Travaux pratiques | [I] TP n°1

Magnétisme et induction

Le TP dure 2/3 séances. Cet énoncé vous propose une série de manipulations autour du magnétisme et de l'induction, que vous pouvez traiter dans l'ordre de votre choix.

I - Étude d'une auto-induction

I.1 - Proportionnalité entre $\boldsymbol{i}$ et $\boldsymbol{B}$

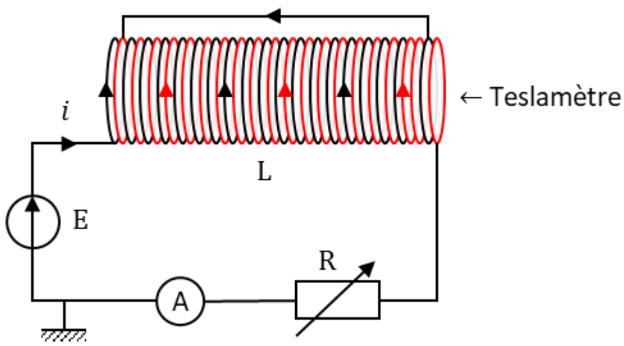
L'objectif de cette partie est de vérifier la relation de proportionnalité entre un courant i et la norme du champ magnétique propre B qu'il génère.

Munissez-vous d'une bobine longue de TP. Ces bobines possèdent deux enroulements imbriqués (un avec les bornes noires, un avec les bornes rouges. Nous allons mettre ces deux enroulements en série afin d'obtenir un unique enroulement d'inductance double.

Nous allons utiliser des fortes intensités (plusieurs ampères) !!

- **Ne jamais toucher les câbles lorsque le courant circule.**
- **Toujours éteindre l'alimentation avant de modifier le montage.**
- **Ne jamais dépasser l'ampérage maximal autorisé par les différents constituants, sous risque de les détériorer.**

- À l'aide de la bobine longue, réaliser le montage ci-contre. On utilisera une alimentation de courant/tension continu, ainsi qu'un rhéostat (initialement réglé sur sa valeur de résistance maximale).
- Placer au centre de la bobine un teslamètre.
- Faire varier U et/ou R afin de faire varier l'intensité et tracer la droite $\mathrm{B} = f(i)$. **Ne pas effacer la courbe.**



<u>Remarque</u> : on peut vérifier rapidement que si les deux enroulements sont branchés dans le sens inverse, les deux champs magnétiques générés ont la même amplitude mais sont de sens opposé. Ainsi, $\mathrm{B} = 0$.

I.2 - Mesure de coefficient d'auto-induction $\mathbf{L}$ d'une bobine longue

Pour une bobine longue, le champ magnétique propre est uniforme à l'intérieur ($\mathrm{B_{int}} = \mathrm{cte}$) et nul à l'extérieur ($\mathrm{B_{ext}} = 0$). On rappelle que :

$$\boxed{\vec{\mathrm{B}}_{\mathrm{int}} = \mu_0 \frac{\mathrm{Ni}}{\mathrm{d}} = \mu_0 \mathrm{ni}\, \vec{\mathrm{u}}_{\mathrm{axe}}}$$

avec :

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \mathrm{H \cdot m^{-1}}$ la perméabilité magnétique du vide ;
- N le nombre total de spire ;
- d la longueur de la bobine ;
- $\mathrm{n} = \mathrm{N/d}$ la **densité linéique de spire** (c'est-à-dire le nombre de spire par unité de longueur).

- À l'aide du Teslamètre, vérifier que $|\vec{\mathrm{B}}_{\mathrm{int}}| = \mathrm{cte}$ et que $\vec{\mathrm{B}}_{\mathrm{ext}} = \vec{0}$.

À l'aide des données de la partie précédente, déterminer et tracer le flux : $\phi = f(i)$.

Rappeler la définition du coefficient d'inductance propre L et le déterminer à l'aide du graphe précédent.

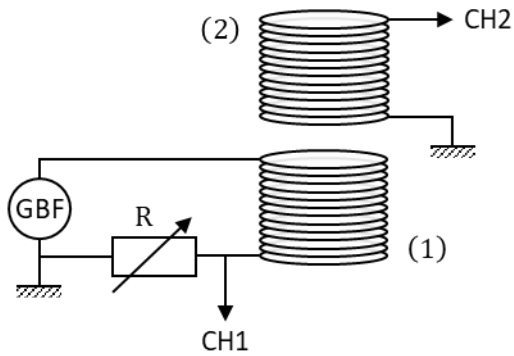
II - Étude d'une inductance mutuelle

II.1 - Lien entre e et ϕ

Lorsqu'un circuit est traversé par un flux ϕ, une force électromotrice e apparait, donnée par la loi de Faraday :

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

L'objectif de cette partie est de vérifier que $e_2 \propto \frac{di_1}{dt}$. On utilisera pour cela les bobines « traditionnelles » de TP.



Réaliser le montage ci-contre. Placer les deux bobines l'une au-dessus de l'autre. On pourra placer un morceau de fer feuilleté dans l'axe commun des deux bobines pour canaliser les lignes de champ. Observer les tensions CH1 ($\propto$ à l'intensité i_1) et CH2 (ddp aux bornes de la bobine) à l'oscilloscope.

Envoyer dans le circuit (1) un signal triangle de fréquence 10 Hz et d'amplitude 20 V. Vérifier que l'on observe un signal proportionnel à la dérivée de ce signal dans le circuit (2).

II.2 - Coefficient d'inductance mutuelle $\mathbf{M}$

Reprendre le même montage. Envoyer une tension sinusoïdale à 1 kHz.

La fem (en convention générateur) qui apparait dans le circuit 2 vaut :

$$e_2 = -\mathrm{L}_2 \frac{di_2}{dt} - \mathrm{M} \frac{di_1}{dt}$$

Or, la bobine du circuit (2) est branchée sur une impédance infinie, donc $i_2 = 0$. De plus, $i_1 = \mathrm{I}_0 \cos(\omega \mathrm{t})$, donc $\frac{di_1}{dt} = -\mathrm{I}_0 \omega \sin(\omega \mathrm{t})$. Ainsi :

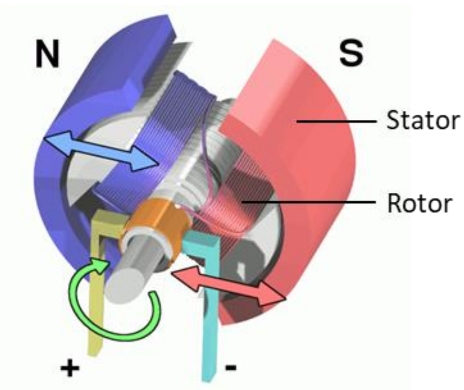
$$e_2 = \mathrm{MI}_0 \omega \sin(\omega \mathrm{t})$$

On observe donc sur la voie une sinusoïde en quadrature de phase avec CH1 (du fait de la dérivée temporelle), d'amplitude d'autant plus élevée que M est grand.

Observer comment M varie lorsqu'on change la configuration relative des deux circuits.

III - Moteurs électriques

III.1 - Machine à courant continu (MCC)



Un moteur à courant continu est constitué d'un aimant permanent (le **stator**) et d'un cadre conducteur (le **rotor**) alimenté par un courant continu. Le champ magnétique créé par l'aimant exerce sur le cadre conducteur des forces de Laplace dont le couple met le rotor en rotation.

De conception simple, le moteur à courant continu a été très utilisé jusque dans les années 80 où il a progressivement été remplacé par des moteurs à courant alternatif. Cependant, il reste utilisé dans certains domaines car il est très robuste (durée de vie d'environ 50 ans), peut être utilisé à vitesse variable et se prête très bien aux applications de forte puissance.

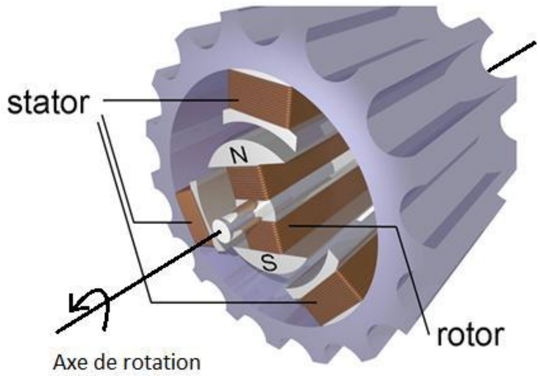
On trouve actuellement des moteurs à courant continu dans les machines d'enrouleur (télésièges, téléphériques), dans certains moteurs de traction ferroviaire, dans divers appareils de manutention (grues, ascenseurs de la Tour Eiffel).

- Créer un modèle de moteur à courant continu à l'aide du matériel disponible. **Attention : le fil chauffe beaucoup lorsqu'on l'alimente, ne pas le toucher avec les doigts !**

Remarque : la MCC peut être utilisée en tant que moment (un courant continu génère une rotation mécanique) ou comme générateur (une rotation mécanique génère un courant électrique).

III.2 - Moteur synchrone

Un moteur synchrone est constitué de plusieurs bobines (le stator), dont les axes se croisent en un point, alimentées par un courant sinusoïdal. Le champ total créé par les bobines est alors un champ magnétique tournant. Au point où se croisent les axes des bobines, un aimant (le rotor) est placé. Cet aimant subit un couple le faisant s'aligner avec le champ magnétique tournant. Il est donc mis en rotation et sa fréquence de rotation est la même que la fréquence du champ magnétique tournant et du courant sinusoïdal qui le crée.



De même que pour la MCC, les machines synchrones peuvent être utilisées en fonctionnement moteur ou générateur.

Le moteur synchrone est utilisé dans les moteurs de TGV, d'ascenseurs ou encore dans ceux de certaines voitures hybrides. Cependant, l'utilisation la plus courante de la machine synchrone est son utilisation comme alternateur (fonctionnement générateur) : utilisée dans les centrales électriques, mais aussi dans les groupes électrogènes ou les batteries de voitures, elle permet alors de produire de l'électricité.

Nous allons réaliser ici un moteur synchrone à l'aide de 2 bobines (exemple du cours) au lieu de 3 (image ci-dessous ou exemple du TD).

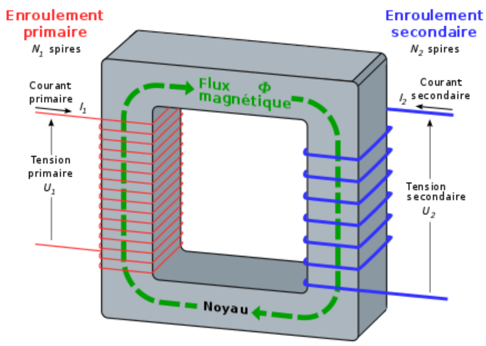
- À l'aide des deux voies du GBF, injecter dans deux bobines deux signaux sinusoïdaux de même amplitude et déphasés de $\pi/2$. Choisir une fréquence de 5 Hz environ.

IV - Utilisation d'un transformateur d'isolement

IV.1 - Rappel théorique

Un transformateur parfait permet de réaliser des conversions de tension sans perte de puissance. On définit le rapport de transformation m :

$$\mathrm{m} = \frac{\mathrm{U}_2}{\mathrm{U}_1} = \frac{\mathrm{N}_2}{\mathrm{N}_1}$$



L'électricité peut ainsi être transportée sur de longues distances à haute tension (afin de limiter l'effet Joule) et distribuée au consommateur à faible tension (pour des questions de sécurité).

Un transformateur peut également posséder un rapport de transformation $m = 1$. On parle alors de transformateur d'isolement. Cela permet d'isoler un montage électrique du reste du réseau.

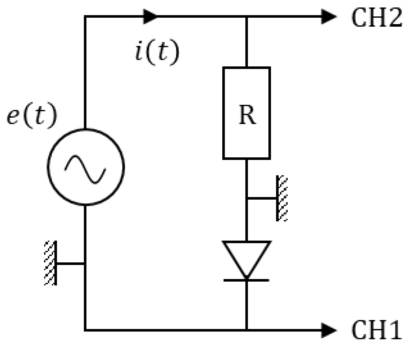
- À l'aide de 2 bobines et d'un tore en fer feuilleté, réaliser un transformateur d'isolement. Appliquer au primaire une tension sinusoïdale de fréquence 100 Hz et d'amplitude 15 V.
- Observer les tensions U_1 et U_2 à l'oscilloscope pour vérifier que le rapport des tensions est (approximativement, dans un monde idéal) égal à 1.

Dans le cadre des TP, un transformateur d'isolement permet d'isoler un circuit (2) de la masse du BGF alimentant un circuit 1. Ainsi, tout se passe comme si le circuit (2) était alimenté par un GBF (l'enroulement secondaire, qui produit une fem) sans masse. On peut alors, dans le circuit 2, choisir de placer la masse où cela nous arrange.

IV.2 - Mesure de la caractéristique d'une diode

On souhaite réaliser l'acquisition en temps réel de la caractéristique courant-tension d'une diode IN 4003. Pour cela, il est nécessaire d'acquérir simultanément la tension $u(t)$ aux bornes de la diode et le courant $i(t)$ la traversant.

On peut naïvement penser à réaliser le montage ci-contre.

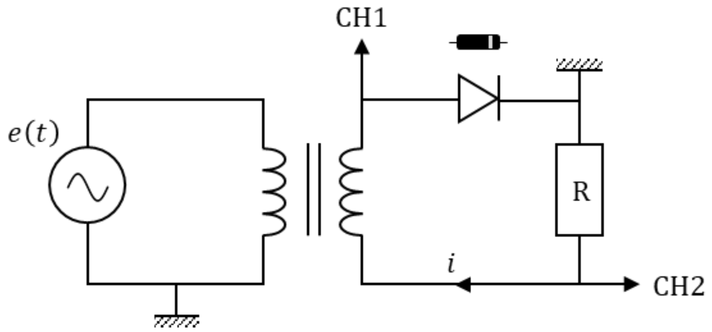


Dans ce montage, on alimente un circuit possédant une résistance et une diode. Pour mesurer simultanément $u(t)$ et $i(t)$, il faudrait connecter l'oscilloscope aux points CH1 et CH2 de la figure, et ainsi introduire une deuxième masse entre la résistance et la diode. La diode se retrouve alors court-circuité.

Pour résoudre ce problème, nous allons utiliser un transformateur d'isolement.

- Réaliser le montage ci-dessous. **Attention** au sens de branchement de la diode (bien repérer où se trouve la bande grise) !

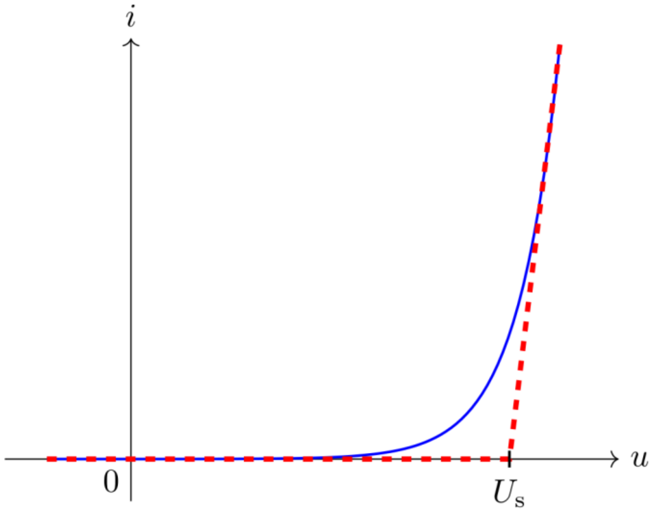
La voie CH1 mesure directement la tension $u(t)$ aux bornes de la diode. La voie CH2 mesure une tension proportionnelle à l'inverse de l'intensité (résistance en convention générateur : $u_{\mathrm{CH2}} = -\mathrm{R}i$).



- Sur l'oscilloscope, dans le menu de CH2, « inverser » la voie. Cela permet de tracer $-\mathrm{CH2}$ au lieu de $+\mathrm{CH2}$.

On peut à présent tracer $i(t)$ en fonction de $u(t)$, c'est-à-dire tracer $-\mathrm{CH2}$ en fonction de CH1.

- Sur affichage, sélectionner le mode XY. Jouer sur les réglages des calibres des voies CH1 et CH2 afin d'afficher la caractéristique de la diode, rappelée ci-dessous.



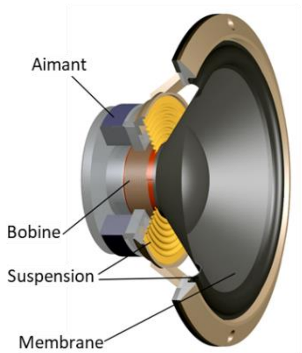
L'équation de la caractéristique dans les limites de fonctionnement usuel est :

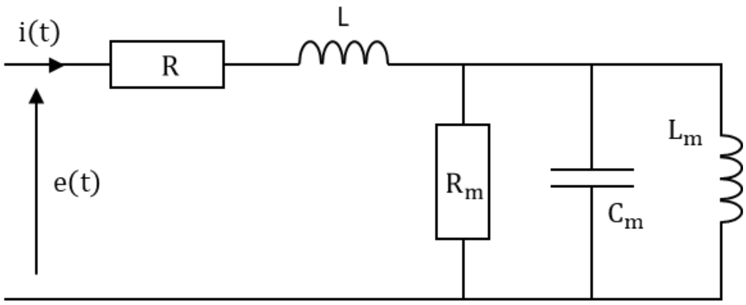
$$i(u) = \mathrm{I_0}\left(\exp\left(\frac{\mathrm{u}}{\mathrm{U_s}}\right) - 1\right)$$

où la tension $\mathrm{U_s}$ est la tension de seuil de la diode (de l'ordre de $0{,}6\ \mathrm{V}$), et $\mathrm{I_0}$ est de l'ordre de $100\ \mathrm{nA}$.

V - Etude de l'impédance d'un haut-parleur

Un haut-parleur est un appareil électromécanique qui transforme un signal électrique en signal sonore. La production du son est obtenue par le déplaçant d'une membrane dans l'air. Un aimant permanent (à symétrie de révolution) crée un champ magnétique permanent dans lequel se déplace l'équipage mobile constitué d'une bobine et relié à la membrane par un ressort.





Avec :

$$R_m = \frac{a^2 B^2}{\alpha} \qquad L_m = \frac{a^2 B^2}{k} \qquad C_m = \frac{m}{a^2\, B^2} \qquad \text{et : } a = 2\pi N r_0$$

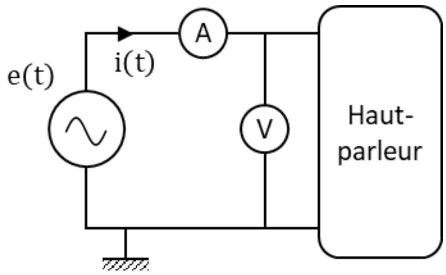
Nous avons montré en cours qu'un haut-parleur électrodynamique était entièrement équivalent au filtre électrique ci-dessus. L'impédance d'entrée de ce filtre vaut :

$$\underline{Z_e}(\omega) = \frac{\underline{e}(\omega)}{\underline{i}(\omega)} = R + j\omega L + \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{j\omega L_m} + j\omega C_m\right)^{-1} = R + j\omega L + \frac{R_m}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

Exprimer ω_0 et Q en fonction de R_m, L_m et C_m. Quel type de filtre reconnaissez-vous ?

L'objectif de cette partie est d'étudier expérimentalement ce filtre.

Réaliser le montage ci-contre.



Remarque : ici, il est fondamental de mesurer la tension aux bornes du GBF de ne pas faire confiance à ce qu'indique l'affichage du GBF. En effet, l'impédance du haut-parleur varie typiquement entre 10 et 50 Ω, elle est donc inférieure / du même ordre de grandeur que la résistance interne du GBF. Ainsi, plus de la moitié de la puissance fournie par le GBF est perdue dans sa résistance interne (et cela varie avec la fréquence).

Mesurer les valeurs efficaces E_{eff} et I_{eff} pour des fréquences allant de 10 Hz à 20 kHz. Choisir l'amplitude du signal d'entrée en fonction de la pénibilité du bruit (20 V aux basses fréquences, mais moins autour de 1 kHz …). Choisir des fréquences régulièrement espacées (en échelle logarithmique) : 10, 20, 30, …, 100, 200, 300, …, 1000, 2000 Hz.

Tracer $Z = E_{eff}/I_{eff}$ en fonction de la fréquence en échelle log-log.

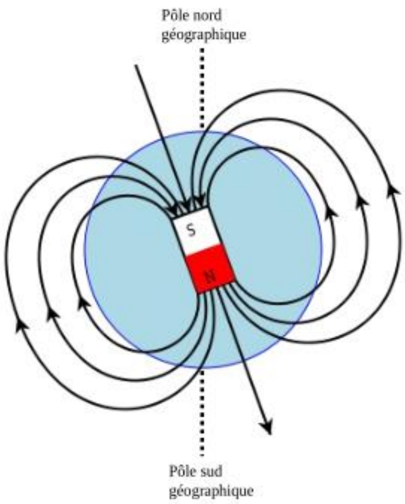
Pourquoi cette courbe d'impédance n'est-elle pas en cohérence avec l'intensité du son perçu par votre oreille lors des mesures ?

Facultatif : En analysant cette courbe, et en complétant éventuellement avec d'autres mesures simples (et rapides), en déduire les caractéristiques du haut-parleur : R, L, R_m, ω_0 et Q.

VI - Bobines de Helmholtz : mesure du champ magnétique terrestre

VI.1 - Préambule théorique

a) Le champ magnétique terrestre (pour la culture)



Le champ magnétique terrestre est dû à un effet appelé, dans le domaine de la magnétohydrodynamique (domaine qui mêle électromagnétisme et dynamique des fluides), « effet dynamo » : le noyau externe de la Terre (3 000 km à 5 000 km de profondeur) est un liquide conducteur essentiellement composé de fer dont le mouvement crée un champ magnétique.

Le champ magnétique terrestre est d'une grande importance puisqu'il protège la Terre des vents solaires. Le Soleil émet des particules ionisées (plasma) d'hydrogène et d'hélium et ces émissions (appelés « vents solaires ») sont si fortes qu'elles seraient capables de faire perdre à la Terre son atmosphère. Heureusement, le champ magnétique terrestre dévie les particules ionisées qui subissent alors la force de Lorentz et les emmène vers les pôles (où leurs interactions avec l'ionosphère forment les aurores boréales et australes). Le champ magnétique terrestre forme ainsi un bouclier protégeant la Terre.

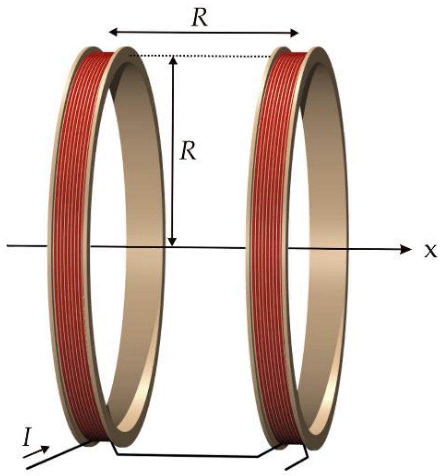
Le champ magnétique sert aussi à certains animaux pour se repérer (oiseaux migrateurs, abeilles, bactérie magnétotactique, technique de chasse du renard des neiges, …).

En première approximation, on peut modéliser le champ créé par la Terre comme le champ magnétique créé par un aimant placé au centre de la Terre de moment magnétique $\vec{\mu}$ de norme $8 \cdot 10^{22}\ \mathrm{A \cdot m^2}$. L'axe de l'aimant n'est pas exactement aligné avec l'axe de rotation de la Terre sur elle-même mais forme un angle d'environ 12° avec celui-ci (varie au cours du temps).

Si l'on place une boussole (petit aimant) en un point de la surface de la Terre, cette boussole s'alignera avec la ligne de champ magnétique passant par elle et indiquera le sud magnétique, c'est-à-dire le nord géographique (ou presque, le pôle sud magnétique se situe dans le Canada).

Si l'on « zoom » sur la ligne de champ magnétique qui traverse le lycée Corot, on remarque que le champ magnétique n'est pas parallèle au sol mais a une composante horizontale et une composante verticale. Pour qu'une boussole indique le nord (géographique), il faut qu'elle s'aligne seulement avec la composante horizontale donc il faut qu'elle soit équilibrée (sinon elle penche vers le bas). C'est cette composante horizontale que nous allons mesurer ici. La composante horizontale vaut, à Paris : $\boxed{\mathrm{B_{T,\parallel}} = 2{,}1 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{T}}$ alors que le champ total vaut $\mathrm{B_T} = 4{,}7 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{T}$ et est incliné vers le bas d'un angle de 64° par rapport à l'horizontale.

b) Les bobines de Helmholtz



Les bobines de Helmholtz sont un dispositif constitué de deux bobines circulaires plates, de même rayon R et placées l'une en face de l'autre.

Une bobine plate crée sur son axe (Ox) un champ magnétique :

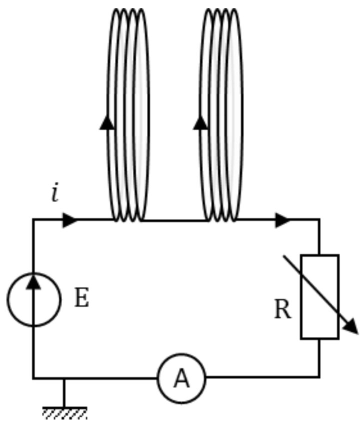
$$\vec{\mathrm{B}}(\mathrm{z}) = \frac{\mu_0 \mathrm{Ni}}{2\mathrm{R}} \left(1 + \left(\frac{\mathrm{x}}{\mathrm{R}}\right)^2\right)^{-3/2} \vec{\mathrm{u}}_\mathrm{x}$$

Avec N le nombre de spires.

Lorsque les bobines sont alimentées dans le même sens, et qu'elles sont espacées d'une distance $\mathrm{D} = \mathrm{R}$, le champ magnétique crée au milieu du dispositif est relativement homogène.

- Utiliser le programme python (fourni dans le dossier commun) pour visualiser l'influence du rapport $\mathrm{D/R}$ sur l'allure du champ magnétique. Vérifier que le champ est uniforme au centre du dispositif lorsque $\mathrm{D/R} = 1$.

<u>Remarque</u> : on peut inverser le sens du courant dans l'une des bobines pour créer un gradient de champ (champ qui varie linéairement dans l'espace).



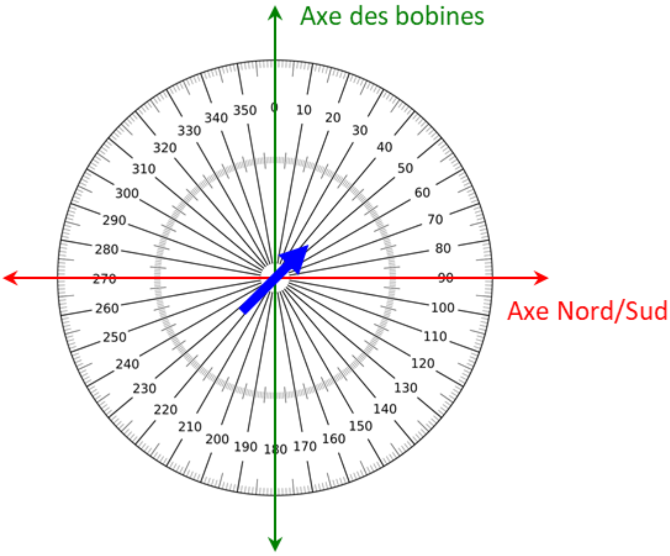
- Réaliser le montage ci-contre. On utilisera une alimentation de courant/ tension continu, ainsi qu'un rhéostat (initialement réglé sur sa valeur de résistance maximale). Se placer dans le cas où $\mathrm{D/R} = 1$.
- Choisir i le plus grand possible (**en respectant les ampérages autorisés par les différents appareils !**) et mesurer la courbe $B = f(x)$. Vérifier que l'on obtient bien la même allure que dans la simulation Python.
- Tracer la courbe $\mathrm{B(x = 0)} = f(i)$. **Conserver cette courbe**.

Dans la suite, nous ne mesurerons que l'intensité i traversant les bobines et cette courbe sera alors utilisée pour connaitre le champ magnétique correspondant.

VI.2 - Méthode de la déviation à 45 °

Imaginons que les bobines de Helmholtz soient placées perpendiculairement à l'axe Nord/Sud. On place une boussole au centre des bobines et on règle l'intensité (et donc le champ magnétique) de sorte à ce que la boussole dévie de 45 ° par rapport au Nord (schéma ci-contre).

- Compléter la figure ci-après en faisant apparaitre $\mathrm{B_{T,\parallel}}$, $\mathrm{B_{Helm}}$ et $\mathrm{B_{tot}}$. En déduire une relation entre $\mathrm{B_{T,\parallel}}$ et le champ créé par le dispositif $\mathrm{B_{Helm}}$.



Nous allons utiliser ce principe pour mesurer $B_{T,\parallel}$.

Réaliser la manipulation suivante.

- Prendre le disque en bois sur lequel se trouve un rapporteur.
  Placer une boussole sur la pointe centrale.
- Placer la boussole sur l'axe des bobines non alimentées. La boussole s'aligne sur le champ magnétique terrestre. Tourner l'ensemble du dispositif de manière à ce que l'axe des bobines soit perpendiculaire à la boussole et que la direction de la boussole corresponde à $\theta = 0\,°$.
- Alimenter les bobines avec une tension continue. Alimenter les bobines et mesurer la valeur de l'intensité permettant d'aligner la boussole sur une des lignes à $\pm\,45\,°$.
- Inverser le sens de branchement des deux bobines et rependre l'étape précédente. En déduire la valeur moyenne de l'intensité permettant de dévier de $45\,°$ la boussole.
- En déduire la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

<u>Remarque</u> : au lieu de placer une boussole vous pouvez utiliser le capteur de champ magnétique présent dans votre smartphone. Utiliser pour cela n'importe quelle application affichant une boussole (par exemple : **Physics Toolbox**, qui propose également l'utilisation de tous les autres capteurs du téléphone).

VI.3 - Méthode de la période d'oscillation

L'étude des bobines de Helmholtz et de la méthode présentée dans cette partie ont fait l'objet de la première partie du sujet de Centrale PC 2016.

Cette dernière partie est à faire uniquement en cas de temps restant !

Étude préliminaire

On place une boussole dans le champ magnétique terrestre $\vec{B}_{T,\parallel} = B_{T,\parallel}\,\vec{e}_z$ et on ajoute, à l'aide des bobines de Helmholtz, un champ magnétique $\vec{B}_{\pm} = \pm\,B_{Helm}\,\vec{e}_z$, aligné parallèlement ou antiparallèlement au champ magnétique $\vec{B}_{T,\parallel}$ (selon le sens du passage du courant). On suppose que $B_{Helm} < B_{T,\parallel}$.

L'angle θ que fait la boussole de moment d'inertie J_z et de moment magnétique $\vec{\mu}$ est alors régit par l'équation différentielle :

$$J_z\,\ddot{\theta} = -\mu\left(B_{T,\parallel} \pm B_{Helm}\right)\,\sin(\theta)$$

Dans l'approximation des petites oscillations, l'équation devient :

$$\ddot{\theta} + (\omega_{\pm})^2\,\theta = 0 \quad \text{avec :} \quad \omega_{\pm} = \sqrt{\frac{\mu\left(B_{T,\parallel} \pm B_{Helm}\right)}{J_z}}$$

On reconnait l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique de pulsation propre $\omega_{\pm}$. En notant $T_{\pm}$ la période des oscillations, il vient :

$$\frac{T_-}{T_+} = \sqrt{\frac{B_{T,\parallel} + B_{Helm}}{B_{T,\parallel} - B_{Helm}}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{B_{T,\parallel} = B_{Helm}\,\frac{(T_+)^2 - (T_-)^2}{(T_+)^2 + (T_-)^2}}$$

Quel est l'intérêt d'une telle méthode ?

Réalisation expérimentale

Réaliser la manipulation suivante.

- Placer la boussole sur l'axe des bobines non alimentées. La boussole s'aligne sur le champ magnétique terrestre. Tourner l'ensemble du dispositif de manière à ce que l'axe des bobines soit aligné avec celui de la boussole.
- Alimenter les bobines avec une tension continue U convenablement choisie pour satisfaire la condition $B_{Helm} < B_{T,\parallel}$.
- Écarter la boussole de sa position d'équilibre. Mesurer la période T_+ des oscillations et la valeur du champ magnétique B_{Helm} créé par les bobines (via la valeur de i et de la droite d'étalonnage réalisée précédemment). Recommencer l'expérience avec en alimentant les bobines dans le sens opposé. Mesurer la période T_- d'oscillation associée.
- En déduire la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

Défi personnel !

À l'aide d'une mesure du champ magnétique sur votre smartphone (Physics Toolbox, Phyphox), mesurer le champ magnétique généré par le rail d'alimentation du métro de Paris.

On donne la formule suivante. Il s'agit du champ magnétique créé par un fil de longueur infini et parcouru par un courant d'intensité i.

$$B = \mu_0 \frac{i}{2\pi r}$$

Avec r la distance au rail (typiquement $1\ \mathrm{m}$ lorsqu'on se trouve dans le métro).

En déduire la valeur de l'intensité i alimentant le métro de Paris.

<u>Remarque</u> : ne pas oublier de prendre en compte le champ magnétique terrestre, s'il se trouve être du même ordre de grandeur que le champ total mesuré !