INDUCTION 1
CHAMP MAGNÉTIQUE ET FORCE DE LAPLACE

Table des matières

L'induction est un phénomène qui couple champs magnétiques variables et courants électriques. Son importance est capitale dans la réalisation d'un très grand nombre d'applications de notre société, de la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs de centrale électrique) à l'utilisation par l'utilisateur final (moteurs électriques, plaques à induction, etc) en passant par le transport d'électricité à très grande tension(transformateurs). Cette partie du programme a pour but de comprendre et de quantifier les phénomènes physiques qui sont mis en jeu.

1 Rappel sur les champs magnétiques

1.1 Propriétés

Un champ magnétique se caractérise par une intensité, une direction et un sens, comme on peut le voir en approchant une boussole d'un aimant. Ce champ est donc décrit par un vecteur $\vec{B}$.

L'unité SI de mesure des champs magnétiques est le tesla, symbole T.

Ordre de grandeur du champ magnétique terrestre (à connaitre !) : 5.10^{-5} T.

Pour une boussole, son pôle nord pointe vers le pôle sud magnétique de la Terre (qui s'appelle quand même pôle sud magnétique, même s'il est situé à proximité du pôle nord géographique).

1.2 Origine

1.2.1 Aimants

Historiquement, les premières sources de champ magnétique viennent de minéraux qui présentent la particularité d'attirer des objets en fer, en particulier la magnétite. Ce sont souvent des minéraux à base de fer, parfois des alliages. Maintenant, on en fabrique de plus en plus compliqués selon les propriétés recherchées.

On définit pole nord et sud comme pour une boussole.

Ordres de grandeur : 10^{-2} T pour les aimants classiques, jusqu'à 1 T pour les aimants néodymes.

1.2.2 Circuits électriques

Mettons une boussole à proximité d'une bobine de fil. Lors de l'alimentation électrique de la bobine, on observe un déplacement de la boussole. Si on inverse la polarité, la boussole s'inverse aussi.

Ainsi, on voit qu'un circuit électrique peut créer des champs magnétiques : c'est le principe des électroaimants. Les ordres de grandeur peuvent aller au Tesla, voire des dizaines de tesla (IRM, bobines supraconductrices LHC ou train maglev)

C'st aussi l'origine du champ magnétique terrestre, une partie du noyau liquide à base de fer crée des courants électriques, eux mêmes à l'origine du champ terrestre (on parle de dynamo auto-entretenue).

A l'échelle microscopie, on peut donc considérer les aimants comme de minuscules boucles de circuits électriques.

1.3 Carte de champs

Si on déplace une boussole autour d'une spire de courant, on voit que la direction ou le sens changent. C'est un peu fastidieux de faire ça en chaque point de l'espace, on utilise donc de la limaille de fer, chaque petit bout agissant comme une boussole. On obtient ainsi ce qu'on appelle une carte de champ magnétique.

Interprétation :

- la direction des particules de limaille de fer donne la direction du champ magnétique ;
- lorsque les lignes de champ se rapprochent, le champ augmente ;
- les lignes ne se croisent jamais, et doivent toujours boucler.

On en déduit que si les lignes de champ sont parallèles, le champ est uniforme : pas de variation de direction (lignes parallèles) ni de norme (pas de variation d'écartement). Exemple : entrefer d'un aimant en U.

1.3.1 Circuits électriques

Comme dans le cas des aimants, pour ces circuits électriques, le champ magnétique doit avoir les mêmes symétries que les causes (principe de Curie).

En particulier, pour un fil infini, symétrie cylindrique, donc le champ magnétique ne dépend que de la distance à l'axe, et est toujours dirigé perpendiculairement au fil (champ orthoradial).

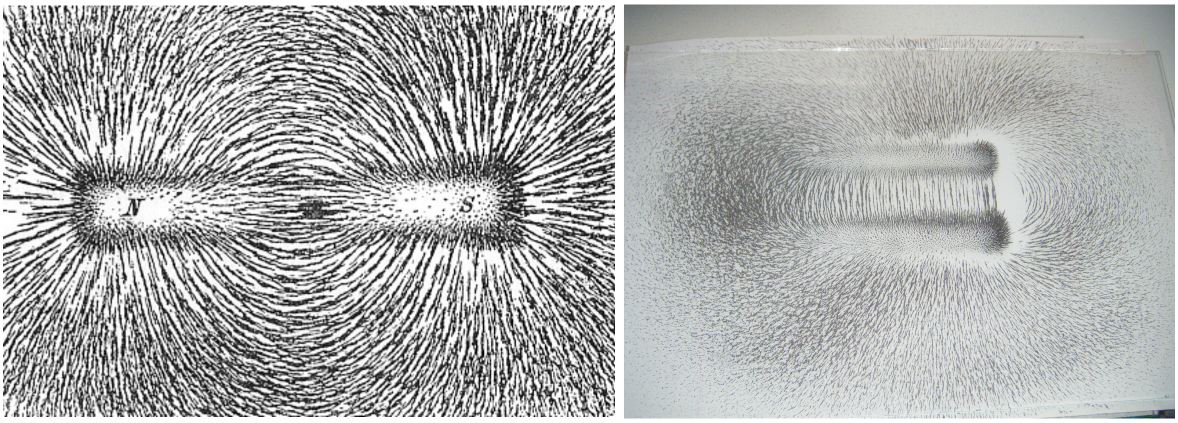

Figure 1 – Cartes de champ magnétique pour un aimant droit (gauche) et un aimant en U (droite)

De même à l'intérieur d'une bobine infinie, le champ est uniforme et le long de la bobine.

Comment déterminer le sens du champ magnétique créé par une boucle de courant ? Règle de la main droite (ou du tire-bouchon, ou du bonhomme d'Ampère, etc) : le champ magnétique est orienté de telle sorte que le courant tourne dans le sens trigonométrique quand on regarde le circuit avec le champ qui pointe vers l'observateur.

1.4 Amplitude du champ magnétique

1.4.1 Circuits électriques

Pour un circuit électrique, on sent bien que plus le courant est grand, plus le champ magnétique sera grand.

Vous verrez en deuxième année que le champ créé par un fil infini le long de l'axe z s'écrit en coordonnées cylindriques $\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{u}_\theta$. Ici μ_0 est la perméttivité magnétique du vide, et vaut $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H.m^{-1} $\simeq 1,3.10^{-6}$ H.m^{-1}.

Exemple : champ magnétique sous une ligne électrique. $I \simeq 1$ kA, $r \simeq 10$ m donc $B \simeq 2.10^{-5}$ T.

De même, on sent bien que si on considère N spires de courants identiques, le champ devrait être proportionnel à N, c'est l'intérêt des bobinages.

A l'intérieur d'un solénoïde infini d'axe z, on montre que le champ est de la forme $\vec{B}(M) = \mu_0 n I \vec{u}_z$ avec n la densité linéique de spires (le nombre d'enroulement par unité de longueur du solénoïde.

Exemple : bobine de TP avec 1000 spires sur 20 cm (donc $n = 5000$ spires/m), parcourue par un courant de 10 mA, on trouve $B \simeq 6.10^{-5}$ T. Les bobinages sont bien plus efficaces pour créer des champs magnétiques !

1.4.2 Aimants

Comment faire le lien entre aimant et champ magnétique, vu qu'il n'y a pas de circulation de courant électrique ?

En fait, on introduit pour les circuits électriques le moment magnétique associé à une spire : $\vec{M} = iS\vec{n}$, où i est l'intensité du courant traversant la spire, S la surface qu'elle délimite et $\vec{n}$ le vecteur unitaire perpendiculaire à la surface orienté selon la règle du tire-bouchon. Si il y a plusieurs spires, on multiplie par le nombre de spires.

On peut alors déterminer le champ magnétique en fonction du moment magnétique. en coordonnées sphériques, à une grande distance de la spire, on a $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3}(2\cos\theta\vec{u}_r + \sin\theta\vec{u}_\theta)$ si l'on prend $\vec{M} = M\vec{u}_z$

Si on fait la carte du champ correspondant, on observe la même chose que pour un aimant droit : on en déduit donc une valeur du moment magnétique des aimants en mesurant le champ le long de l'axe et en inversant la relation pour $\theta = 0$: $M = \frac{2\pi r^3 B}{\mu_0}$.

2 Force de Laplace

2.1 Expérience des rails de Laplace

On vient de voir qu'il y avait un lien fort entre circulation de courant et champ magnétique. Que se passe t'il si l'on fait circuler du courant dans un conducteur en présence d'un champ magnétique ?

Expérimentalement on remarque :

- la force s'exerce perpendiculairement au champ magnétique et au circuit ;
- si l'on retourne l'aimant, la force s'exerce dans le sens opposé ;

- si on change l'intensité du courant, l'intensité de la force change aussi ;
- si on change le sens de circulation du courant, la force change de sens aussi.

2.2 Expression de la force de Laplace

Un élément infinitésimal de longueur dl, parcouru par un courant i dans la direction $d\vec{l}$ et soumis à un champ magnétique extérieur $\vec{B}$ est soumis à une force infinitésimale $d\vec{F}$, appelée **force de Laplace** et dont l'expression est $d\vec{F} = id\vec{l} \wedge \vec{B}$.

Pour un segment de circuit rectiligne MN en champ uniforme, la force de Laplace est $F = iMNB \sin\theta$ avec θ l'angle entre le segment et le champ magnétique et on trouve l'orientation avec la règle des trois doigts (ou du tire-bouchon). Le point d'application est alors le milieu du segment.

Sur l'exemple de l'expérience :

- $i \sim 1$ A, $L \sim 10$ cm, $B \sim 10$ mT donc $F \sim 10^{-3}$ N.
- calcul de la puissance : $P = \vec{F}.\vec{v}$. Conversion énergie électrique $P = Ui$ (attention, pas le U de la batterie...) en énergie mécanique (énergie cinétique de la tige).

2.3 Rotation d'une spire rectangulaire

On considère une spire rectangulaire $MNPQ$ de longueur l (segments MN et PQ) et de largeur b (segments NP et QM), pouvant tourner librement autour de son axe de symétrie longitudinal dirigé selon $\vec{u}_z$. spire est parcourue par un courant i, en présence d'un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire à l'axe de rotation, le long de $\vec{u}_x$. On appelle θ l'angle entre la normale à la spire (orientée par le sens du courant) et $\vec{B}$.

Les 4 segments sont rectilignes et parallèles deux à deux, donc les forces qui s'exercent sur des segments opposés sont de même intensité et de même direction. De plus, les segments opposés ont les courants de sens opposé, donc les forces sont de sens opposés. On en déduit donc que la résultante des forces est nulle.

Calculons maintenant le moment des forces de Laplace par rapport à l'axe de rotation. La force de Laplace appliquée aux segments horizontaux a son point d'application sur l'axe, donc le bras de levier, et donc le moment est nul.

Les deux autres segments subissent une force d'intensité $F = ilB$, dirigé selon la normale à la spire. Le bras de levier est $b/2|\sin\theta|$. Le couple exercé sur la spire est donc $\mathcal{M} = ilBb\sin\theta$.

Remarques :

- couple nul en $\theta = 0$ ou π. Pas grave, l'inertie permet de passer ces points.
- Couple change de signe en ces points : pas de mouvement tournant ! Solution : système de balais et de collecteur pour changer le signe de i à ces points-là et créer une machine à courant continu.

2.4 Rotation d'une boussole

On utilise à nouveau l'analogie entre circuits électriques et aimant en introduisant le moment magnétique $\vec{M} = iS\vec{n}$.

Le moment exercé sur la spire précédente est donc $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$.

Conséquence : à l'équilibre, $\vec{\Gamma} = \vec{0}$, donc le moment et le champ magnétiques sont alignés. On se place juste à côté des deux postions d'équilibre, et l'on voit que seule la position où les deux vecteurs ont en plus le même sens est stable.

Si on généralise aux aimants, on obtient la même chose : donc si un aimant peut trouner librement, il va s'aligner dans la même direction et le même sens que le champ magnétique : c'est le principe de fonctionnement de la boussole.

Toute cette étude a été faite avec un champ magnétique constant, mais si le champ tourne, alors l'aimant va constamment s'aligner sur le champ, et donc tourner lui aussi : principe de fonctionnement du moteur synchrone.