

M4.1 : Champs électriques et magnétiques

Table des matières

1	Forces centrales conservatives	2
1.1	Force de gravitation	2
1.2	Force électrostatique	3
1.3	Comparaison de ces deux forces	3
2	Champ, potentiel et énergie potentielle électrostatique	4
2.1	Le champ électrique	4
2.2	Le potentiel électrostatique	5
2.3	Énergie potentielle électrostatique	6
3	Création d'un champ électrique uniforme et stationnaire	7
4	Première approche du champ magnétique	9
5	Invariances et symétries du champ magnétique	9
5.1	Invariances d'une distribution de courant et donc du champ magnétique	9
5.2	Propriétés de symétries du champ magnétique	10
5.2.1	Plan de symétrie de la distribution de courants	10
5.2.2	Plan d'antisymétrie de la distribution de courants	11
5.2.3	Exemple de la spire de courant	13
6	Exemples de cartographie de champ magnétique	14
6.1	Fil rectiligne infini	14
6.2	Spire circulaire	14
6.3	Bobine longue	16
6.4	Aimant	17
7	Moment magnétique	18
7.1	Moment magnétique d'une boucle de courant	18
7.2	Moment magnétique d'un aimant	19
7.3	Champ magnétique associé à un moment magnétique	19

1 Forces centrales conservatives

1.1 Force de gravitation

Caractéristiques de la force de gravitation

Soient deux points matériels, M_1 de masse m_1 et M_2 de masse m_2 , la force d'interaction gravitationnelle de M_1 sur M_2 a pour expression :

$$\vec{f}_{\text{gr}, 1 \rightarrow 2} = -\vec{f}_{\text{gr}, 2 \rightarrow 1} = -\mathcal{G} \frac{m_1 m_2}{(M_1 M_2)^2} \frac{\vec{M_1 M_2}}{M_1 M_2} = -\mathcal{G} \frac{m_1 m_2}{(M_1 M_2)^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$

avec $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ la constante de gravitation universelle et $\vec{u}_{1 \rightarrow 2}$ est le vecteur unitaire de la direction allant de M_1 vers M_2 .

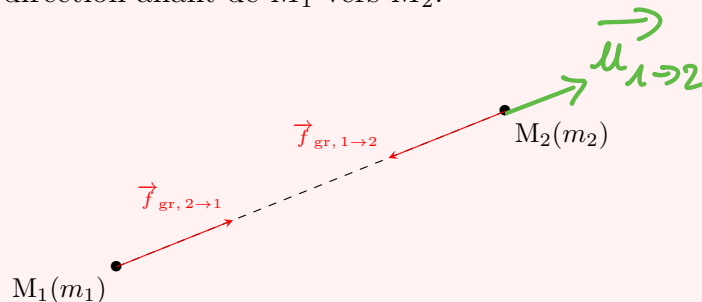


Figure 1 – Force gravitationnelle entre deux masses ponctuelles

Pour le calcul de la force d'interaction gravitationnelle, la Terre et les astres à symétrie sphérique, sont équivalents à une masse ponctuelle de masse égale à leur masse totale et placée en leur centre. Soit un point matériel M de masse m , attiré par la Terre de centre O , de masse $M_T = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$ et de rayon $R_T = 6400 \text{ km}$. Retrouver la valeur du champ de pesanteur à la surface de la terre à partir de ces données et de l'expression de la force d'interaction gravitationnelle :

$$\vec{P} = -\frac{\mathcal{G} M_T m}{R_T^2} \vec{u}$$

$$= m \times \left(-\frac{\mathcal{G} M_T}{R_T^2} \right) \vec{u} \quad \leftrightarrow \vec{g}$$

avec $\|\vec{g}\| = \frac{\mathcal{G} M_T}{R_T^2} = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 6,0 \times 10^{24}}{(6400 \times 10^3)^2}$

$$= 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

1.2 Force électrostatique

Loi de Coulomb

Soient deux particules chargées, M_1 de charge q_1 et M_2 de charge q_2 , la force d'interaction électrostatique de M_1 sur M_2 a pour expression :

$$\vec{f}_{\text{el}, 1 \rightarrow 2} = -\vec{f}_{\text{el}, 2 \rightarrow 1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(M_1 M_2)^2} \frac{\overrightarrow{M_1 M_2}}{M_1 M_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(M_1 M_2)^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$

avec $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ où ϵ_0 est permittivité diélectrique du vide et $\vec{u}_{1 \rightarrow 2}$ est le vecteur unitaire de la direction allant de M_1 vers M_2 .

Cas où $q_1 q_2 < 0$, les charges s'attirent :

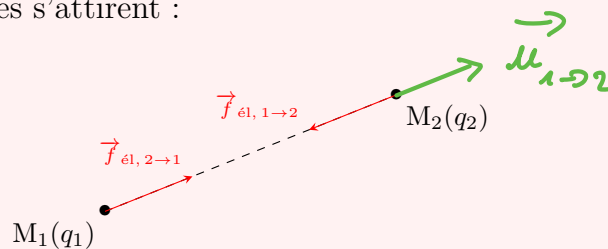


Figure 2 – cas où $q_1 \times q_2 < 0$

Cas où $q_1 q_2 > 0$, les charges se repoussent :

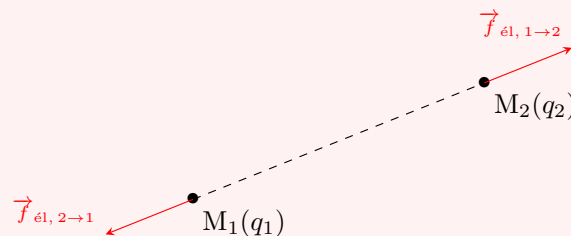


Figure 3 – cas où $q_1 \times q_2 > 0$

1.3 Comparaison de ces deux forces

Si l'on compare les forces de gravitation et électrostatique qui s'exercent par exemple entre deux électrons de masse $m = 9,31 \times 10^{-31} \text{ kg}$ et de charge $-e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$:

$$\frac{\|\vec{f}_{\text{el}}\|}{\|\vec{f}_{\text{gr}}\|} = \left(\frac{e}{m}\right)^2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0 G}\right) = 4,2 \times 10^{42}$$

Les forces de gravitation sont négligées à l'échelle microscopique

D'une manière générale, à l'échelle microscopique, les forces de gravitation sont négligeables devant les forces électrostatiques.

2 Champ, potentiel et énergie potentielle électrostatique

2.1 Le champ électrique

Afin d'expliquer la force existant entre les charges, Faraday a introduit la notion de champ. D'après Faraday, la présence de charges modifie les propriétés de l'espace. Cette modification peut se décrire par l'apparition en tout point de l'espace d'une quantité nommée **champ électrique** qui est de nature vectorielle. Sa valeur au point M à l'instant t est notée $\vec{E}(M, t)$.

Définition du champ électrique

Ce champ électrique $\vec{E}(M, t)$ est alors tel qu'une charge q_0 , appelée charge test, immobile en M , subirait la force électrique :

$$\vec{f}_{\text{el}} = q_0 \vec{E}(M, t)$$

Définition d'une ligne de champ

Une ligne de champ électrique est une ligne qui est tangente au vecteur $\vec{E}(M)$ en chacun de ses points M .

Champ créé par une charge ponctuelle : Dans le système de **coordonnées sphériques**¹, on supposera que M de charge q_0 est attiré ou repoussé par une particule **fixe** placée en O de charge q' , alors la force subie par la particule M est donnée par la loi de Coulomb vue plus haut :

$$\vec{f}_{\text{el}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'q_0}{r^2} \vec{u}_r = q_0 \vec{E}_{q'}(M, t)$$

où le champ créé en M par la charge ponctuelle q' a pour expression :

$$\vec{E}_{q'}(M, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'}{r^2} \vec{u}_r$$

On a représenté sur la figure 4 les lignes de champ créées par une charge ponctuelle $q' > 0$.

1. http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Cinematique/coord_spheriques.html

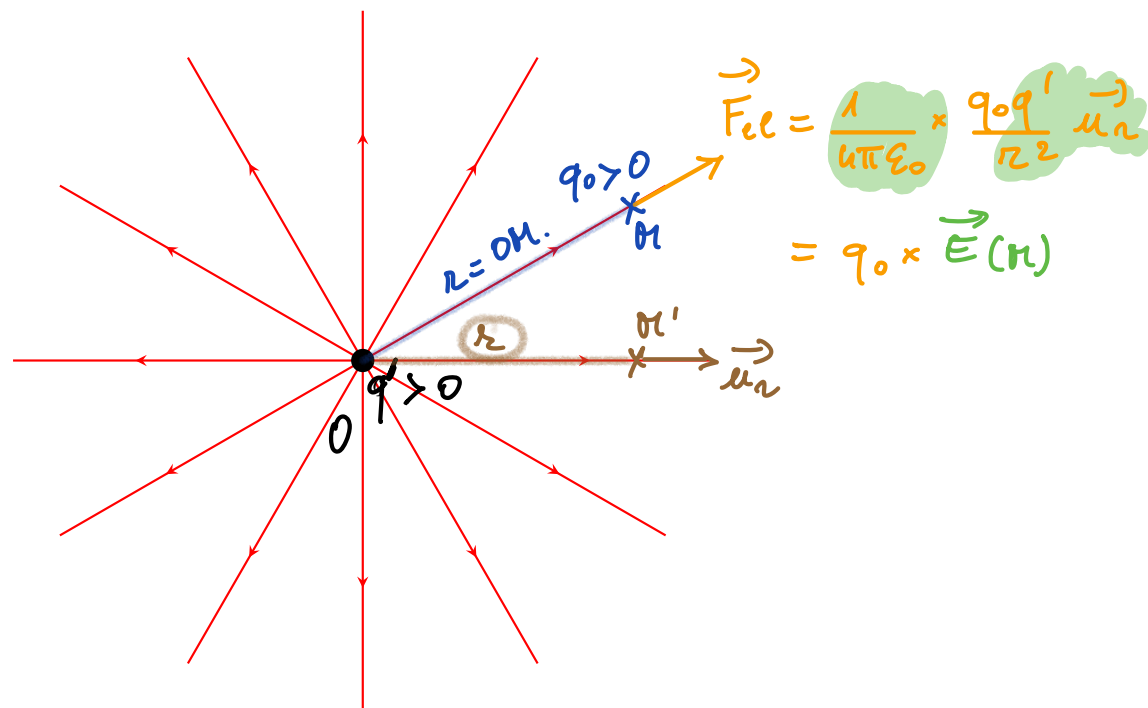


Figure 4 – Lignes de champ crée par une charge ponctuelle

Définition : champ stationnaire - champ uniforme

Le champ électrique $\vec{E}(M)$ est dit **stationnaire ou statique** s'il est indépendant du temps.

Le champ électrique $\vec{E}(t)$ est dit **uniforme** s'il est indépendant de la position, c'est-à-dire s'il garde les mêmes caractéristiques (direction, sens, norme) en tout point à chaque instant t .

Dans ce cours on se limitera aux champ électrique statique, dit champ électrostatique.

2.2 Le potentiel électrostatique**Définition : potentiel électrostatique**

On associe au champ électrostatique $\vec{E}(M)$, une grandeur scalaire $V(M)$ qui dépend des variables spatiales telle que :

$$\vec{E}(M) = -\overrightarrow{\text{grad}} V(M)$$

Le potentiel est défini à une constante près.

D'après cette définition, $\vec{E}$ est orienté dans le sens des potentiels décroissants.

Potentiel associé au champ crée par une charge ponctuelle : Le potentiel associé au champ crée par la charge q' fixe placée en O de la figure 4, en choisissant que ce potentiel est

nul à une distance infinie de q' , s'écrit

$$\lim_{r \rightarrow \infty} V(r) = 0$$

$$V(r) = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Démonstration : On donne l'expression du gradient en coordonnées sphériques

$$\vec{\text{grad}} V(r, \theta, \varphi) = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{u}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \varphi} \vec{u}_\varphi$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_{el} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q_0 q'}{r^2} \vec{u}_r \\ &= q_0 \times \vec{E}(r) \end{aligned}$$

$$\text{donc } \vec{E} = -\vec{\text{grad}} V$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{\partial V}{\partial r} \\ 0 = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad \leadsto V \text{ ne dépend pas de } \theta \\ 0 = -\frac{1}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial V}{\partial \varphi} \quad \leadsto V \text{ ne dépend pas de } \varphi \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{dV}{dr} = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0} \times \left(-\frac{1}{r^2}\right) \Rightarrow V(r) = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{1}{r} + \text{cte.}$$

$$\text{Or } \lim_{r \rightarrow \infty} V(r) = 0 \Leftrightarrow 0 = 0 + \text{cte} \Leftrightarrow \text{cte} = 0$$

$$\text{Au final : } V(r) = \frac{q'}{4\pi\epsilon_0 r}$$

2.3 Énergie potentielle électrostatique

Lorsqu'une charge q_0 est placée dans un champ électrostatique $\vec{E}(M)$, elle subit une force :

$$\vec{f}_{el} = q_0 \vec{E}(M) = -q_0 \vec{\text{grad}}(V(M)) = -\vec{\text{grad}} \left(\underbrace{q_0 V(M)}_{\mathcal{E}_p} \right)$$

Définition : énergie potentielle électrostatique

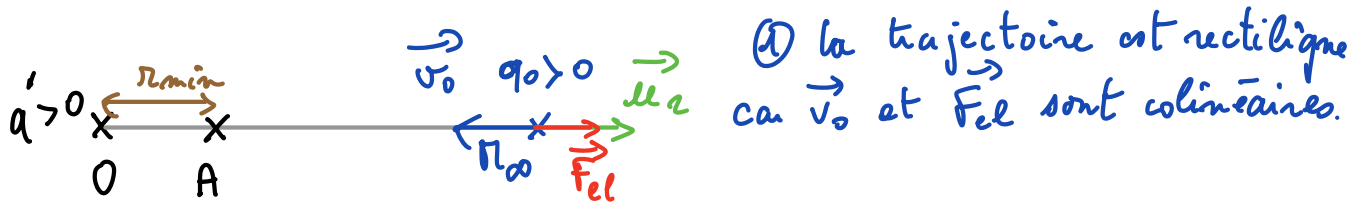
L'énergie potentielle électrostatique $\mathcal{E}_p(M)$ dont dérive la force électrostatique subie par une particule de charge q_0 placée en M dans champ électrostatique $\vec{E}(M)$ de potentiel associé $V(M)$ vaut :

$$\mathcal{E}_p(M) = q_0 V(M)$$

L'énergie potentielle électrostatique est définie à une constante près tout comme le potentiel électrostatique.

Distance minimale d'approche des deux charges : Reprenons l'exemple de la figure 4 où la charge q' fixe est placée en O et supposons qu'on envoie en direction de cette charge une charge q_0 depuis l'infini avec une vitesse radiale $\vec{v}_\infty = -v_0 \vec{u}_r$ avec $v_0 > 0$.

1. Quelle est la trajectoire de la charge mobile q_0 ? $q' > 0$ et $q_0 > 0$.
2. Quelle est sa distance minimale d'approche $r_{\min}$ de la charge placée en O ?



② Conservation de l'énergie mécanique de M_∞ à A :

$$E_c(n_\infty) + E_p(n_\infty) = E_c(A) + E_p(A)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} m v_0^2 + 0 = 0 + \frac{q' q_0}{4\pi \epsilon_0 r_{\min}}$$

$$\Leftrightarrow r_{\min} = \frac{q' q_0}{2\pi \epsilon_0 m v_0^2}$$

3 Création d'un champ électrique uniforme et stationnaire

Pour obtenir un champ électrique uniforme parallèle à l'axe (Ox) , il faut créer un potentiel qui varie linéairement selon l'axe (Ox) . Pour cela, il suffit d'appliquer une différence de potentiel (ou tension) $U = V_1 - V_2$ entre deux grilles métalliques (ou électrodes) planes perpendiculaires à l'axe (Ox) (et donc parallèles entre elles) et distantes de d . **On admet que le champ créé entre les deux électrodes est alors uniforme.**

On note $V_1 = V(x = 0)$ le potentiel de la grille situé en $x = 0$ et $V_2 = V(x = d)$ le potentiel de la grille situé en $x = d$.

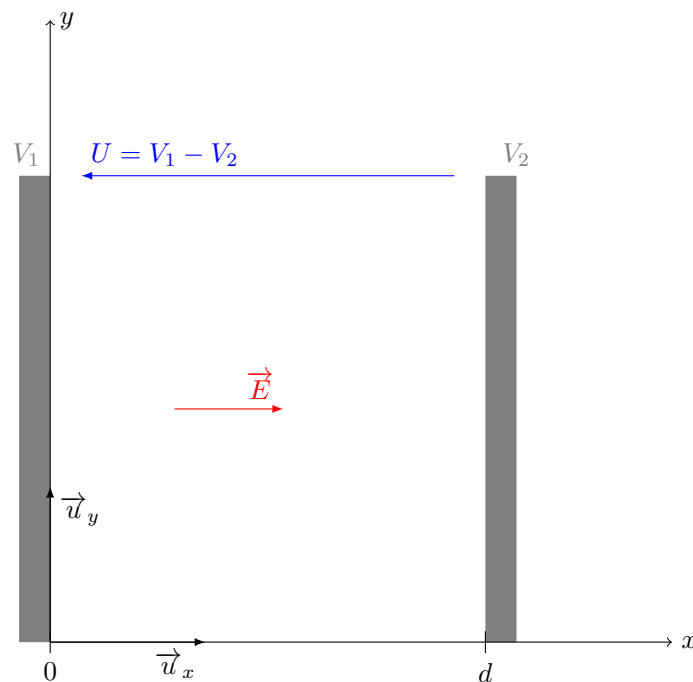


Figure 5 – Création d'un champ électrique uniforme

Compte-tenu du caractère uniforme du champ et des conditions aux limites en $x = 0$ et $x = d$, on obtient :

$$V(x) = -Ex + V_1 = -\frac{U}{d}x + V_1 \text{ et } \vec{E} = E \vec{u}_x = \frac{U}{d} \vec{u}_x$$

Démonstration : On sait que $\vec{E}$ est uniforme ($\vec{E} = \underbrace{E}_{\text{cst}} \vec{u}_x$) et $\vec{E} = -\vec{\text{grad}} V$

$$\Rightarrow \begin{cases} E = -\frac{\partial V}{\partial x} \\ 0 = -\frac{\partial V}{\partial y} \\ 0 = -\frac{\partial V}{\partial z} \end{cases} \Rightarrow \frac{dV}{dx} = -E \Rightarrow V(x) = -Ex + \underbrace{C}_{\text{cst}}$$

$$\text{On } V(x=0) = V_1 \Rightarrow V_1 = -E \cdot 0 + C \Rightarrow \underline{C = V_1}.$$

$$\text{et } V(x=d) = V_2 \Rightarrow V_2 = -E \cdot d + V_1$$

$$\Rightarrow \boxed{E = \frac{V_1 - V_2}{d}}$$

4 Première approche du champ magnétique

Observations expérimentales :

- En présence d'un aimant ou d'un solénoïde, un faisceau de particules chargées en mouvement est dévié (force de Lorentz) et un conducteur parcouru par un courant subit une force (de Laplace).
- Une boussole ou tout autre aimant allongé et libre de ses rotations ou même une simple spire parcourue par un courant tend à s'orienter selon une direction privilégiée en présence d'un autre aimant ou d'un courant électrique passant à proximité.
- Un aimant ou un solénoïde attire des objets en fer mais n'a aucune action sur des charges au repos.

Conclusion :

Une distribution de courants ou un aimant crée une modification des propriétés de l'espace caractérisée par l'apparition d'un champ magnétique. Le champ magnétique va servir à caractériser la force qui s'exerce entre un circuit parcouru par un courant et un autre circuit parcouru par un courant, ou entre un circuit parcouru par un courant et un matériau magnétique.

Définition de $\vec{B}$

Le champ magnétique $\vec{B}$ est défini à partir de la force de Lorentz que subit une particule de charge q quand elle se déplace à la vitesse $\vec{v}$ dans ce champ : $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

Unité et ordres de grandeur :

B s'exprime en $\text{kg.s}^{-2}.\text{A}^{-1}$ ou plus simplement en Tesla : T.

- Composante horizontale du champ magnétique terrestre : $B \simeq 2 \times 10^{-5} \text{ T}$.
- Aimant permanent ordinaire : $B \simeq 1 \times 10^{-2} \text{ T}$; solénoïdes : $B \simeq 0,5 \text{ T}$.
- Bobine supraconductrice : quelques dizaines de T au maximum.

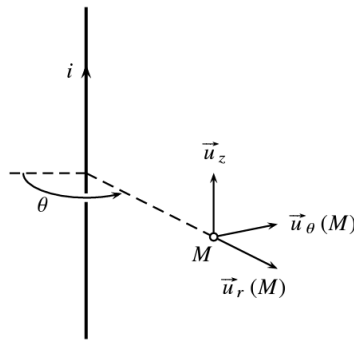
Définition d'une ligne de champ

Une ligne de champ magnétique est une ligne qui est tangente au vecteur $\vec{B}(M)$ en chacun de ses points M .

5 Invariances et symétries du champ magnétique

5.1 Invariances d'une distribution de courant et donc du champ magnétique

L'étude des symétries de la distribution de courant permet de déterminer les dépendances spatiales possibles du champ magnétique $\vec{B}$ qu'elle engendre.

Figure 6 – Invariances de $\vec{B}$ dans le cas d'un fil infini

Invariance par translation le long d'un axe : Considérons un fil rectiligne très long supposé infini (figure 6), parcouru par un courant électrique constant, et confondant l'axe (Oz) d'un repère cylindrique.

La distribution de courant est invariante par translation selon l'axe (Oz). Deux points situés à des coordonnées z différentes, mais à même distance du fil, voient une situation physique strictement identique. Il en résulte que le champ magnétique ne peut pas dépendre de la coordonnée z .

Invariance par rotation autour d'un axe : Cette distribution de courant est également invariante par rotation autour de l'axe du fil. Lorsque le point d'observation M tourne autour de l'axe (Oz) à distance r constante, la configuration observée reste inchangée. Le champ magnétique ne peut donc pas dépendre de l'angle polaire θ .

Propriété d'invariance du champ magnétique

Le champ magnétique engendré par une distribution de courant invariante est indépendant de la variable d'espace associée à cette invariance.

5.2 Propriétés de symétries du champ magnétique

5.2.1 Plan de symétrie de la distribution de courants

Définition d'un plan de symétrie d'une distribution de courants

Une distribution est symétrique (figures 7 et 8) par rapport à un plan de symétrie Π si, pour tout point M de la distribution il existe un symétrique M' de la distribution, et si

$$I \vec{d\ell}(M') = \text{sym}_{\Pi} \left\{ I \vec{d\ell}(M) \right\}$$

Propriétés du champ magnétique en présence d'un plan de symétrie de la distribution de courants

Propriété 1 : $\vec{B}$ est transformé en son antisymétrique par un plan Π

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

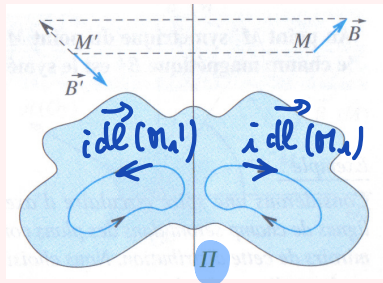


Figure 7 – Un plan de symétrie transforme $\vec{B}$ en son antisymétrique

Propriété 2 : En un point M du plan de symétrie Π , $\vec{B}$ est perpendiculaire à Π , soit

$$\vec{B}(M \in \Pi) \perp \Pi$$

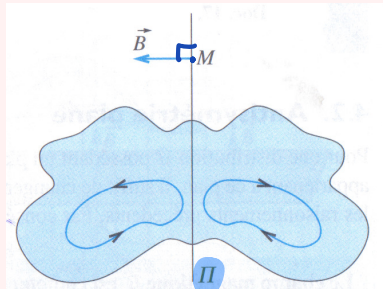


Figure 8 – Le champ $\vec{B}$ est normal au plan de symétrie en un point de ce plan

5.2.2 Plan d'antisymétrie de la distribution de courants

Définition d'un plan d'antisymétrie d'une distribution de courants

Une distribution est antisymétrique (figures 9 et 10) par rapport à un plan d'antisymétrie Π^* si, pour tout point M de la distribution il existe un symétrique M' de la distribution, et si

$$I \vec{dl}(M') = -\text{sym}_{\Pi^*} \{ I \vec{dl}(M) \}$$

Propriétés du champ magnétique en présence d'un plan d'antisymétrie de la distribution de courants

Propriété 1 : $\vec{B}$ est transformé en son symétrique par un plan d'antisymétrie Π^* :

$$\vec{B}(M') = \text{sym}_{\Pi^*} \vec{B}(M)$$

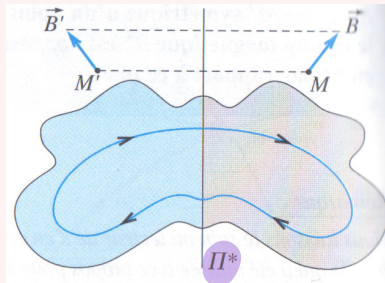


Figure 9 – Un plan d'antisymétrie transforme $\vec{B}$ en son symétrique

Propriété 2 : En un point M du plan d'antisymétrie Π^* , $\vec{B}$ est contenu dans Π^* , soit

$$\vec{B}(M \in \Pi^*) \in \Pi^*$$

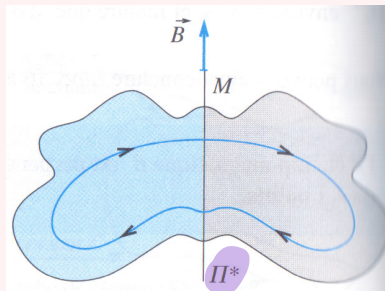


Figure 10 – Le champ $\vec{B}$ est contenu dans le plan d'antisymétrie en un point de ce plan

5.2.3 Exemple de la spire de courant

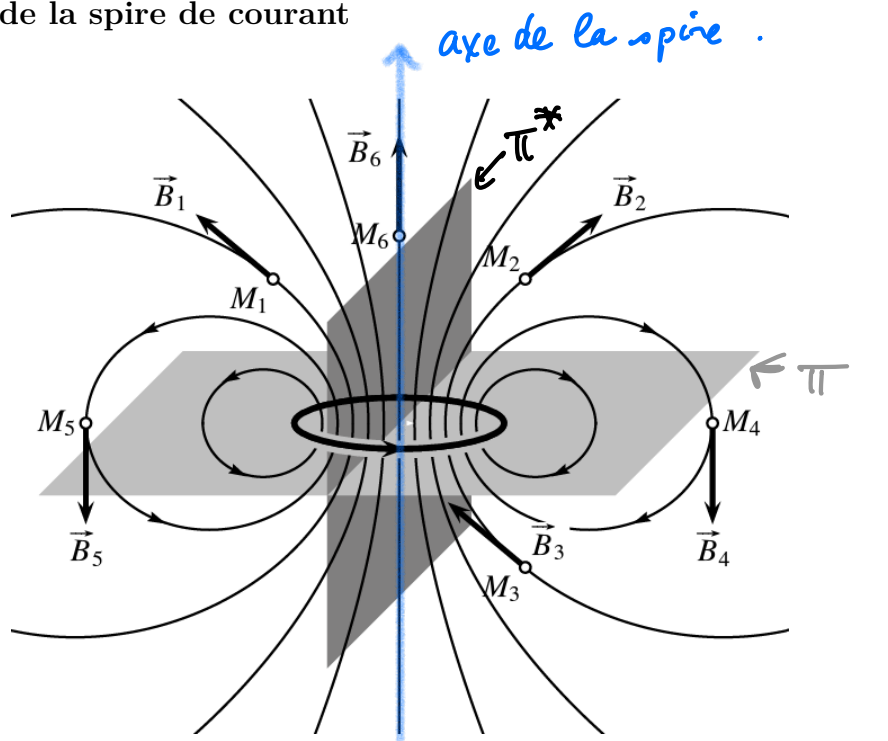


Figure 11 – Lignes du champ magnétique créé par une spire de courant

Considérons une distribution de courants très utile : la spire (figure 11).

- Tout plan contenant l'axe de la spire est un plan d'antisymétrie Π^* de la distribution de courants.
- Le plan contenant la spire est un plan de symétrie de la distribution de courants.

En un point de Π :

En M_4 et M_5 , points de Π , $\vec{B}_4$ et $\vec{B}_5$ sont orthogonaux à Π .

Symétries par rapport à Π :

M_2 et M_3 sont symétriques par rapport à Π , alors $\vec{B}_2$ et $\vec{B}_3$ sont antisymétriques.

En un point de Π^* :

En $M_6 \in \Pi^*$, $\vec{B}_6$ est inclus dans Π^* .

Symétries par rapport à Π^* :

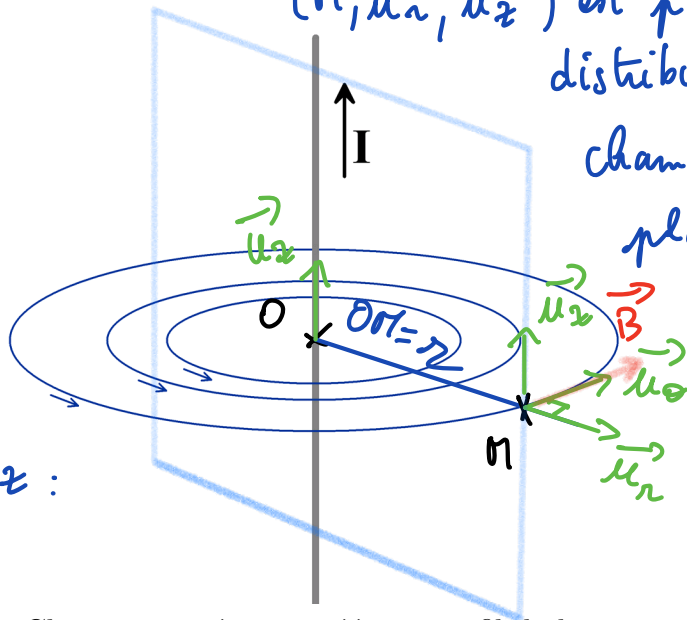
M_1 et M_2 sont symétriques par rapport à Π^* donc $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$ aussi.

M_4 et M_5 sont symétriques par rapport à Π^* donc $\vec{B}_4$ et $\vec{B}_5$ aussi.

6 Exemples de cartographie de champ magnétique

6.1 Fil rectiligne infini

Pour tout point M de l'espace le plan $(M, \vec{u}_r, \vec{u}_z)$ est plan π de la distribution, en M , le champ $\vec{B}$ est $\perp$ à ce plan, c-à-d selon la direction $(M, \vec{u}_\theta)$:



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

⊕ invariances en θ et z :
 $\Rightarrow \vec{B} = B(r) \vec{u}_\theta$

Figure 12 – Champ magnétique créé par un fil de longueur infinie

La figure 12 représente le champ magnétique créé par un fil rectiligne infini confondu avec l'axe (Oz) parcouru par un courant d'intensité I . On observe que :

- le champ magnétique tourne autour du fil
- la norme du champ magnétique décroît quand on s'éloigne du fil
- Les lignes de champ sont des cercles entourant le fil. Leur orientation est liée au sens du courant dans le fil par la règle de la main droite

Première règle de la main droite

Si l'on met la main droite le long de la ligne de champ magnétique, l'orientation de celle-ci allant de la base vers le bout des doigts, le pouce indique le sens du courant.

Cette règle est générale. Chaque fois qu'une ligne de champ est une courbe fermée, elle entoure un fil parcouru par un courant dont le sens est donné par la règle précédente. On peut donc savoir immédiatement, à l'observation d'une carte de champ magnétique, en quel lieu il y a un courant qui passe et dans quel sens est ce courant.

Dans le cas du fil infini confondu avec l'axe (Oz) , on admettra que le champ magnétique en coordonnées cylindriques est de la forme :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\theta$$

où $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ est la perméabilité magnétique du vide.

6.2 Spire circulaire

Une spire circulaire est un cercle conducteur parcouru par un courant électrique. La figure ci-dessous représente les lignes de champ magnétique créées par une spire circulaire dans un plan quelconque contenant l'axe de la spire.

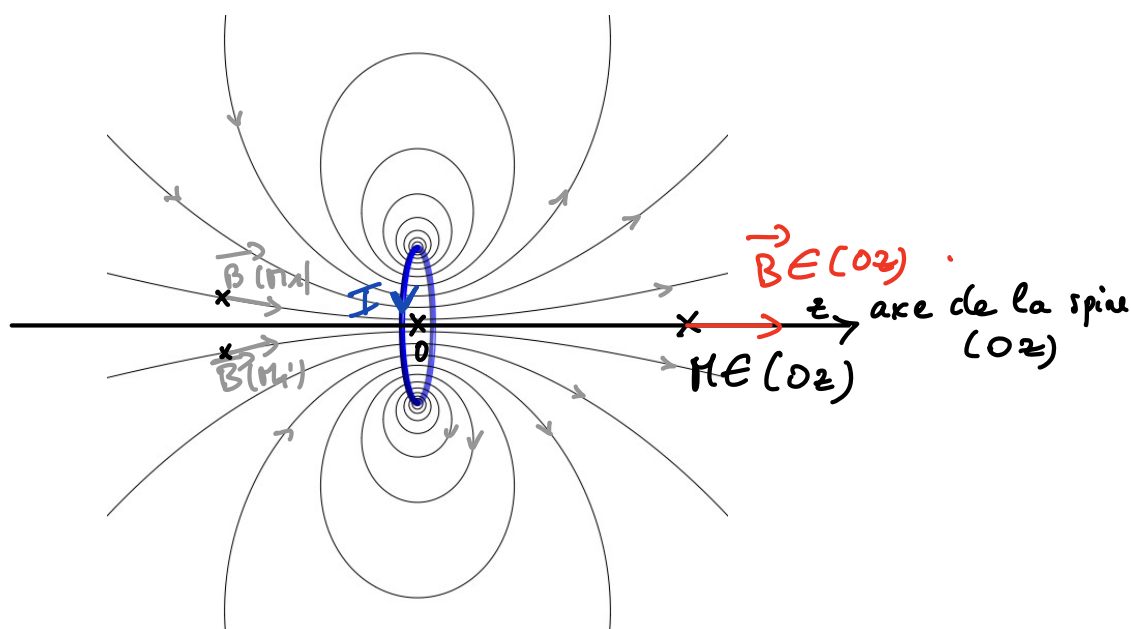


Figure 13 – Champ magnétique créé par un fil de longueur infinie

Les lignes de champ sont des courbes fermées et la première règle de la main droite est bien vérifiée. On observe de plus que les lignes de champ traversent la spire de courant dans un sens donné, aussi, par la règle de la main droite.

Deuxième règle de la main droite

Si l'on met la main droite le long d'une spire, le courant allant de la base vers le bout des doigts, le pouce indique le sens du vecteur champ magnétique créé par ce courant.

Cette propriété est générale et elle permet d'orienter systématiquement le champ magnétique par rapport au courant qui le crée.

Dans le cas d'une spire de rayon R et d'axe (Oz) , on admettra que le champ magnétique en un point M de l'axe est de la forme :

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

Tout plan contenant l'axe (Oz) de la spire est plan $\vec{u}^*$ de distribution, donc en Π , point de l'axe $\in$ à ces plans, le champ $\vec{B} \in$ à ces plans, c'est-à-dire leur intersection qu'est l'axe (Oz) .

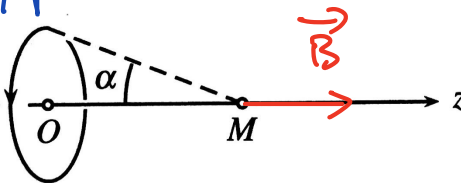


Figure 14 – Champ magnétique en un point de l'axe de la spire

On remarque que les lignes de champ se rapprochent au voisinage du centre de la spire, justement là où le champ magnétique est la plus intense, c'est une propriété que l'on peut généraliser.

Propriété de la norme du champ magnétique

La norme du champ magnétique augmente le long d'une ligne de champ quand les lignes de champ voisines se rapprochent.

6.3 Bobine longue

On fabrique une bobine en enroulant un fil conducteur (fil de cuivre le plus souvent) sur un cylindre de rayon R et de longueur ℓ . L'enroulement est habituellement très serré et on considère alors que le fil forme N spires quasi-circulaires juxtaposées (N est en fait le nombre de tours de fil). Ces spires sont toutes parcourues par la même intensité I , dans le même sens. On définit le nombre de spires par unité de longueur n par :

$$n = \frac{N}{\ell}$$

m⁻¹ sans unité

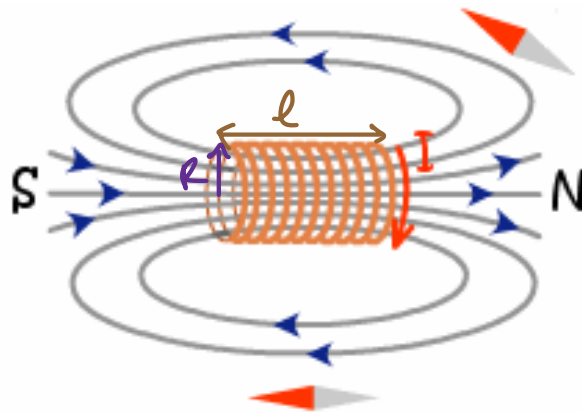


Figure 15 – Champ magnétique créé par une bobine

Les lignes du champ magnétique créé par la bobine parcourue par un courant d'intensité I sont représentées sur la figure ci-dessus. Elles vérifient la règle de la main droite quant à leur orientation par rapport aux sens du courant dans les spires de la bobine.

On observe qu'à l'intérieur de la bobine les lignes de champ sont proches d'être des droites parallèles. Or, lorsque les lignes de champ magnétique sont des droites parallèles, l'écartement entre deux lignes voisines est constant, signe que le champ a une norme constante le long des lignes de champ. Le cours de seconde année permettra de prouver que la norme du champ magnétique est aussi constante entre deux lignes de champ. Il en résulte que le champ magnétique est uniforme.

Champ à l'intérieur d'une bobine

le champ magnétique créé par une bobine est quasiment uniforme à l'intérieur de la bobine et peut s'écrire :

$$\vec{B} = \mu_0 n I \vec{u}$$

où $\vec{u}$ est un vecteur unitaire parallèle à l'axe du solénoïde, n le nombre de spires par unité de longueur et I l'intensité algébrique comptée positivement dans le sens lié à $\vec{u}$ par la règle de la main droite.

Ceci est vrai pour une bobine telle que le rapport $\frac{\ell}{R}$ est grand ; on parle alors de **bobine longue** ou de **solénoïde**.

6.4 Aimant

La carte de champ d'un aimant est similaire à celle d'une spire ou d'une bobine. Par convention, on appelle **pôle nord** la face de l'aimant d'où les lignes de champ sortent et pôle sud la face de l'aimant dans laquelle les lignes de champ entrent.

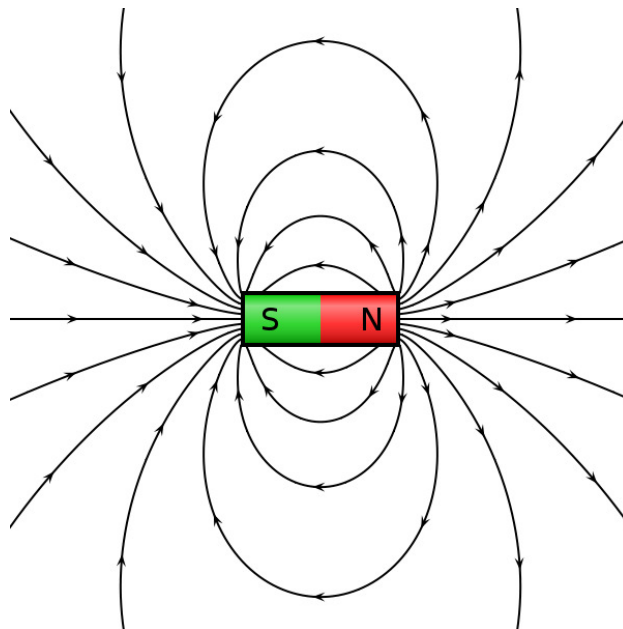


Figure 16 – Champ magnétique créé par un aimant

Les lignes de champ magnétique terrestre sont similaires à celle d'un aimant. On notera que le pôle sud magnétique correspond à peu près au pôle nord géographique :

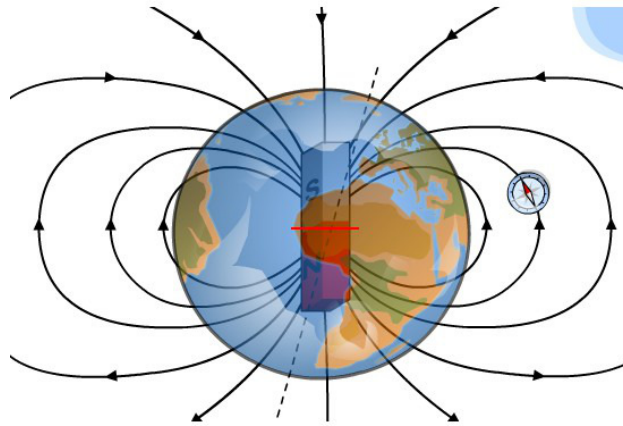


Figure 17 – Champ magnétique terrestre

7 Moment magnétique

À grande distance de leur source, une spire parcourue par un courant, une bobine longue et un aimant produisent des champs magnétiques de même structure. Plus précisément, en un point M tel que la distance OM au centre de la source soit très grande devant sa taille caractéristique, le champ ne dépend plus des détails géométriques de la source. Afin de comparer et de caractériser ces différentes sources magnétiques, on introduit la notion de **moment magnétique**.

7.1 Moment magnétique d'une boucle de courant

Définition du vecteur surface d'une spire plane

Le moment magnétique d'une spire plane est défini à partir du **vecteur surface** $\vec{S}$. Ce vecteur est normal au plan de la spire, de norme égale à la surface S de celle-ci. Son sens est déterminé par le sens conventionnel du courant selon la règle de la main droite : on enlace la spire avec sa main droite, la pousse donne alors le sens de $\vec{S}$.

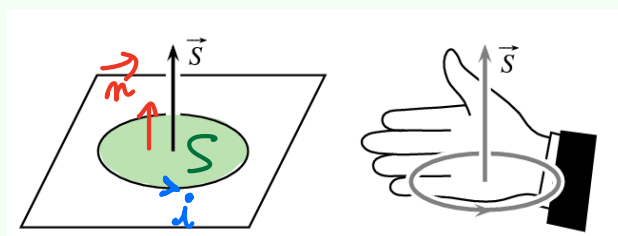


Figure 18 – Vecteur surface d'une spire plane

On introduit également le vecteur normal unitaire $\vec{n}$ au plan de la spire, tel que

$$\vec{S} = S \vec{n}$$

Définition du moment magnétique d'une boucle de courant (spire)

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

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

Il s'exprime en $A \cdot m^2$ et constitue une grandeur vectorielle caractérisant l'intensité et l'orientation de la source magnétique.

7.2 Moment magnétique d'un aimant

À grande distance, le champ magnétique d'un aimant est analogue à celui créé par une boucle de courant. On associe donc également un moment magnétique à un aimant, bien qu'il ne soit pas parcouru par un courant électrique. Le moment magnétique d'un aimant dépend de sa taille et de ses propriétés magnétiques internes. Son ordre de grandeur est typiquement de quelques dizaines de $A \cdot m^2$ pour un aimant usuel. Le moment magnétique de la Terre est de l'ordre de $10^{23} A \cdot m^2$.

7.3 Champ magnétique associé à un moment magnétique

Un moment magnétique permet de modéliser indifféremment une boucle de courant, une bobine ou un aimant lorsque l'on se place à une distance très grande devant la taille caractéristique de la source. Dans ce régime lointain, le champ magnétique ne dépend, à première approximation, que du moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ et non de la structure détaillée de la source. Les lignes de champ présentent alors une configuration caractéristique de dipôle magnétique.

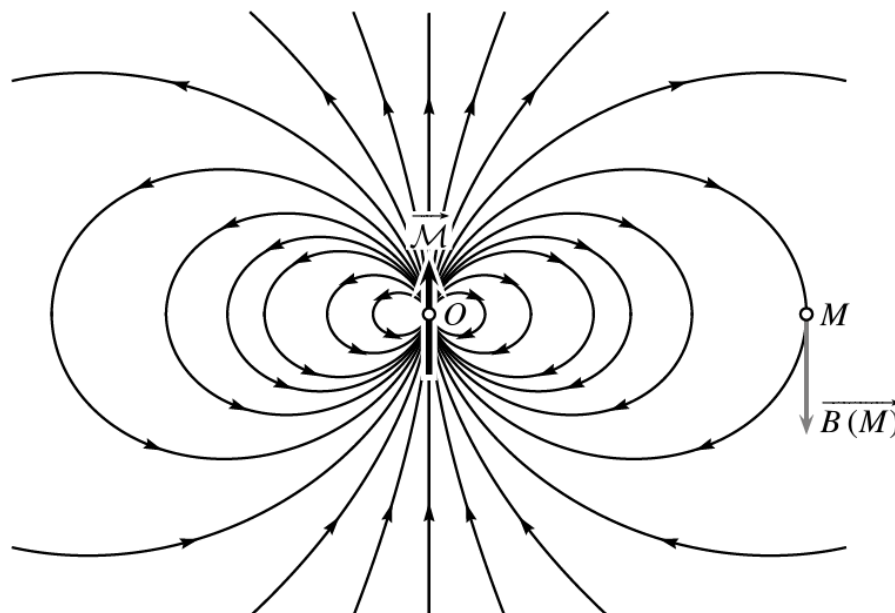


Figure 19 – Champ magnétique créé par un moment magnétique