur un dipôle

On peut établir que le moment qui s'exerce sur un dipôle magnétique placé dans un champ magnétique est : $\vec{\Gamma}(M) = \vec{M} \wedge \vec{B}(M)$

Cette expression est analogue à celle obtenue pour un dipôle électrostatique.

III.3 Energie potentielle d'un dipôle dans un champ magnétique

Par analogie avec le dipôle électrostatique, on obtient l'expression de l'énergie potentielle d'un dipôle dans un champ magnétique :

$$E_P = -\vec{M}.\vec{B}$$

De cette expression, on peut déduire l'expression de la force subie par un dipôle rigide (il n'y a pas de déformation). On a donc :

$$\vec{F} = \overrightarrow{grad}\left(\vec{M}.\vec{B}\right)$$