

Expérience n°6 – BOUSSOLE DES TANGENTES

Domaine: Electricité, magnétisme

Lien avec le cours de Physique Générale:

Cette expérience est liée au chapitre suivant du cours de Physique Générale:

- Physique II, Chapitre 1 : Magnétisme

Objectif général de l'expérience

L'objectif de cette expérience est de **mesurer l'amplitude d'un champ magnétique** en utilisant une boussole et un deuxième champ magnétique auxiliaire connu. La méthode sera appliquée dans un premier temps à la **détermination du champ magnétique terrestre local**, en utilisant le champ produit par une spire circulaire parcourue par un courant électrique comme champ auxiliaire. Dans un deuxième temps, le **champ magnétique produit par un courant électrique** parcourant un fil rectiligne sera déterminé en considérant le champ magnétique terrestre comme champ auxiliaire.

1 Introduction

La boussole des tangentes est un instrument permettant de **mesurer l'amplitude d'un champ magnétique à l'aide d'une boussole**, objet qui n'est sensible qu'à la direction du champ magnétique local, grâce à l'utilisation d'un champ magnétique auxiliaire connu (en direction et amplitude). Dans cette expérience, ce système de mesure sera d'abord utilisé pour **déterminer le champ magnétique terrestre**, puis pour mesurer le **champ magnétique produit par un courant électrique** parcourant un fil conducteur rectiligne. La dépendance du champ magnétique en fonction de la distance au fil sera aussi observée.

1.1) Champ magnétique

Le **champ magnétique** est une grandeur vectorielle, notée \vec{B} , caractérisée par sa direction et son amplitude, qui décrit les effets magnétiques de la matière. L'unité de l'intensité d'un champ magnétique dans le système international (SI) d'unités est le **tesla (T)**, qui s'exprime en fonction des unités de base comme $1 \text{ [T]} = 1 \text{ [kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}]$. On utilise parfois le **gauss (G)**, sachant que $1 \text{ [G]} = 10^{-4} \text{ [T]}$. Un champ magnétique peut être produit, entre autre, par **un aimant permanent** ou par **un courant électrique**.

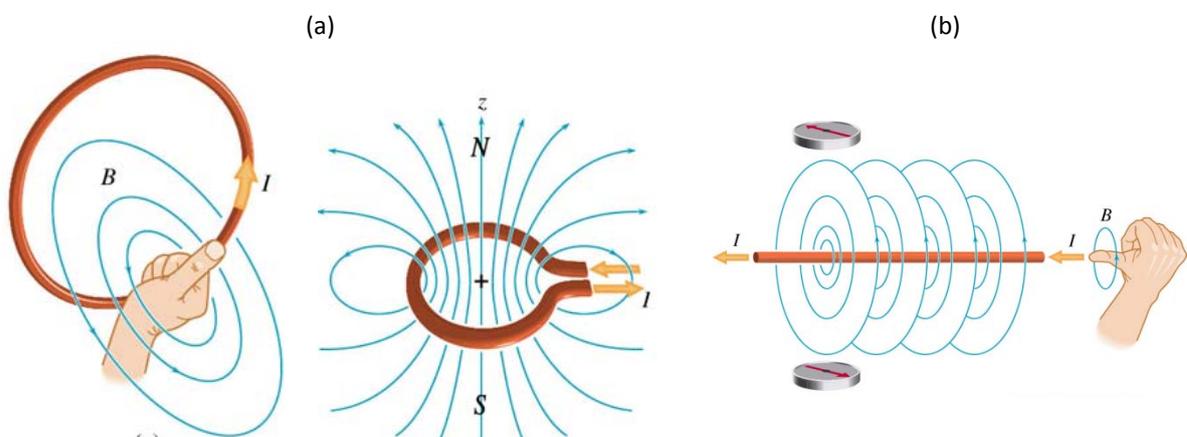


Figure 1: Règle de la main droite pour déterminer la direction du champ magnétique créé par un courant électrique circulant un fil conducteur. (a) Spire circulaire; (b) fil rectiligne. Les lignes bleues représentent les lignes de champs. (Extrait du cours de Physique Générale Phyg II-1).

Les **lignes de champ** représentent l'ensemble des points de l'espace où l'amplitude du champ magnétique est constante. Le vecteur champ magnétique est tangent aux lignes de champ en chaque point. Pour un champ magnétique créé par un courant électrique circulant dans un fil conducteur, les lignes de champs au voisinage du conducteur sont des cercles concentriques au fil. Le sens des lignes de champ (direction du vecteur champ magnétique) est donné par la **règle de "la main droite"**: le pouce de la main droite est orienté dans la direction du courant, les autres doigts indiquent la direction du champ. Les cas d'une spire circulaire (utilisée dans la première partie) et d'un fil rectiligne (qui sera traité dans la deuxième partie de l'expérience) sont illustrés sur la Figure 1.

La Terre, comme la plupart des planètes du système solaire, possède un champ magnétique. Ce **champ magnétique terrestre**, qui protège la Terre en déviant les particules chargées issues du soleil dans une région appelée magnétosphère, est principalement d'origine interne. Il est engendré par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de notre planète. En particulier, des courants (bien que très faibles) parcourant le noyau induiraient ce champ magnétique. En un point donné de l'espace, le champ magnétique terrestre possède une composante verticale \vec{B}_{vert} (dirigée vers le centre de la Terre) et une composante horizontale \vec{B}_{hor} . On s'intéressera dans cette expérience à la composante horizontale \vec{B}_{hor} . La valeur moyenne du champ magnétique terrestre est d'environ 0,5 G (soit 5×10^{-5} T).

1.2) La boussole

Une **boussole** est un instrument constitué d'une **aiguille magnétisée** qui **s'aligne sur le champ magnétique local**. Celui-ci correspond généralement au champ magnétique terrestre et la boussole indique alors le pôle Nord magnétique, mais elle peut s'en écarter en présence d'autres sources de champs magnétiques, comme des instruments électriques. Pour cette raison, il faudra **veiller à tenir les appareils électroniques** (par exemple les téléphones portables) **à distance de la boussole** tout au long de l'expérience.

2 Principe général de l'expérience

Une boussole indiquant seulement la direction du champ magnétique, mais ne donnant aucune information sur son amplitude, nous utiliserons la nature vectorielle du champ magnétique et la connaissance d'un **champ auxiliaire** \vec{B}_{aux} pour déterminer l'amplitude du champ inconnu. Le principe est illustré sur la Figure 2. En l'absence du champ auxiliaire, la boussole est alignée selon la direction Sud-Nord du champ \vec{B} à déterminer. En ajoutant le champ auxiliaire \vec{B}_{aux} , l'aiguille de la boussole s'oriente dans une direction donnée par la résultante $\vec{B}_{\text{tot}} = \vec{B}_{\text{aux}} + \vec{B}$ des deux champs (addition vectorielle) et présente donc un angle de déviation ϕ par rapport à sa position initiale. En choisissant le **champ auxiliaire perpendiculaire à la direction du champ à mesurer**, l'angle de déviation est donné simplement par (voir Figure 2) :

$$\text{tg}(\phi) = \frac{B_{\text{aux}}}{B} \quad (\text{Eq. 1})$$

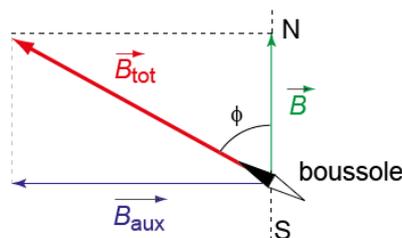


Figure 2: Principe de la boussole des tangentes. L'amplitude du champ inconnu \vec{B} est obtenue à partir de l'angle de déviation ϕ de la boussole qui résulte de la présence d'un champ auxiliaire connu \vec{B}_{aux} , appliqué perpendiculairement au champ à déterminer.

Il suffit donc de mesurer l'angle ϕ de déviation de l'aiguille en présence du champ magnétique auxiliaire (par exemple créé par un courant parcourant un fil conducteur) pour déterminer l'amplitude du champ inconnu B . L'expression (Eq. 1) explique le nom donné à l'instrument utilisé dans cette expérience.

Le montage à utiliser pour cette expérience est présenté dans la Figure 3. Le rhéostat R est une résistance variable permettant de varier le courant parcourant le conducteur (spire circulaire ou fil rectiligne). Le commutateur C permet d'inverser le sens du courant.

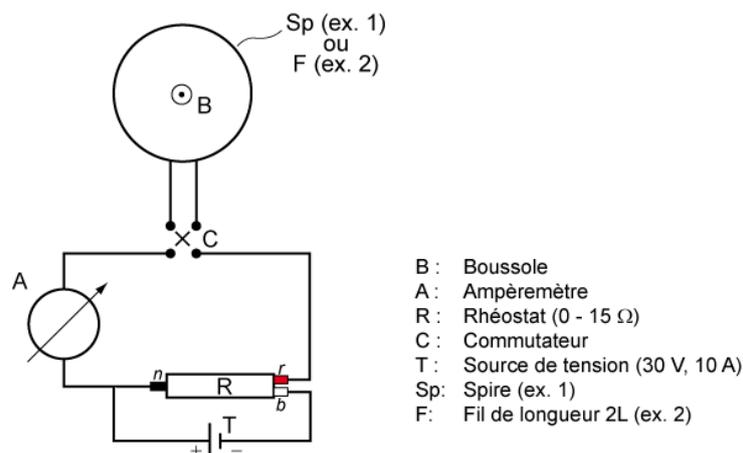


Figure 3: Schéma du montage expérimental de l'expérience.

2.1) Mesure du champ terrestre

Dans la première partie de l'expérience, la boussole des tangentes sera utilisée pour déterminer la **composante horizontale du champ magnétique terrestre B_T** . Le **champ auxiliaire \vec{B}_{aux}** sera **produit par une spire** parcourue par un courant électrique I variable. La spire de rayon r , centrée sur la boussole, sera orientée selon le plan du méridien magnétique (direction Nord-Sud, voir Figure 4a), de sorte que le champ produit sur la boussole soit perpendiculaire au champ terrestre. Ainsi le champ produit par la spire sera orienté Est-Ouest alors que le champ terrestre est naturellement orienté Sud-Nord.

Le champ magnétique au centre O d'une spire parcourue par un courant I est perpendiculaire au plan de la spire (voir Figure 1a) et son amplitude est donnée par

$$B_{spire} = \frac{\mu I}{2r}, \quad (\text{Eq. 2})$$

où μ est la perméabilité magnétique du milieu (l'air ici). La perméabilité de l'air étant très proche de celle du vide μ_0 , on peut considérer $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [T} \cdot \text{m/A]}$. Lorsqu'on enclenche le courant I dans la spire, l'aiguille de la boussole tourne d'un angle ϕ comme indiqué sur la Figure 4a.

2.2) Champ magnétique produit par un courant électrique dans un fil rectiligne

Dans la deuxième partie de l'expérience, la boussole des tangentes sera utilisée pour déterminer le **champ magnétique produit par un courant électrique parcourant un fil rectiligne**. Dans ce cas, les lignes de champ sont des cercles concentriques centrés sur le fil (Figure 1b). Le **champ magnétique terrestre \vec{B}_T** servira de **champ auxiliaire**, pour lequel on prendra la valeur déterminée dans la première partie (voir §2.1). Pour cela, la **boussole** sera **placée dans le plan Nord-Sud contenant le fil** de sorte à avoir deux champs perpendiculaires comme indiqué dans la Figure 4b. Avec ce montage, on vérifiera en particulier la loi donnant l'amplitude du champ magnétique produit par un courant électrique dans un fil rectiligne en fonction de la distance d au fil conducteur. Pour un fil de longueur infinie, le champ magnétique peut être déterminé à partir de la loi d'Ampère (voir démonstration dans le cours de Physique générale, Chap. PhyG II-1) et le champ décroît selon l'inverse de la distance au fil:

$$B_d = \frac{\mu I}{2\pi d} \quad (\text{Eq. 3})$$

Lorsque le fil conducteur a une longueur finie $2L$ (L = demi-longueur du fil), l'expression ci-dessus doit être quelque peu modifiée et l'on peut montrer que le champ produit s'écrit alors

$$B_d = \frac{\mu I}{2\pi d} \frac{L}{\sqrt{d^2 + L^2}} \quad (\text{Eq. 4})$$

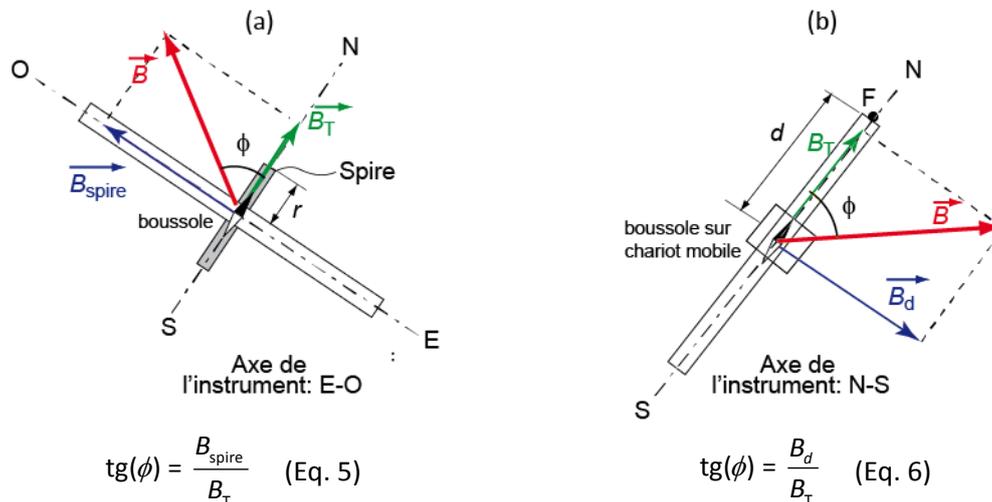


Figure 4: Alignement de la boussole des tangentes pour la mesure du champ magnétique terrestre (a, première partie de l'expérience) et pour la mesure du champ magnétique produit par un courant parcourant un fil rectiligne (b, deuxième partie de l'expérience). En (a), la spire est orientée selon le plan du méridien magnétique et l'axe de l'instrument dans la direction Est-Ouest. En (b), l'instrument est placé dans le plan Nord-Sud contenant le fil F.

3 Marche à suivre

L'expérience se déroulera en deux parties distinctes.

3.1) Mesure du champ magnétique terrestre

Dans un premier temps, il s'agira de mesurer la composante horizontale du champ magnétique terrestre. Pour cela, l'instrument sera aligné comme expliqué précédemment (Figure 4a), de façon à ce que la spire soit orientée selon la direction Nord-Sud. On mesurera l'angle de déviation de la boussole pour 8 valeurs différentes du courant circulant dans la spire (entre 1 et 8 A). Pour chaque courant, on fera la mesure pour les deux sens de circulation du courant (inversion du sens à l'aide du commutateur C) et on notera les angles de déviation ϕ^+ et ϕ^- correspondant. Estimez les incertitudes sur le courant (ΔI) et sur les angles mesurés ($\Delta\phi$).

Précautions à prendre:

- Tenir les téléphones portables et autres instruments électroniques à une distance d'au moins 1 m de la boussole.
- Utiliser un mètre en bois (pliable) à proximité de la boussole.

Faire les représentations de $\text{tg}(\phi^\pm) = f(I^\pm)$ sur deux graphiques, l'un à côté de l'autre avec les barres d'incertitudes correspondantes. Représentez la courbe de régression linéaire pour chaque graphique et en déduire B_T .

Remarque: Si le dispositif était parfaitement symétrique (spire, position), les déviations de l'aiguille seraient les mêmes, au signe près, sous l'inversion du sens du courant. Cela n'est pas tout-à-fait le cas, d'où l'importance de ne pas prendre une valeur moyenne des deux angles correspondants aux deux

sens du courant, mais de **déterminer une pente pour chaque sens du courant**. On prendra ensuite une valeur moyenne des deux pentes pour la détermination du champ terrestre.

Calcul d'erreur:

- Estimer les incertitudes de mesure sur r , I et ϕ ; en déduire l'incertitude sur $\text{tg}(\phi)$ à l'aide du fichier Excel de l'expérience.
- Représenter les barres d'incertitudes sur chaque point des graphiques et en tirer le résultat $B_T \pm \Delta B_T$ de la mesure du champ terrestre en appliquant les lois de propagation des incertitudes.

3.2) Champ magnétique produit par un fil rectiligne et dépendance en fonction de la distance

On cherchera à vérifier ici la relation (Eq. 4) pour une valeur du courant I parcourant un fil rectiligne vertical de demi-longueur L . Pour cela, la boussole doit être placée dans le plan Nord-Sud contenant le fil comme expliqué précédemment (Figure 4b). L'angle de déviation de la boussole sera mesuré pour différentes distances d entre la boussole et le fil obtenues en déplaçant le chariot supportant la boussole le long de l'axe de l'instrument. Pour chaque valeur de d , en déduire le champ B_d de façon analogue à la partie (3.1), en utilisant l'expression (Eq. 6) et la valeur de B_T obtenue précédemment.

Précautions à prendre:

- Tenir les téléphones portables et autres instruments électroniques à une distance d'au moins 1 m de la boussole.
- Utiliser un mètre en bois (pliable) à proximité de la boussole.

Faire les représentations de $B_d^\pm = f(1/d')$ sur deux graphiques, l'un à côté de l'autre, pour chaque sens du courant (I^+ et I^-). En déduire la pente moyenne à partir des droites de régression. Calculer la pente théorique de B_d en fonction de $1/d'$ en utilisant l'expression (Eq. 4). La grandeur $1/d'$ est la distance inverse modifiée:

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{d} \frac{L}{\sqrt{d^2 + L^2}}. \quad (\text{Eq. 7})$$

Discuter l'accord des résultats et les influences relatives des paramètres (L , d et I) sur le champ B_d calculé et mesuré.

Calcul d'erreur: Représenter les barres d'incertitudes sur chaque point expérimental du graphique en tenant compte des incertitudes sur L , d et ϕ en appliquant les lois de propagation des incertitudes implémentées dans le fichier Excel de l'expérience.

4 Préalable

Cette partie est à **préparer en avance**, avant la séance de TP, afin de gagner du temps lors de celle-ci. Les points concernant le calcul d'incertitude ne sont à considérer qu'à partir du moment où le calcul d'erreur a été introduit.

Partie	Descriptif
3.1)	Déterminer l'expression donnant le champ terrestre B_T à partir de la pente p du graphique $\text{tg}(\phi^\pm) = f(I^\pm)$ et des expressions (Eq. 5) et (Eq. 2).

Références

- Champ magnétique : http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magn%C3%A9tique
- Champ magnétique terrestre : http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magn%C3%A9tique_terrestre

Travaux Pratiques de Physique

Expérience N°6 : Boussole des tangentes

3.1) Composante horizontale du champ magnétique terrestre

Rayon de la spire: $r =$ [m]
 Incertitude sur le rayon de la spire: [m]
 Incertitude sur les courants mesurés: [A]
 Incertitude sur les angles mesurés: [°]

I [A]	ϕ^- [°]	$-\text{tg}(\phi^-)$	$\Delta \text{tg}(\phi^-)$	ϕ^+ [°]	$\text{tg}(\phi^+)$	$\Delta \text{tg}(\phi^+)$

Représentations graphiques : $\text{tg}(\phi^\pm) = f(I^\pm)$

insérer graphique '-' ici

insérer graphique '+' ici

$B_T =$	<input type="text"/>	[T]
$\Delta B_T =$	<input type="text"/>	[T]

Travaux Pratiques de Physique

Expérience N°6 : Boussole des tangentes

3.2) Champ magnétique produit par un fil rectiligne vertical

Demi-longueur du fil: $L =$ [m]
 Courant: $I =$ [A]
 Incertitude sur la demi-longueur du fil: [m]
 Incertitude sur les distances mesurées: [m]
 Incertitude sur le courant: [A]
 Incertitude sur les angles mesurés: [°]

d [m]	$1/d'$ [1/m]	$\Delta(1/d')$ [1/m]	ϕ^- [°]	$-B_d(\phi^-)$ [T]	$\Delta B_d(\phi^-)$ [T]	ϕ^+ [°]	$B_d(\phi^+)$ [T]	$\Delta B_d(\phi^+)$ [T]

Représentations graphiques : $B_d(\phi^\pm) = f(1/d')$

insérer graphique '-' ici

insérer graphique '+' ici

pente théorique = [T·m]

pente expérimentale = [T·m]
 Δpente expérimentale = [T·m]