

Université Ibn Tofail
Ecole nationale des Sciences Appliquées – Kénitra

Cycle Intégré Préparatoire aux Formations d'Ingénieurs

**Electromagnétisme et
Electrocinétique des courants
alternatifs**

Hassan Mharzi

Université Ibn Tofail ENSAR – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi

Déroulement des séances

- **Séances de 2h00**
 - Cours: 1 fois par semaine
 - TD (Exercices): 1 fois par semaine
- **Avant de venir en cours, il faut**
 - Avoir vu et télécharger les figures du cours sur le site: (<http://ead.uit.ac.ma/>)
 - Avoir les notes des cours précédents.
 - Poser autant de questions que vous le voulez.
- **Avant de venir en TD, il faut**
 - Amener obligatoirement les notes de cours en séance de TD.
 - Avoir lu la partie du cours utile pour traiter les exercices
 - Les exercices doivent être préparés par écrit. **Rédiger au moins 2** exercices que le professeur de TD vérifiera au début de chaque séance.
 - Une note sera donnée à chaque étudiant sur la participation, la présence et la discipline. Cette note interviendra lors de la délibération finale.

Université Ibn Tofail ENSAR – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi



L'électromagnétisme: Étude de l'influence d'un champ magnétique sur des distributions de charges électriques mobiles

Université Ibn Tofail ENSAR – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi

Plan du cours

- **Chapitre 1** : Le champ magnétique
- **Chapitre 2** : Lois fondamentales de la magnétostatique – Théorème d'Ampère
- **Chapitre 3** : Actions et énergie magnétiques
- **Chapitre 4** : Induction électromagnétique
- **Chapitre 5** : Circuits en courant alternatif

Université Ibn Tofail ENSAR – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi

Chapitre 1: Le champ magnétique

- 1.1 Introduction
- 1.2 Les aimants sources de champ magnétique
- 1.3 Expression du champ magnétique
 - 1.3.1. Nature des effets magnétiques
 - 1.3.2. Champ créé par une charge en mouvement
 - 1.3.3. Champ créé par un ensemble de charges en mouvement
 - 1.3.4. Champ créé par un circuit électrique (Loi de Biot et Savart)
 - 1.3.5 Propriétés de symétrie du champ magnétique
- 1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples
 - 1.4.1. Fil rectiligne
 - 1.4.2. Spire circulaire (sur l'axe)
 - 1.4.3. Solénoïde (sur l'axe)

Université Ibn Tofail ENSAR – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi

**Chapitre 1.
Champ Magnétique**



Hans Christian Oersted: 1777-1851
physicien et chimiste danois

En 1820, Oersted montre qu'un courant dévie l'aiguille d'une boussole: l'électricité et le magnétisme sont liés.

Université Ibn Tofail ENSAR – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi

1.1. Introduction

1.1.1. Le magnétisme : qu'est ce que c'est ?

- Magnétisme : « *ensemble des phénomènes que présentent les matériaux aimantés* », Dictionnaire Larousse
- Historique :
 - Depuis l'antiquité dans l'ancienne cité d'Asie **Magnésia** (Turquie): des pierres attirent le fer .
 - An 1000 : invention du poisson-montre-sud en Chine: poisson en fer aimanté, flottant sur une eau calme.
 - 1820 : **Oersted** relie le **courant** au champ magnétique



1.1. Introduction : bref historique

Les aimants sont connus depuis l'Antiquité, sous le nom de magnétite, pierre trouvée à proximité de la ville de **Magnesia** (Turquie). C'est de cette pierre que provient le nom actuel de champ magnétique.

Les chinois furent les premiers à utiliser les propriétés des aimants, il y a plus de 1000 ans, pour faire des boussoles. Elles étaient constituées d'une aiguille de magnétite posée sur de la paille flottant sur de l'eau contenue dans un récipient gradué.

Au XVIIIème siècle, **Franklin** découvre la nature électrique de la foudre (1752). Or, il y avait déjà à cette époque de nombreux témoignages de marins attirant l'attention sur des faits étranges:

- Les orages perturbent les boussoles
- La foudre frappant un navire aimante tous les objets métalliques.

1.1. Introduction : bref historique

Franklin en déduit « *la possibilité d'une communauté de nature entre les phénomènes électriques et magnétiques* ».

Coulomb (1785) montre la décroissance en $1/r^2$ des deux forces.

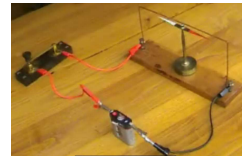
Mais il faut attendre la fin du XIXème siècle pour qu'une théorie complète apparaisse, la théorie de l'électromagnétisme.

Tout commença avec l'expérience de **Oersted** en 1820. Il plaça un fil conducteur au dessus d'une boussole et y fit passer un courant. En présence d'un courant l'aiguille de la boussole est effectivement déviée, prouvant sans ambiguïté un lien entre le courant électrique et le champ magnétique. Par ailleurs, il observa :

- Si on inverse le sens du courant, la déviation change de sens.
- La force qui dévie l'aiguille est non radiale.

1.1. Introduction

1.1.2. Expérience d'Oersted

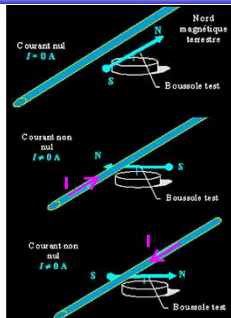


Vidéo1_exp_oersted

Le magnétisme est une manifestation des charges électriques en mouvement.

<http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/oersted/video/oersted.php>

1.1. Introduction



1.1.2. Expérience d'Oersted

Le courant électrique crée une **force magnétique** dans son environnement

- L'aiguille tend à se placer **Perpendiculairement** au fil
- Si on change le sens du courant: La boussole pointe dans l'autre direction
- Le champ magnétique crée dépend de l'**intensité** et du **sens** du courant

1.1. Introduction : bref historique

L'étude quantitative des interactions entre aimants et courants fut faite par les physiciens **Biot et Savart** (1820). Ils mesurèrent la durée des oscillations d'une aiguille aimantée en fonction de sa distance à un courant rectiligne. Ils trouvèrent que la force agissant sur un pôle est dirigée perpendiculairement à la direction reliant ce pôle au conducteur et qu'elle varie en raison inverse de la distance. De ces expériences, Laplace déduisit ce qu'on appelle aujourd'hui la loi de Biot et Savart. Une question qui s'est ensuite immédiatement posée fut :

Si un courant dévie un aimant, alors est-ce qu'un aimant peut faire dévier un courant ?

Ceci fut effectivement prouvé par **Davy** en 1821 dans une expérience où il montra qu'un arc électrique était dévié dans l'entrefer d'un gros aimant.


1.1. Introduction : bref historique

L'élaboration de la théorie électromagnétique mit en jeu un grand nombre de physiciens de renom : **Oersted, Ampère, Arago, Faraday, Foucault, Henry, Lenz, Maxwell, Weber, Helmholtz, Hertz, Lorentz** et bien d'autres. Si elle débuta en 1820 avec Oersted, elle ne fut mise en équations par **Maxwell** qu'en 1873 et ne trouva d'explication satisfaisante qu'en 1905, dans le cadre de la théorie de la relativité d'**Einstein**.

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 13

1.1. Introduction

1.1.3. Nombreuses applications



La boussole

L'aimant

Le tube cathodique

Le disque dur

La carte bancaire

L'IRM

Le train

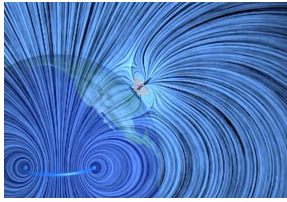
La sustension magnétique

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 14

1.1. Introduction

1.1.4. Le magnétisme et la nature

La Terre est un **énorme aimant** : champ magnétique terrestre



Une énorme boussole dont l'aiguille peut osciller sans amortissement dans un plan vertical à la surface de la terre.

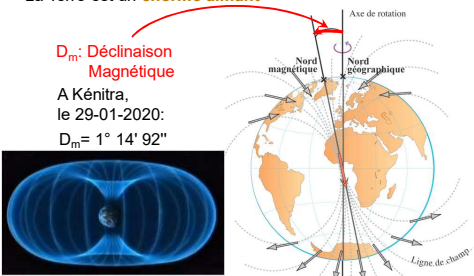
<http://www.web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/magnetostatics/EarthandDipNeedle/EarthFar.htm>

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 15

1.1. Introduction

1.1.4. Le magnétisme et la nature

La Terre est un **énorme aimant**



D_m : Déclinaison Magnétique

A Kénitra, le 29-01-2020:
 $D_m = 1^\circ 14' 92''$

Axe de rotation

Nord magnétique

Nord géographique

Ligne de champ

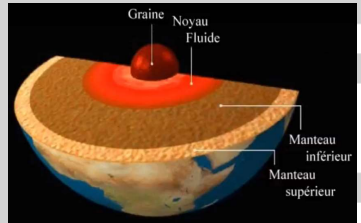
Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 16

1.1. Introduction

1.1.4. Le magnétisme et la nature

- La Terre est un **énorme aimant**
 - Origine: \Rightarrow mouvement de la matière qui entoure le cœur central.

mouvements de fer liquide conducteur dans le noyau



Graine

Noyau Fluide

Manteau inférieur

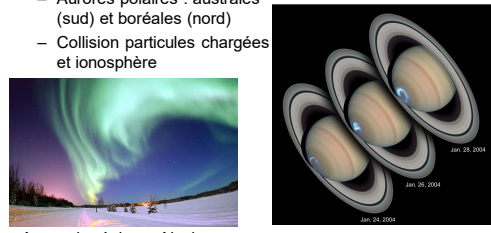
Manteau supérieur

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 17

1.1. Introduction

1.1.4. Le magnétisme et la nature

- Manifestation :
 - Aurores polaires : australes (sud) et boréales (nord)
 - Collision particules chargées et ionosphère



Aurore boréale en Alaska

Aurore de Saturne

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 18

1.1. Introduction

1.1.4. Le magnétisme et la nature



L'ionosphère et ses aurores boréales

Action du vent solaire sur les lignes du champ terrestre

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 19

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.1. Introduction

On a vu comment une tige de plastique chargée produisait un champ vectoriel \vec{E} – le **champ électrique** – en tout point dans l'espace qui l'entoure.

De la même façon, un aimant produit un champ vectoriel \vec{B} – le **champ magnétique** – en tout point dans l'espace qui l'entoure.

On distingue deux types de sources de champ magnétique:


- la matière aimantée: **les aimants**,
- les **circuits électriques** parcourus par **des courants**

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 20

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.2. Caractéristiques des aimants

- Champ magnétique \leftrightarrow Force
- Observation :
 - Un aimant et de la limaille de fer
 - On observe une orientation
 - Lignes d'une extrémité vers l'autre
- Que dire des extrémités ?
 - Les lignes y sont plus proches
 - L'aimantation est maximale
 - Ce sont les **Pôles** de l'aimant

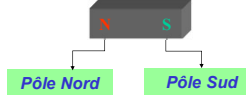


Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 21


1.2 Les aimants sources de champ magnétique


1.2.2. Caractéristiques des aimants

Un aimant est caractérisé par un pôle nord et un pôle sud.



Expérience de l'aimant brisé

Briser un aimant  Deux aimants

Briser encore  Trois aimants

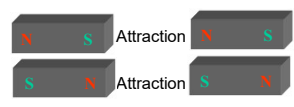
Les pôles Nord et Sud d'un aimant sont inséparables. Pas de monopôle.

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 22

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

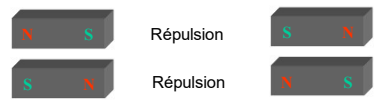
1.2.3. Action d'un aimant sur un autre aimant

Deux pôles de nature différente s'attirent



Attraction

Deux pôles de même nature se repoussent



Répulsion

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 23

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.4. Champs magnétique crée par un aimant

Action à distance : chaque aimant établit un champ magnétique dans l'espace qui l'entoure



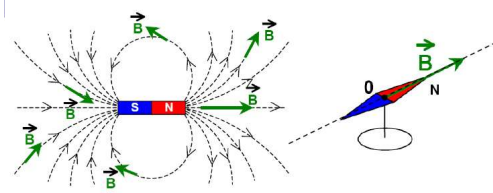
Sens du champ: du pôle sud vers le pôle nord de l'aiguille

Lignes de champ entrent par le pôle sud et sortent par le pôle nord.

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 24

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.5. Lignes de champ du champ magnétique créé par un aimant



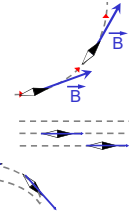
1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.6. Caractéristiques des lignes de champ

Les **lignes de champ** permettent de visualiser le champ magnétique

Définition:

- lignes **tangentes** en chacun de ses points au vecteur \vec{B}
- orientées dans le sens de \vec{B}
- si le champ est uniforme les lignes sont **parallèles**
- quand le champ augmente les lignes se **resserrent**
- deux lignes de champ ne peuvent se **couper**



1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.7. Exemple d'interaction entre aimants: Trains à lévitation magnétique par électro-aimants

Dans les années 1960 débutent les études des trains, appelés **Maglev (MAGnetic LEVitation train)**

- Ils
- * flottent grâce à la présence d'un champ magnétique
 - * sont propulsés par la force de champs magnétiques
 - * sont ultrarapides (vitesses \rightarrow 550 km/h)
 - * en utilisant une quantité d'énergie minime
 - * sont plus écologiques
- Mais
- * leur coût de construction est très élevé

- Ce moyen de transport encore en cours de développement est un engin très rapide qui néglige toute force de friction.

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.7. Exemple d'interaction entre aimants: Trains à lévitation magnétique par électro-aimants

Les **Chinois** sont les premiers à inaugurer, en janvier 2003, un train à grande vitesse commercial qu'on appelle **Maglev ou Transrapid**. Ce train, fabriqué par une **compagnie allemande**, relie le centre-ville de Shanghai à l'aéroport. Il effectue ce trajet d'environ 30 kilomètres en sept minutes seulement.

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

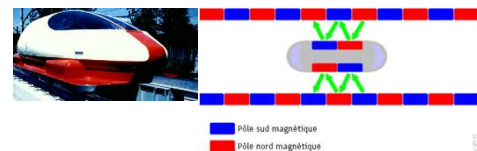
1.2.7. Exemple d'interaction entre aimants: Trains à lévitation magnétique par électro-aimants

Principe de fonctionnement : deux pôles magnétiques semblables se repoussent tandis que deux pôles magnétiques contraires s'attirent. Sur la base du train, des électroaimants sont installés pour lui permettre de flotter au-dessus des rails métalliques à une distance d'environ 1 cm. Ainsi, le train peut flotter, même s'il n'est pas en mouvement. Pour avancer, des électroaimants sont placés de manière à ce qu'on retrouve sur le côté du train une succession de pôles magnétiques alternés (NSNS...). Les électroaimants sur les rails sont placés de la même manière. Les pôles Nord du train sont alors attirés par les pôles Sud et repoussés par les pôles Nord des rails. Si on inverse le sens du courant qui parcourt les électroaimants des rails, on inverse aussi la polarisation de tous les électroaimants. Les électroaimants à bord du train sont alors attirés vers des électroaimants des rails qui se trouvent un peu plus loin, et le train se déplace. On peut donc propulser le train en faisant parcourir un courant alternatif dans les électroaimants des rails.

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

1.2.7. Exemple d'interaction entre aimants: Trains à lévitation magnétique par électro-aimants

Trains **Maglev (MAGnetic LEVitation train)**



Le principe de propulsion du Maglev

<http://www2.fsg.ulaval.ca/opus/scphys4/complements/maglev.shtml>

1.2 Les aimants sources de champ magnétique

Trains à lévitation magnétique supraconductrice



Maglev japonais

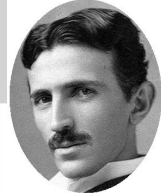
le modèle MLX 01 : avec cinq wagons, bat tous les records... 562 km/h

principe utilise la force de répulsion existant entre les aimants supraconducteurs du véhicule et des bandes ou bobines conductrices situées dans le rail de guidage. Ces aimants sont faits d'un alliage de niobium et de titane. Chacun d'eux est maintenu à une température constante de -269°C ! Cela permet aux deux aimants de conserver leur état de supraconducteur donc de n'opposer aucune résistance au passage du courant électrique.

<http://newgentransp.e-monsite.com/pages/transport-ferroviaires/train-a-levitation-magnetique.html>

Université Ibn Tofail ENSAK - Cycle préparatoire - Electromagnétisme - Hassan Mharzi 31

1.3 Expression du champ magnétique



Nikola Tesla (1856 - 1943), est un inventeur et ingénieur américain d'origine serbe (Croatie), ayant principalement œuvré dans le domaine de l'électricité.

Université Ibn Tofail ENSAK - Cycle préparatoire - Electromagnétisme - Hassan Mharzi 32

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.1. Nature des effets magnétiques

Jusqu'à présent nous n'avons abordé que des particules chargées **immobiles**. Que se passe-t-il lorsqu'on considère des particules en **mouvement** ? Soient deux particules q_1 et q_2 situées à un instant t aux points M_1 et M_2 .

En l'absence de mouvement, la particule q_1 crée au point M_2 un champ électrostatique :

$$\vec{E}_1(M_2)$$

et la particule q_2 subit une force dont l'expression est donnée par la loi de **Coulomb** :

$$\vec{F}_{1/2} = q_2 \vec{E}_1(M_2)$$

Université Ibn Tofail ENSAK - Cycle préparatoire - Electromagnétisme - Hassan Mharzi 33

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.1. Nature des effets magnétiques

Lorsque les deux charges sont en **mouvement**, la trajectoire de q_2 ne peut pas être expliquée par la seule force de Coulomb, il y a apparition d'une force supplémentaire: **force magnétique**.

$$\vec{F}_{1/2} = q_2 \cdot \vec{v}_2 \wedge \vec{B}_1$$

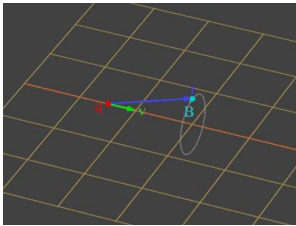
\vec{B}_1 : est le champ magnétique créé par q_1 .
 \vec{v}_2 : est la vitesse de la charge q_2 .

Nous reviendrons plus tard (**chapitre 3**) sur l'expression et les propriétés de la force magnétique.

Université Ibn Tofail ENSAK - Cycle préparatoire - Electromagnétisme - Hassan Mharzi 34

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.2. Champ magnétique créé par une charge en mouvement (Vidéo2_champ_charge_mvmt)



http://phys23p.slpso.edu/phys_anim/EM/indexer_EM.html

Université Ibn Tofail ENSAK - Cycle préparatoire - Electromagnétisme - Hassan Mharzi 35

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.2. Champ magnétique créé par une charge en mouvement

De la même manière que le champ électrostatique, le **champ magnétique** créé en un point M par une particule \vec{q} de charge q située en un point P et animée d'une vitesse \vec{V} est :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot \vec{v} \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}$$

Le facteur μ_0 est la **perméabilité du vide** : il décrit la capacité du vide à « laisser passer » le champ magnétique. Sa valeur dans le système d'unités international est :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ S.I}$$

Université Ibn Tofail ENSAK - Cycle préparatoire - Electromagnétisme - Hassan Mharzi 36

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.2. Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Remarques :

- Cette valeur est liée à la définition de l'Ampère (voir plus tard dans le **Chapitre 3**).
- Les phénomènes électriques et magnétiques sont liés:

$$\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 = 1$$


Représentation du vecteur champ magnétique

direction **Aiguille aimantée**

sens **Aiguille orientée Sud - Nord**

unité Système International → **Tesla (T)**

On utilise aussi le Gauss (G) avec 1 Gauss = 10⁻⁴ Tesla



Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 37

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.2. Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Propriété :

De même que pour le champ électrostatique, le **principe de superposition** s'applique au champ magnétique.

Quelques ordres de grandeur :

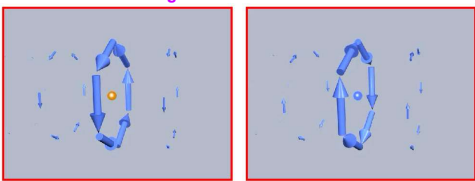
- Un aimant courant $B \approx 10 \text{ mT}$
- Un électroaimant ordinaire $B \approx 1 \text{ Tesla}$
- Une bobine supraconductrice $B \approx 20 \text{ Tesla}$
- Une bobine résistive $B \approx$ de 30 à 1000 Tesla
- Champ magnétique terrestre : $B \approx 20 \mu\text{T}$

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 38

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.2. Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Mouvement rectiligne:



Champ créée par une charge (+) Champ créée par une charge (-)

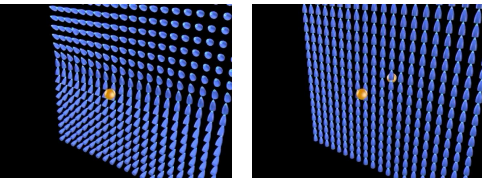
<http://www.web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/magnetostatics/MovingChargePosMag/MovingChargePosMag.htm>

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 39

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.2. Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Mouvement circulaire:



Une charge en mouvement Deux charges en mouvement

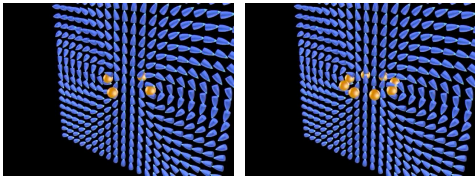
<http://www.web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/magnetostatics/MovingChargePosMag/MovingChargePosMag.htm>

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 40

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.2. Champ magnétique créé par une charge en mouvement

Mouvement circulaire:



Quatre charges en mouvement Huit charges en mouvement

<http://www.web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/magnetostatics/MovingChargePosMag/MovingChargePosMag.htm>

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 41

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.3. Champ magnétique créé par un ensemble de charges en mouvement

En utilisant le **principe de superposition**, le champ magnétique créé en un point M par des particules de charge q_i situés en des point P_i et de vitesse \vec{v}_i est :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{q_i \cdot \vec{v}_i \wedge \overrightarrow{P_i M}}{\|\overrightarrow{P_i M}\|^3}$$

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 42

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.3. Champ magnétique créée par un ensemble de charges en mouvement

Dans le cas d'une distribution volumique continue, on considère un élément de volume dV , situé autour d'un point P contenant une charge élémentaire dq animée d'une vitesse moyenne \vec{v} . Le champ magnétique résultant s'écrit:

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{(V)} \frac{dq \cdot \vec{v}(P) \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}$$

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.3. Champ magnétique créée par un ensemble de charges en mouvement

On reconnaît ainsi l'expression générale du vecteur densité de courant (voir Cours d'Électricité) :

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v} = \frac{dq}{dV} \cdot \vec{v} \implies \vec{j}(P) \cdot dV = dq \cdot \vec{v}(P)$$

L'expression du champ magnétique créé par une distribution de courant quelconque est donc:

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j}(P) \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3} dV$$

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ créée par un circuit électrique: Loi de Biot et Savart



La loi de Biot et Savart, nommée en l'honneur des physiciens français Jean-Baptiste Biot et Félix Savart, datant de 1820, donne le champ magnétique créé par une distribution de courants continus. Elle constitue l'une des lois fondamentales de la magnétostatique, au même titre que la loi de Coulomb pour l'électrostatique.

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ créée par un circuit électrique: Loi de Biot et Savart

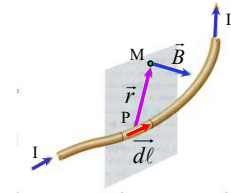
Soit un conducteur filiforme

Soit un élément infiniment petit $d\vec{\ell}$ parcouru par un courant I

Soit P le point milieu de $d\vec{\ell}$

On veut déterminer le champ magnétique créé au point M .

$$\vec{PM} = \vec{r}$$

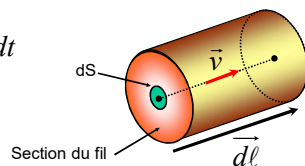


1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ créée par un circuit électrique: Loi de Biot et Savart

On considère un élément de longueur du fil $d\vec{\ell}$. Dans ce cas, le volume élémentaire s'écrit: $dV = dS \cdot d\ell$. Où dS est un élément de surface de la section du fil.

$$d\vec{\ell} = \vec{v} \cdot dt$$



1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ créée par un circuit électrique: Loi de Biot et Savart

Le vecteur vitesse (ou densité de courant) a la même orientation sur toute la section du fil (\vec{j} parallèle à $d\vec{\ell}$ et à $d\vec{S}$).

$$\text{Ainsi, on écrit: } \vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j} \wedge \vec{r}}{r^3} dV$$

$$\text{Avec: } r = \|\vec{PM}\| = \|\vec{r}\|$$

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j} \wedge \vec{r}}{r^3} dS \cdot d\vec{\ell}$$

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ crée par un circuit électrique:
Loi de Biot et Savart

$$\begin{aligned}\vec{B}(M) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j} \wedge \vec{r}}{r^3} dS d\ell \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j} dS d\ell \wedge \vec{r}}{r^3} \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{(fil)} \int_{(Section)} \frac{(\vec{j} \cdot d\vec{S}) d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3}\end{aligned}$$

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ crée par un circuit électrique:
Loi de Biot et Savart

$$\begin{aligned}\vec{B}(M) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{(fil)} \frac{\iint_{(Section)} (\vec{j} \cdot d\vec{S}) d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3} \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{(fil)} \frac{I d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3} \\ \Rightarrow \vec{B}(M) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{(fil)} \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3}\end{aligned}$$

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ crée par un circuit électrique:
Loi de Biot et Savart

Loi de Biot et Savart : Le champ magnétique créé en un point M de l'espace par un circuit parcouru par un courant permanent I est:

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{(fil)} \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

$$\text{où } d\vec{\ell} = d\overrightarrow{OP} \quad r = \|\overrightarrow{PM}\| = \|\vec{r}\|$$

P est un point quelconque le long du circuit,

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ crée par un circuit électrique:
Loi de Biot et Savart

Le champ $d\vec{B}$ est défini par un produit vectoriel. Il faut donc faire extrêmement attention à l'orientation des circuits.

$$d\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

Voici quelques règles pour déterminer le sens du champ:

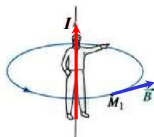
- Règle de la main droite
- Règle du tire-bouchon
- Règle du bonhomme d'Ampère

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ crée par un circuit électrique:
Loi de Biot et Savart

Règle du Bonhomme d'Ampère

Un observateur est disposé le long du conducteur de façon que le **courant** électrique circule de ses **pieds vers sa tête**. Il regarde un point M de l'espace. En ce point le **champ** magnétique est orienté vers sa **gauche**.

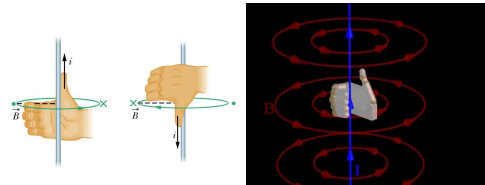


1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ crée par un circuit électrique:
Loi de Biot et Savart

Règle de la main droite (Vidéo3_regle_main_droite_fil)

Lorsque les **doigts enroulent** le fil dans le **sens du champ** magnétique, le **pouce** indique le sens du courant.



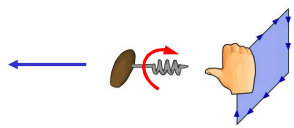
http://phys23p.slpasu.edu/phys_anim/EM/indexer_EM.html

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.4. Champ créée par un circuit électrique: Loi de Biot et Savart

Règle du tire-bouchon (de Maxwell)

Pour progresser dans le **sens du champ**, un tire-bouchon doit **tourner dans le sens du courant**.



<http://www.edumedia-sciences.com/fr/a199-regle-du-tire-bouchon>

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 53

1.3 Expression du champ magnétique

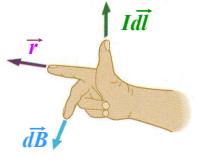
1.3.4. Champ créée par un circuit électrique: Loi de Biot et Savart

Rappels sur le produit vectoriel

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

\vec{dB} , $d\vec{\ell}$ et \vec{r} forment un **trièdre direct**

– Pour cela on peut s'aider des trois doigts de la **main droite**

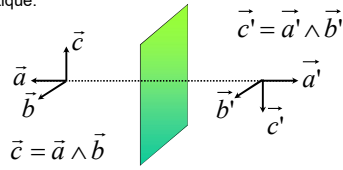


Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 54

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.5. Propriétés de symétrie du champ magnétique

- Les propriétés de symétrie permettent de **simplifier** le calcul du champ magnétique.
- Ainsi, si l'on connaît les propriétés de symétrie de la densité de courant, on pourra connaître celles du champ magnétique.



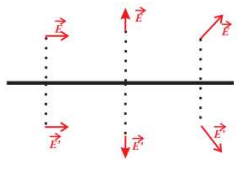
Transformation par rapport à un plan de symétrie

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 57

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.5. Propriétés de symétrie du champ magnétique

- Un vecteur (par exemple \vec{E}) est transformé en son symétrique,
- Un pseudo-vecteur (par exemple \vec{B}) est transformé en l'opposé du symétrique.



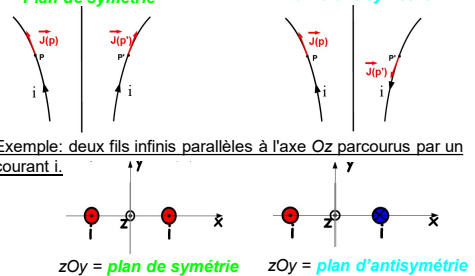
Transformation par rapport à un plan de symétrie

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 58

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.5. Propriétés de symétrie du champ magnétique

Plan de symétrie **Plan d'antisymétrie**



Exemple: deux fils infinis parallèles à l'axe Oz parcourus par un courant i .

$zOy = \text{plan de symétrie}$ $zOy' = \text{plan d'antisymétrie}$

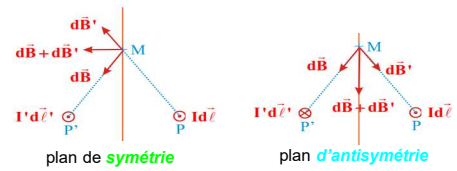
Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 59

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.5. Propriétés de symétrie du champ magnétique

Règles de symétrie et d'invariance

- Le vecteur \vec{B} est **orthogonal** à tout plan de **symétrie** du système.
- Le vecteur \vec{B} **appartient** à tout plan **d'antisymétrie** du système.



plan de **symétrie** plan **d'antisymétrie**

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 60

1.3 Expression du champ magnétique

1.3.5. Propriétés de symétrie du champ magnétique

Règles de symétrie et d'invariance

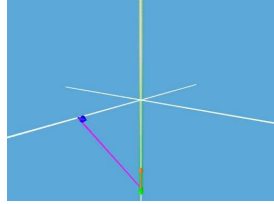
- Si le système est invariant par **translation** selon un axe Oz, alors l'intensité **B** du champ magnétique ne **dépend pas** de z
- Si le système est invariant par **rotation** d'angle θ , alors l'intensité **B** du champ magnétique ne **dépend pas** de θ

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 61

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.1 Champ d'un fil rectiligne infiniment long:

Vidéo4_champ_elem_fil



Champ magnétique créée par un élément de longueur d'un fil rectiligne

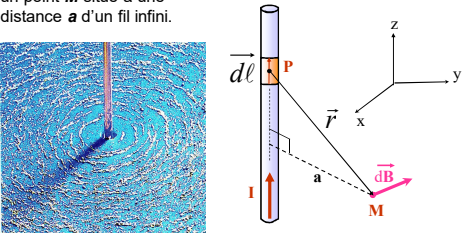
http://phys23p.slsu.edu/phys_anim/EM/indexer_EM.html

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 62

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.1 Champ d'un fil rectiligne infiniment long:

Champ magnétique créé en un point **M** situé à une distance **a** d'un fil infini.

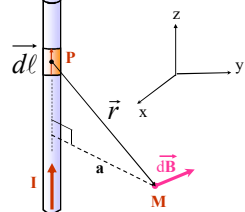


Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 63

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.1 Champ d'un fil rectiligne infiniment long:

Le module du champ créé au point **M** situé à une distance **a** d'un fil infini.

$$\|\vec{B}\| = B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$



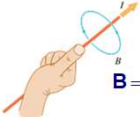
Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 64

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.1 Champ d'un fil rectiligne infiniment long

Exemple: Bus électrique

Ligne rectiligne de 100A dirigé vers l'est à 10 m au dessus du sol. Calculer le champ magnétique au niveau du sol ?

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A})(100 \text{ A})}{2\pi(10 \text{ m})} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ T}$$


Règle de la main droite: \vec{B} dirigé vers le nord sous la ligne

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 65

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.2 Champ d'une spire circulaire :

Vidéo5_champ_elem_spire



Champ magnétique créée par un élément de longueur d'une spire

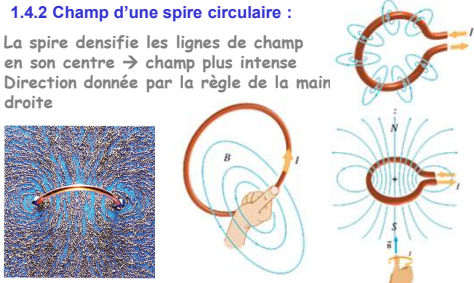
http://phys23p.slsu.edu/phys_anim/EM/indexer_EM.html

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 66

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.2 Champ d'une spire circulaire :

- La spire densifie les lignes de champ en son centre → champ plus intense
- Direction donnée par la règle de la main droite



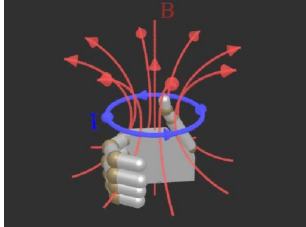
Autre règle de la main droite

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 67

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.2 Champ d'une spire circulaire :

Règle de la main droite (Vidéo6_regle_main_droite_spire) :



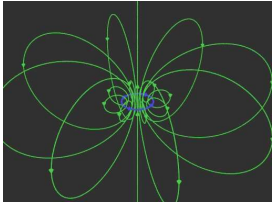
http://phys23p.slp.u.edu/phys_anim/EM/indexer_EM.html

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 68

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.2 Champ d'une spire circulaire :

Les lignes de champ:



http://phys23p.slp.u.edu/phys_anim/EM/indexer_EM.html

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 69

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.4 Champ des Solénoïdes :

- Solénoïde: fil conducteur enroulé sous forme d'hélice

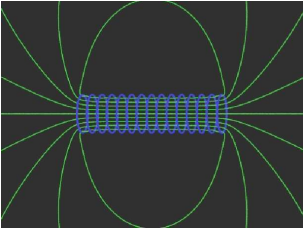


Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 70

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.4 Champ des Solénoïdes :

Les lignes de champ:



http://phys23p.slp.u.edu/phys_anim/EM/indexer_EM.html

Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 71

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.4 Champ des Solénoïdes :

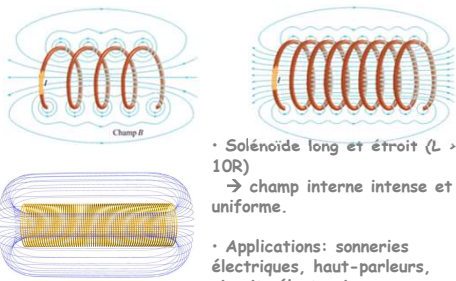
Les lignes de champ:



Université Ibn Tofail ENSAK – Cycle préparatoire – Electromagnétisme – Hassan Mharzi 72

1.4 Calcul du champ dans quelques cas simples

1.4.4 Champ des Solénoïdes :



1.5 Conclusion

Ce qu'il faut retenir du chapitre 1



- Le champ magnétique est une **grandeur vectorielle** notée \vec{B} et exprimée en **Tesla (T)**.
- Un circuit parcouru par un **courant électrique** est une **source de champ magnétique**.
- Le champ magnétique crée est calculé par :
 - La loi de **Biot & Savart** (**sens, direction, intensité**)
 - **Chapitre 2**: Le théorème d'**Ampère** (**intensité seulement**)
- On utilise les **règles de symétries** pour simplifier le calcul.

Chapitre 1: Champ magnétique

FIN DU CHAPITRE 1