Chapitre P19

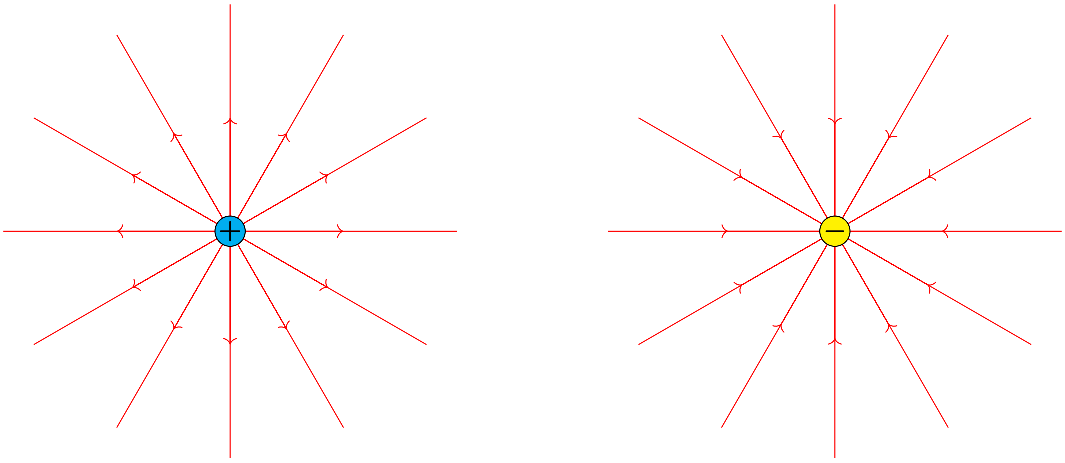
Sources de champs électrique et magnétique

Notions et contenus	Capacités exigibles
Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
Symétries et invariances des distributions de courant.	Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé.
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
Moment magnétique.	Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

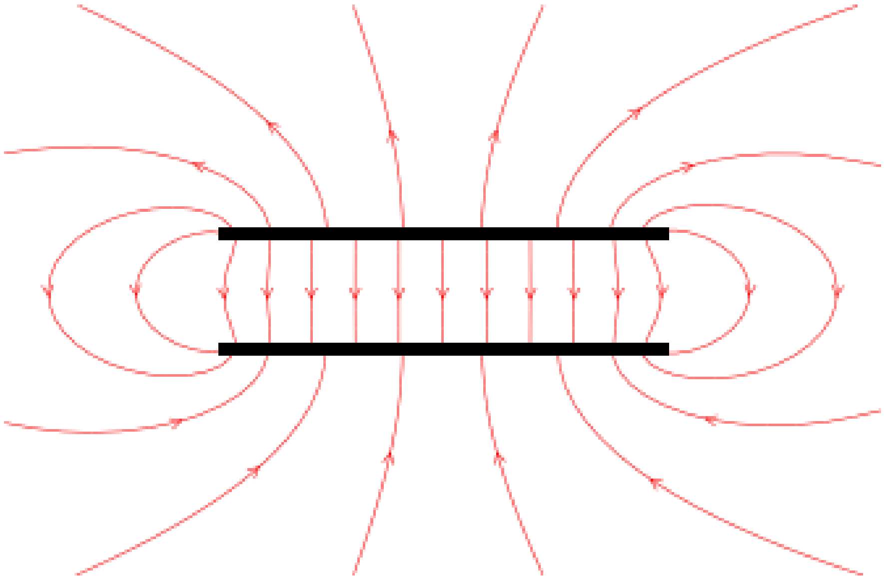
Questions de cours

- Définir les lignes de champ vectoriel. Indiquer leurs propriétés dans le cas d'un champ à flux conservatif (champ électrique en dehors des charges ou champ magnétique).
- Énoncer le principe de Curie.
- Donner la direction du champ électrique ou magnétique dans un plan de symétrie / d'antisymétrie des sources.
- Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue.
- Définir le moment magnétique d'une boucle de courant plane.

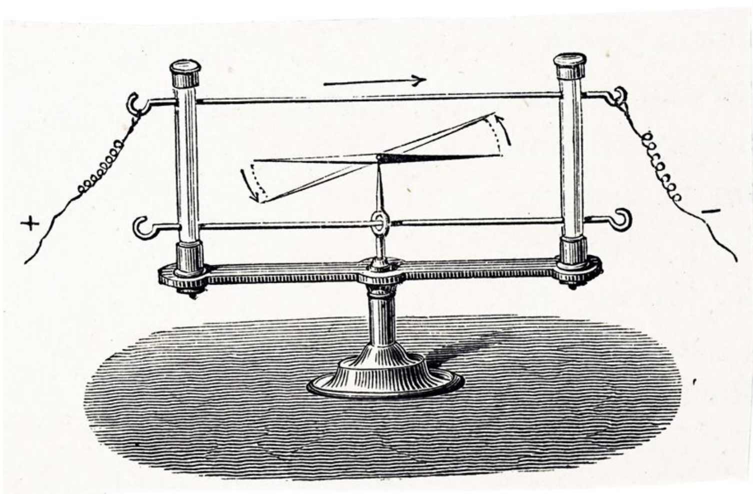
Document 1. Champs électriques créés par des charges ponctuelles



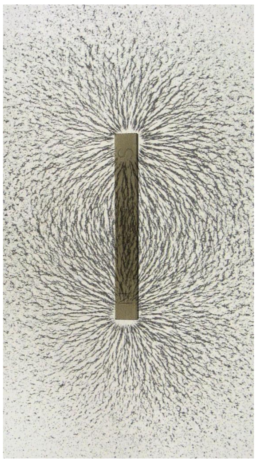
Document 2. Champ électrique créé par un condensateur plan

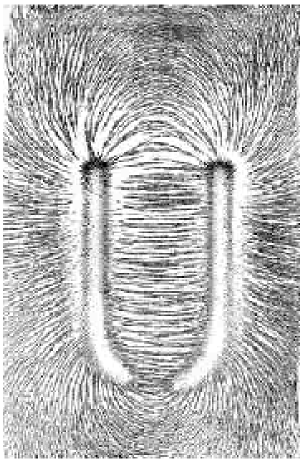


Document 3. Expérience d'Ørsted (1820)

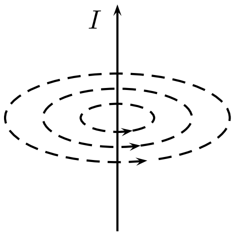


Document 4. Spectres magnétiques d'aimants

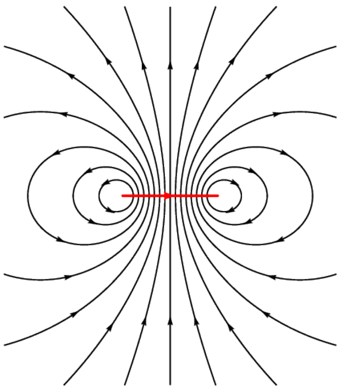


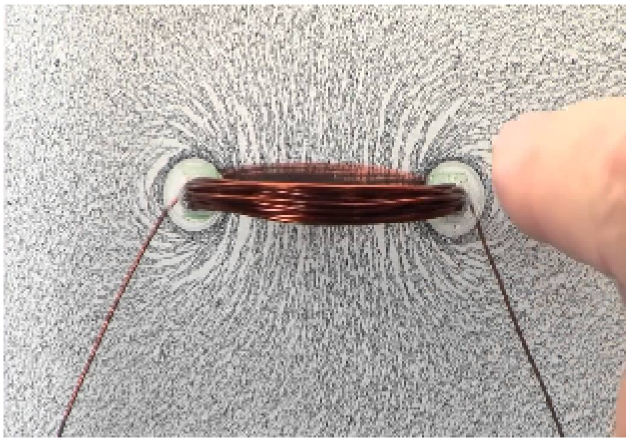


Document 5. Champ magnétique créré par un fil électrique rectiligne

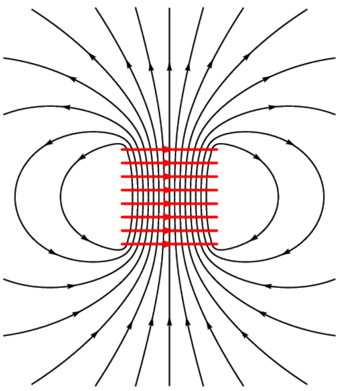


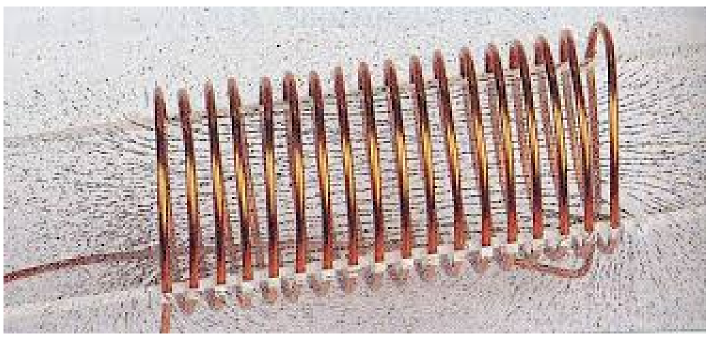
Document 6. Champ magnétique créé par une boucle circulaire de courant



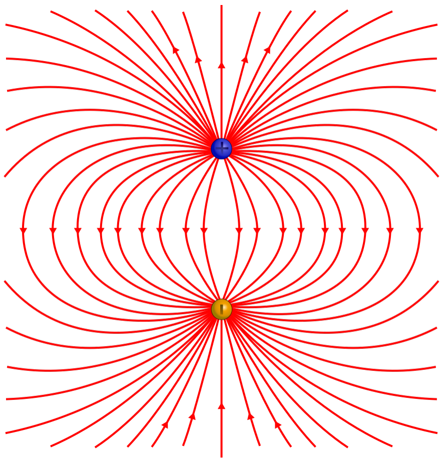


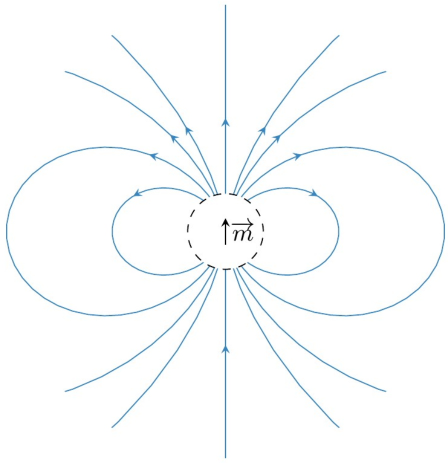
Document 7. Champ magnétique créé par une bobine allongée



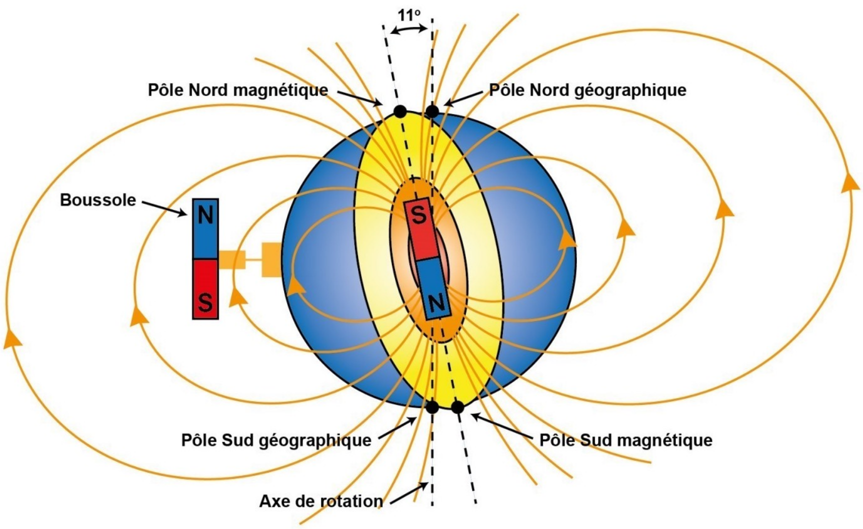


Document 8. Champ dipolaire





Document 9. Champ magnétique terrestre



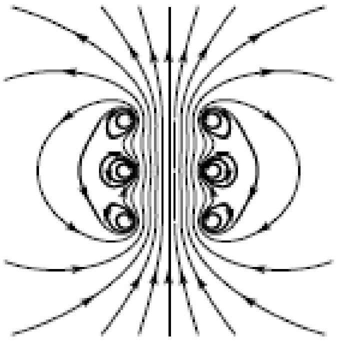
Exercice de cours A. Champ électrique créé par un condensateur plan

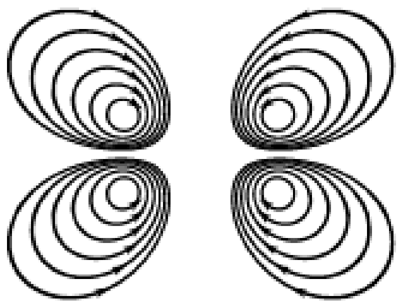
Un condensateur plan est constitué de deux électrodes planes parallèles, chargées avec des charges opposées. À l'intérieur du condensateur, loin des bords relativement à la distance entre les plaques, on peut considérer les plaques comme infinies et uniformément chargées.

1. Déterminer les éléments de symétrie dela distribution de charges.
2. De quelles variables dépend a priori le champ électrique entre les plaques ?
3. Quelle est la direction du champ entre les plaques ?
4. Que peut-on en conclure ?

Exercice de cours B. Analyse de cartes de champ magnétique

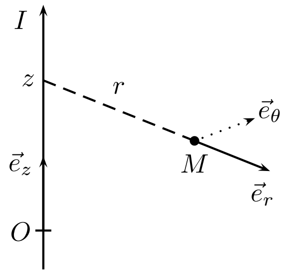
Déterminer la disposition et l'orientation des circuits ayant donné naissance aux champs magnétiques suivants.





Exercice de cours C. Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini

Soit un fil confondu avec l'axe Oz parcouru par un courant stationnaire dirigé dans le sens de $\vec{e}_z$. On utilise les coordonnés cylindriques d'axe Oz.

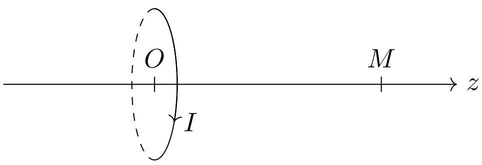


1. Identifier tous les éléments de symétrie de la distribution de courant.
2. De quelles coordonnées le champ magnétique dépend-il ? Justifier.
3. Déterminer également la direction du champ.
4. Quelle est la forme des lignes de champ ?

Exercice de cours D. Spire plane circulaire

Soit une spire plane circulaire de rayon R parcourue par un courant d'intensité I. On s'intéresse au champ magnétique créé sur l'axe de symétrie de la spire. En fixant l'origine O de cet axe au centre de la spire et en l'orientant selon le règle de la main droite, le champ en un point M d'abscisse z a pour expression :

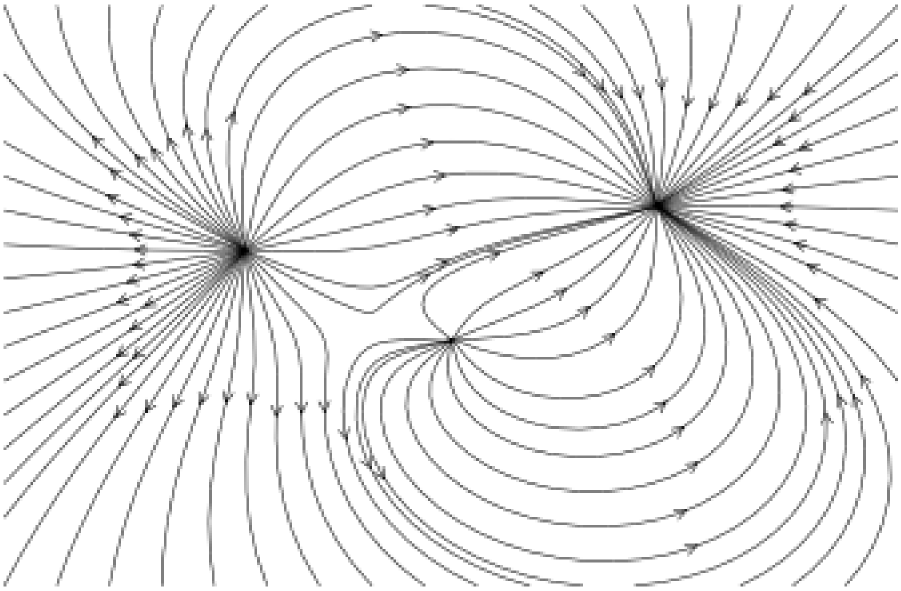
$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \vec{e}_z$$



1. Justifier la direction du champ.
2. En quel point le champ est-il maximal ? Donner son expression en ce point.
3. Montrer que lorsque le point M est très éloigné de la spire ($z \gg R$), le champ sur l'axe dépend des caractéristiques de la spire sous la forme d'un paramètre vectoriel que l'on interprétera simplement : c'est le moment magnétique de la spire.

Exercice 1. Carte de champ électrique (★)

Déterminer la position et le signe des charges responsables du champ électrique ci-dessous.



Exercice 2. Champ magnétique terrestre (★)

On considère l'expérience d'Ørsted. On place une aiguille aimantée à une distance $d = 1{,}5\,\text{cm}$ sous le fil horizontal et on aligne le fil avec l'aiguille, le courant ne circulant pas dans le fil.

On alimente alors le fil avec un courant d'intensité $I = 600\,\text{mA}$, on constate que l'aiguille tourne d'un angle $\alpha = 22°$ avant de s'immobiliser.

Déterminer l'intensité du champ magnétique terrestre.

Indications : le champ créé par un fil rectiligne infini confondu avec l'axe Oz a pour expression $\vec{B} = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{e}_\theta$ dans le système de coordonnées cylindriques d'axe Oz. Il s'ajoute vectoriellement au champ magnétique terrestre.

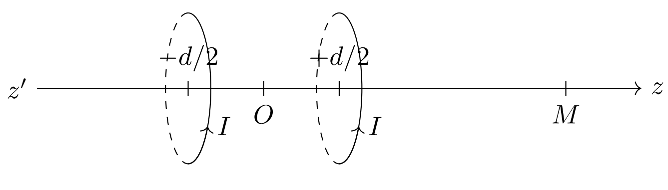
Exercice 3. Rapport gyromagnétique d'une particule (★★)

Une particule de masse m et de charge q décrit un mouvement circulaire de rayon R uniforme à la vitesse v. On note T la période de ce mouvement.

1. Exprimer l'intensité moyenne I résultant du mouvement de la charge. (Rappel : l'intensité est la charge électrique qui traverse une section de circuit par unité de temps.)
2. En déduire le moment magnétique de ce système.
3. Exprimer le moment cinétique de la particule., vérifier qu'il a même direction que le moment magnétique.
4. Montrer que le rapport γ entre le moment magnétique et le moment cinétique est une constante caractéristique de la particule chargée, nommé *rapport gyromagnétique*.

Exercice 4. Bobines de Helmholtz (★★)

Soit un système de deux boucles de courant circulaires de même rayon R et de même axe $z'z$, parcourues par un courant identique d'intensité I. Soit d la distance entre les centres des deux boucles. En note O le milieu entre ces deux centres, si bien que ces derniers sont situés aux abscisses $-d/2$ et $+d/2$.



On donne le champ créé par une boucle circulaire de courant de centre O à l'abscisse z sur son axe de symétrie Oz :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}\vec{e}_z$$

1. Donner l'expression du champ créé par l'ensemble des deux boucles en un point M de l'axe situé à l'abscisse z. Montrer qu'il se met sous la forme : $\vec{B} = \dfrac{\mu_0 I}{2R} f(z/R)\, \vec{e}_z$ où f est une fonction que l'on précisera.
2. Exprimer ce champ à proximité de O en effectuant un développement limité à l'ordre 3 de la fonction f.
3. Comment choisir d de sorte que le champ soit le plus uniforme possible au milieu des spires ? Donner l'expression du champ central dans cette condition. Cette configuration se nomme *bobines de Helmholtz*.

Exercice 5. Champ dipolaire électrique (★★★)

Soit un dipôle électrostatique constitué de deux charges ponctuelles $\pm q$ distantes de a. On choisit un repère tel que les charges se trouvent sur l'axe (Oz), la charge $+q$ en $z = a/2$ et la charge $-q$ en $z = -a/2$.

On utilise les coordonnées sphériques (r, θ, φ) associées et on étudie le champ créé par les charges en un point M très éloigné des charges par rapport à leur distance, c'est-à-dire avec $r \gg a$.

1. Exprimer la distance entre la charge positive et M, en fonction de r, a et θ. On pourra utiliser la norme du vecteur qui les sépare.
2. En déduire le potentiel électrique créé par la charge positive, au point M et exprimer son développement limité à l'ordre 1 en a/r.
3. Faire de même pour le potentiel électrique créé par la charge négative en M.
4. En déduire le potentiel électrique créé par le dipôle en M, en fonction de r, θ, et du moment dipolaire $p = qa$.
5. En déduire le champ électrique au point M.

Réponses

Exercice 2 : $B_T = 2{,}0 \times 10^{-5}$ T.

Exercice 3 : 2. $\vec{\mu} = \dfrac{qvR}{2}\, \vec{e}_z$; 4. $\gamma = \dfrac{q}{2m}$.

Exercice 4 : 1. $f(x) = \dfrac{1}{\left(1 + \left(x - \dfrac{d}{2R}\right)^2\right)^{3/2}} + \dfrac{1}{\left(1 + \left(x + \dfrac{d}{2R}\right)^2\right)^{3/2}}$; 3. $d = R$; $f(0) = 1{,}43$.

Exercice 5 : 4. $V = \dfrac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cos(\theta)$.