
Magnétisme

- Bertin Faroux Renault, *Électromagnétisme 4*
- Rocard, *Électricité*
- Fleury Mathieu, *Électrostatique, courants continus, magnétisme (T 6)*

Un champ magnétique a potentiellement deux sources microscopiques différentes : des courants électriques (par exemple le champ créé par une bobine parcourue par un courant), et des moments magnétiques intrinsèques, appelés *spins* (par exemple le champ créé par un matériau ferromagnétique). Si ces deux sources sont très différentes microscopiquement, elles peuvent être traitées avec le même formalisme à l'échelle macroscopique.

Dans ce TP, on s'intéressera d'abord aux appareils permettant de mesurer un champ magnétique ainsi que les différentes sources disponibles. Par la suite, on se concentre sur les réponses possibles des matériaux en présence d'un champ (para, dia, ferromagnétisme).

I) Mesure et production d'un champ magnétique

1) Méthodes de mesure

Pour mesurer un champ magnétique, on peut utiliser différents processus physiques :

- **l'effet Hall** : les sondes les plus courantes sont les teslamètres à effet Hall, constitués essentiellement d'un capteur à effet Hall traversé par un courant constant, et d'un circuit d'amplification de la tension de Hall (consulter la notice) ;
- **effet inductif** : en déplaçant une bobine exploratrice dans un champ magnétique non-uniforme, il se crée une f.é.m. à ses bornes. L'intégration de la f.é.m. induite dans la bobine donne la variation du flux du champ magnétique. On appelle ce capteur un *fluxmètre*. Cette intégration est réalisée avec un circuit à amplificateur opérationnel. La sensibilité de ce fluxmètre électronique est contrôlée en changeant la surface totale S de la bobine exploratrice. ;
- la **magnétorésistance** : certains matériaux ont une résistance R qui dépend du champ magnétique B . La variation est non-linéaire (typiquement quadratique), on pourra alors soit utiliser l'abaque (peu précis) du constructeur, soit procéder à un étalonnage $R(B)$. Attention à travailler à courant suffisamment faible pour éviter une dérive en température de la magnétorésistance. Consulter la notice ;
- la **balance de Cotton** : on ne la propose pas ici ;
- le **SQUID** : le principe de fonctionnement du SQUID est basé sur la quantification du flux magnétique dans un anneau supraconducteur (basse température). Il permet la mesure de champs magnétiques très faibles. On n'en dispose pas (plus) ici.

Pendant l'année de préparation, vous utiliserez en pratique seulement les deux premières méthodes de mesures.

2) [1P] Une première source : les aimants

Mesurer le champ magnétique dans l'entrefer d'un aimant permanent en utilisant deux appareils de mesure : le teslamètre à effet Hall et le fluxmètre. Comparer les valeurs obtenues.

Quel capteur utiliser pour mesurer le champ magnétique à l'intérieur du fer d'un aimant ?

3) [1P] Champ magnétique créé par des courants : bobines de Helmholtz

On utilise deux bobines circulaires identiques, de rayon R , qui peuvent coulisser parallèlement à leur axe sur des rails, et dont l'écartement D est mesurable.

À l'aide d'un teslamètre (à effet Hall) dont la géométrie permet de déplacer la sonde sur l'axe des bobines en repérant sa position, tracer point par point la courbe donnant le champ magnétique sur l'axe dans différents cas :

- une bobine seule,
- les 2 bobines à distance quelconque,
- les 2 bobines réglées en configuration Helmholtz : $D = R$ (Les branchements doivent être faits tels que les bobines créent des champs magnétiques de même sens. Dans le cas contraire, on parle de configuration anti-Helmholtz.). Que peut-on dire du champ entre les deux bobines ?

Rappel : pour une bobine (considérée plate, à vérifier dans les conditions de l'expérience) possédant N spires, et en notant θ l'angle entre l'axe de la bobine et la droite joignant le point M à la bobine, on a

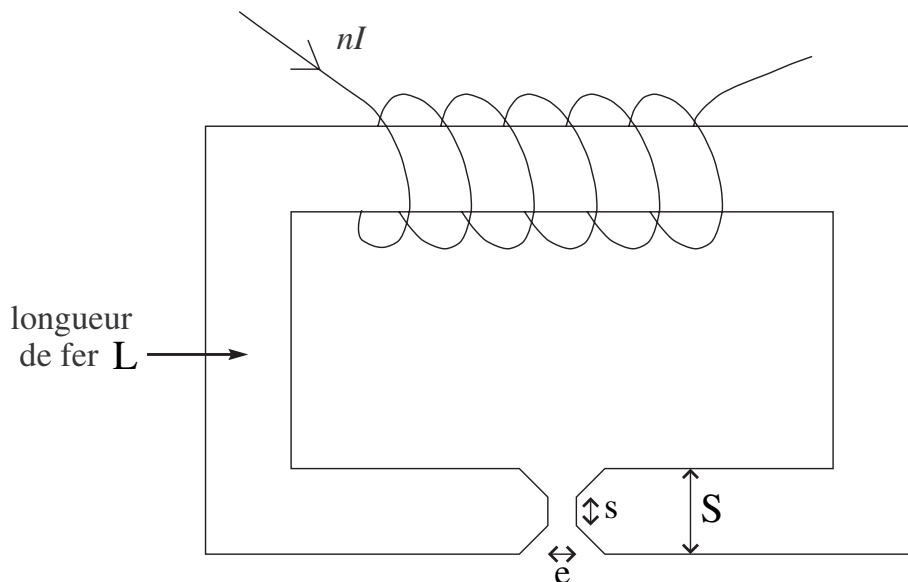
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N I}{2R} \sin^3(\theta) \vec{u}_z.$$

Lorsque les dimensions de la bobine ne permettent pas de l'assimiler à une bobine plate, on privilégiera la formule du solénoïde fini.

Remarque : Il est possible d'automatiser cette mesure en utilisant une table traçante, sur laquelle on aura fixé la sonde à effet Hall. Ne pas effectuer cette manipulation dans un premier temps, mais on pourra la mettre en place pendant la période de préparation des oraux.

4) [1P] Électroaimant : une source fiable de forts champs magnétiques

Un électroaimant est un exemple de circuit magnétique ouvert. Il est composé de grosses bobines de cuivre dans lesquelles on a placé un élément de fer formant presque un circuit fermé. On propose d'étudier le champ magnétique dans l'entrefer.



Démontrer, en utilisant le théorème d'Ampère et la conservation du flux magnétique, que :

$$B \approx \frac{\mu_0 n I}{\frac{L}{\mu_r s} + e}. \quad (1)$$

Le circuit étant ferromagnétique, on peut poser en absence de saturation que $\mu_r \gg 1$, d'où :

$$B \approx \frac{\mu_0 n I}{e} . \quad (2)$$

Voir la notice de l'électroaimant. Attention, les deux bobines de 5600 spires sont en parallèle et sont donc équivalentes à 11200 spires parcourues par le courant moitié.

Réaliser les expériences décrites ci-dessous avec les pièces polaires tronconiques ($s/S = 1/4$) :

- c'est la configuration qui permet d'atteindre les champs les plus grands, ce qui est intéressant à étudier.
- c'est celle où le passage de (1) à (2) a le plus grand domaine de validité en e (par le terme s/S). (les pièces polaires cylindriques seront utilisées lorsque l'on cherchera un grand domaine de champ uniforme). On fera varier l'épaisseur e entre environ 1 cm (afin de pouvoir glisser la sonde à effet Hall) et 4 cm (diamètre des pièces polaires). On limitera le courant à 4 A (5 A en régime non permanent).

Commencer par faire un calcul d'ordre de grandeur de $\frac{L}{\mu_r} \frac{s}{S}$ sachant que $L \simeq 1,40$ m (à vérifier) et qu'on a typiquement $\mu_r > 1000$. Conclure.

Courbe $B = f(I)$ à e constant :

Mesurer B en fonction de I en prenant la plus petite valeur de e .

La courbe commence par une zone linéaire. Interpréter et en déduire le nombre de spires.

Comment peut-on expliquer que la courbe s'incline pour les fortes intensités ? En déduire un ordre de grandeur de μ_r à l'intensité maximale (la valeur de μ_r à faible intensité n'est pas mesurable ici).

Courbe $\frac{1}{B} = f(e)$ à I constant :

Mesurer B en fonction de e en prenant une faible valeur de I afin de travailler à coup sûr loin de la saturation (1 A au maximum comme on peut le voir sur la notice p.9).

Pour vérifier l'expression (1), représenter $1/B$ en fonction de e . Faire un ajustement linéaire. Cette loi est-elle validée ? De la pente déduire le nombre de spires.

De l'ordonnée à l'origine on peut en déduire μ_r , cependant l'expérience montre que ceci conduit le plus souvent à un résultat absurde : il n'est pas rare de trouver une valeur de μ_r négative ou nettement inférieure à 1000. En réalité la formule (1) est approchée et de plus μ_r subit des variations complexes, même en faible courant, ce qui perturbe gravement la faible ordonnée à l'origine même si les points semblent convenablement alignés. Un choix raisonnable des incertitudes doit conduire à la possibilité d'une ordonnée à l'origine nulle, ce qui traduit le fait que μ_r est trop grand pour pouvoir être déterminé ici. En déduire que dans ces conditions le produit Be est constant à I donné.

On peut aussi s'intéresser qualitativement au domaine dans lequel le champ peut spatialement être considéré comme uniforme, en particulier lorsque e devient grand.

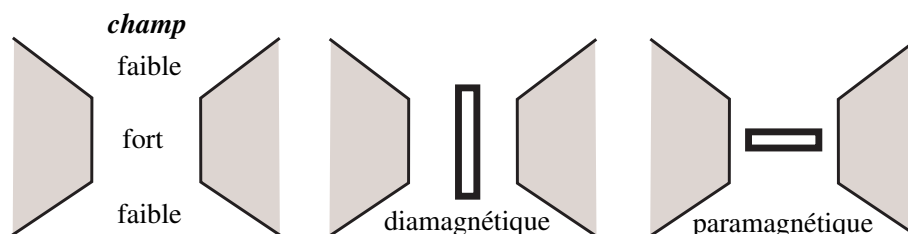
II) Diamagnétisme, Paramagnétisme

Tous les matériaux sont magnétiques puisque constitués d'éléments présentant des moments magnétiques microscopiques. Ces moments peuvent provenir du spin des particules, ou d'une contribution orbitale. Si ces moments n'interagissent que faiblement, le matériau associé ne peut pas avoir d'aimantation spontanée (i.e., en l'absence de champ magnétique extérieur). De plus, la réponse magnétique de ce matériau à un champ extérieur est faible : il s'agit d'un système paramagnétique ou

diamagnétique.

1) [1P] Mise en évidence (qualitatif)

À l'aide d'un fil sans torsion, suspendre par le milieu un barreau diamagnétique ou paramagnétique dans l'entrefer d'un électroaimant. On observe les déplacements suivants :



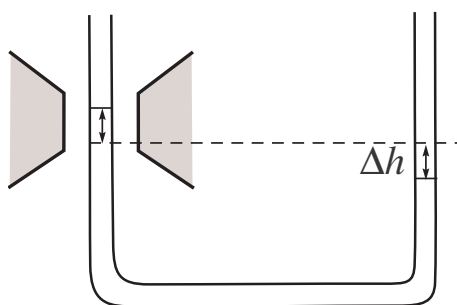
Le barreau diamagnétique se place dans les régions de champ faible, et le barreau paramagnétique dans les régions de champ fort. Il est nécessaire d'utiliser ici les pièces polaires coniques pour avoir de fortes inhomogénéités de champ : comment sont alors les lignes de champ ?

2) [1P] Mesure de la susceptibilité d'un milieu paramagnétique

Référence : BFR, Électromagnétisme 4, chap. 6

Choisir les pièces polaires tronconiques (Pourquoi ?). Placer entre elles une branche d'un tube en U contenant une solution de FeCl_3 , de concentration et de masse volumique connues. On choisira un écartement de pôles assez faible mais sans risque de casse pour le tube (sachant que les entrefers se rapprochent lorsque l'électroaimant est en marche).

Mesurer la dénivellation produite par un champ magnétique en projetant sur un écran la branche située hors de l'entrefer, sur laquelle a été fixé un régllet transparent. Le but est de déterminer d'abord la susceptibilité de la solution, puis d'en déduire, assez grossièrement, la susceptibilité de FeCl_3 solide.



Mesurer le champ dans l'entrefer à l'aide du teslamètre à effet Hall ; bien choisir le niveau d'affleurement **dans l'état final** du liquide au centre de l'entrefer. La susceptibilité de la solution est donnée (dans le système SI) par la relation :

$$\chi \frac{B^2}{2\mu_0} = \rho g \Delta h$$

(Refaire le calcul : que représente exactement B dans cette équation ? Pourquoi l'entrefer doit-il être centré sur la surface libre ? Éventuellement reprendre l'expérience en décalant le tube en U de plusieurs cm vers le haut.).

Remarque : il faut faire attention à la définition de χ . Dans le système international d'unités, χ est un nombre sans dimension (il peut être pratique de le considérer comme un moment magnétique par unité de volume dans un champ de 1 A.m^{-1}). On le calcule à partir de χ_{solide} , la susceptibilité du solide, en appliquant une loi approchée d'additivité des moments magnétiques (loi de Wiedman) : cela suppose que les moments magnétiques n'interagissent pas. L'eau ne jouant qu'un rôle de dilution on a :

$$\frac{\chi_{\text{solide}}}{\chi_{\text{solution}}} = \frac{\rho_{\text{solide}}}{d \times \rho_{\text{eau}} \times r}$$

où d est la densité de la solution et r le pourcentage *en masse* de FeCl_3 dans la solution (savoir retrouver cette formule, qui ne figure pas dans les livres).

En pratique, vérifier que le rôle de l'eau est négligeable, soit en mesurant, soit en calculant la déviation obtenue avec un tube identique contenant de l'eau pure. Les données pour la solution sont inscrites sur la bouteille. Les valeurs de χ_{FeCl_3} et de $\chi_{\text{H}_2\text{O}}$ en SI sont données dans un des tableaux du Fleury-Mathieu, tome 6 (voir les index en fin d'ouvrage pour retrouver ce tableau)¹.

3) [1P] Paramagnétisme du dioxygène

Il peut être aisément mis en évidence sur le dioxygène *liquide*, obtenu à partir de diazote liquide. En effet, à P_{atm} , $T_{\text{vap}}(\text{N}_2) = 77 \text{ K}$, tandis que $T_{\text{vap}}(\text{O}_2) = 91 \text{ K}$.

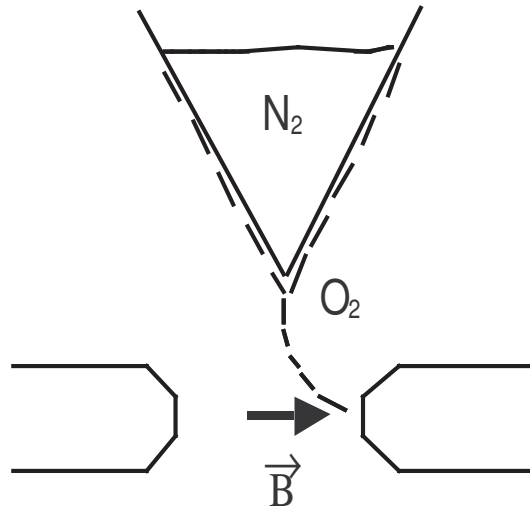
Pour produire du dioxygène liquide, mettre de l'azote liquide dans le cône en cuivre. Le dioxygène de l'air se condense à l'extérieur du cône et coule. Mettre le cône juste au-dessus d'un aimant puissant ($B \approx 1 \text{ T}$). Lorsque l'oxygène se met à couler, il se dirige vers l'une des pièces polaires (champ fort). S'assurer que le pôle choisi est le plus proche de la pointe, indépendamment de sa polarité.

Éclairer avec une lampe QI, et former l'image sur un écran avec une lentille. Essayer l'extérieur du cône s'il apparaît de la glace due à la vapeur d'eau atmosphérique.

III) [2P] Mesure du champ magnétique terrestre

La boussole des tangentes est un dispositif simple permettant d'obtenir une estimation de la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre. Elle est constituée d'une grande bobine plate, verticale, comportant N spires de rayon R , au centre de laquelle est placée une aiguille aimantée sur un support horizontal. Le dispositif permet de choisir le nombre de spires de la bobine (de $N = 1$ à $N = 5$). Attention, ces spires sont de rayons différents. En pratique, on utilisera une seule spire dont on choisira le rayon le plus adapté pour la manipulation.

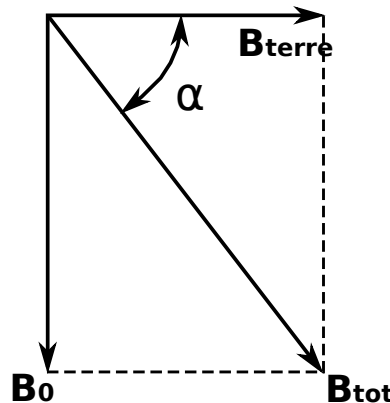
¹le Handbook donne les valeurs de χ en unités CGS, le passage au MKSA ne peut pas se faire par une simple transposition sur le cas de l'eau par exemple, car la "densité" en mol/L, variable d'un corps à l'autre, intervient dans le calcul.



1) Principe de la mesure

La boussole indique la direction du champ magnétique local. Le principe consiste à mesurer la déviation de l'aiguille lorsqu'un champ magnétique est appliqué à l'aide de la spire. Le champ généré par la spire étant connu, il est alors possible de remonter à l'amplitude de la composante horizontale du champ magnétique terrestre. La boussole n'est sensible qu'au champ magnétique contenu dans son plan. Dans la suite, on ne considérera donc que la composante horizontale du champ (notée $\mathbf{B}_{\text{Terre}}$).

Pour cela, orienter la boussole des tangentes afin que l'aiguille, en l'absence de courant dans les spires, pointe dans le plan de la bobine. Dans cette configuration, $\mathbf{B}_{\text{Terre}}$ est orthogonal au champ généré par la spire noté \mathbf{B}_0 . La déviation de l'aiguille α permet de repérer la direction du champ total $\mathbf{B}_{\text{tot}} = \mathbf{B}_{\text{Terre}} + \mathbf{B}_0$.



Pour une spire de rayon R , parcourue par un courant I , le champ généré au centre de la spire vaut

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Ainsi, la déviation est reliée simplement à B_{Terre} selon

$$\tan \alpha = \frac{\mu_0 I}{2RB_{\text{Terre}}}.$$

2) Manipulation

À partir de l'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre, et sachant que **le courant maximal admissible par une spire est de 5A !**, choisir le rayon de spire le mieux adapté pour observer une déviation notable.

À l'aide d'une alimentation continue et d'un ampèremètre, mesurer la déviation α en fonction du courant I . Quel est le paramètre dont l'incertitude domine dans la mesure ? On prendra soin de l'estimer soigneusement pour chaque mesure.

À l'aide d'un ajustement avec QtiPlot, en déduire la valeur de la composante horizontale du champ terrestre. Commenter.

Quel intérêt y a-t-il à prendre des valeurs négatives et positives du courant I pour la mesure ? Doit-on modifier alors la fonction d'ajustement de $\alpha(I)$? et si oui, comment ?

3) Remarques

Étant donné les champs rémanents pouvant exister, notamment au niveau des tables métalliques, il peut être bon de vérifier que la boussole indique bien le nord, par exemple en prenant une autre boussole et en s'assurant que les deux pointent dans la même direction. Si ce n'est pas le cas, essayer de déplacer la boussole des tangentes dans la pièce.

On ne connaît le champ magnétique créé par une spire que sur son axe. Ainsi, assimiler le champ magnétique auquel est soumis l'aiguille au champ au centre est une approximation, dont il convient d'apprécier l'extension.

Par ailleurs, il convient de noter que la formule donnant l'angle de déviation est exacte précisément parce qu'elle correspond à l'équilibre entre deux couples de sens opposés. Par chance, le couple subi par un moment magnétique est linéaire en le champ appliqué.

Enfin, ne pas oublier que l'aiguille est fabriquée dans un matériau ferromagnétique. Lorsqu'un champ est appliqué, ce matériau réagit en développant lui-même un (petit) champ magnétique. Sachez apprécier la petitesse de celui-ci par rapport au champ ambiant.

IV) [2P] Chute d'un aimant dans un tube métallique

1) Freinage magnétique : principe

Le freinage magnétique est une application concrète de l'existence des courants de Foucault. En effet, conformément aux lois de l'induction, lorsqu'un métal (ferromagnétique ou non) est soumis à un champ magnétique variable, des boucles de courant sont induites dans le volume du métal. La présence de ces courants peut être mise en évidence soit par la dissipation Joule (chauffage par induction), soit par la création d'un nouveau champ magnétique qui tend à s'opposer au premier. C'est ce dernier effet qui est à l'origine du freinage magnétique, qu'on se propose d'illustrer. On laisse tomber un aimant à l'intérieur d'un tube de métal. La force de freinage va équilibrer la force de gravité, de manière à avoir une vitesse de chute constante. Le temps de chute sera augmenté par rapport au cas en l'absence de métal et se trouve être proportionnel à la conductivité électrique du métal. Dans notre cas, on détecte le passage de l'aimant à travers des bobines enserrant le tube, en visualisant à l'oscilloscope la tension induite alors à leurs bornes. On compare le temps de chute et l'amplitude du signal électrique, pour des tubes de cuivre, laiton, duralumin et plexiglas (ce dernier est un plastique transparent servant de référence).

2) Préparation et expérience

Avec des pinces de chimie attachées à un pied d'optique, fixer le tube par l'extrémité supérieure et veiller à ce qu'il soit bien vertical. Les deux bobines mobiles s'enfilent sur le tube et sont maintenues par deux autres pinces. Placer la deuxième bobine un peu au-dessus de l'extrémité inférieure, et la première 25 cm plus haut par exemple. La distance entre les deux bobines est notée L . Mettre de la mousse (2 épaisseurs) sous le tube. L'aimant utilisé est composé de 3 aimants NdFeB très puissants. Éviter de l'approcher d'objets en acier (par exemple la potence), car il est alors difficile à décoller. Enfin ces aimants sont assez fragiles, c'est pourquoi on met de la mousse sous le tube.

Connecter les deux voies d'un oscilloscope aux deux bobines. Régler le déclenchement en mode DC sur **Single** et adapter le **niveau**. Laisser tomber l'aimant en haut du tube sans vitesse initiale. Les signaux obtenus ont une amplitude typique de l'ordre du volt, avec des formes caractéristiques qu'on retrouve sur les deux voies, mais décalées temporellement d'une centaine de millisecondes. La différence de temps T entre ces deux courbes correspond au temps de chute sur la distance L . On peut en déduire la vitesse de chute dans le tube. On peut montrer aussi que l'amplitude du signal est proportionnelle à la vitesse de passage à travers une bobine (voir BUP 822 et 823). Ainsi, si les deux courbes ont même amplitude, on en déduit que la vitesse reste constante entre les deux bobines et donc que la vitesse limite est atteinte (et si sur un signal les deux alternances ont la même amplitude, c'est que la vitesse est constante au passage de la bobine). Comparer les vitesses de chute, pour le plexiglas (plastique transparent), le cuivre (orangé), le laiton (jaune) et le duralumin (gris). En déduire le rapport de conductivité entre le cuivre et le laiton et le duralumin.

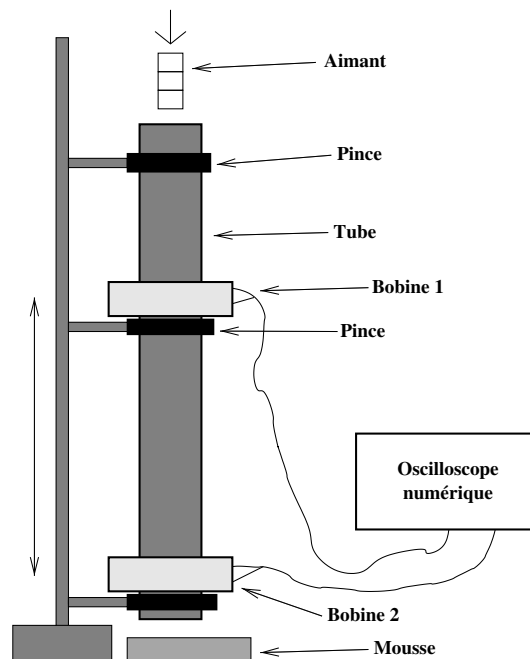


FIG. 1 – Schéma de l'expérience

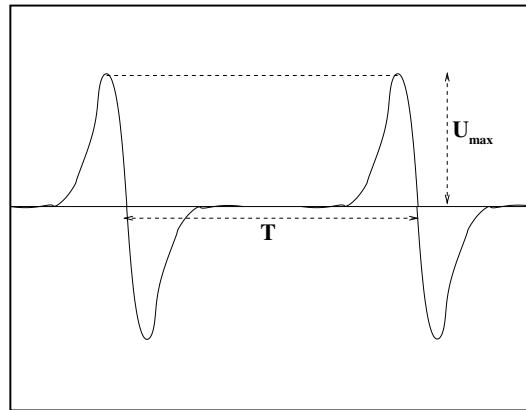


FIG. 2 – Signal observé à l’oscilloscope (deux voies) lors du passage de l’aimant à travers les bobines.

3) Interprétation

a) Le freinage magnétique

Lorsque l’aimant chute à la vitesse \vec{v} , il règne dans le tube dans le référentiel de l’aimant un champ électrique induit $\vec{E} = -\vec{v} \wedge \vec{B}$; où \vec{B} est le champ magnétique produit par l’aimant et $-\vec{v}$ est la vitesse du tube par rapport à l’aimant. Ce champ induit des courants électriques dans le volume du tube, dont la densité vérifie localement $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. L’aimant exerce alors une force de Laplace sur le tube du fait des courants qui le traversent, et réciproquement le tube exerce une force de freinage sur l’aimant. Ces courants dissipent de l’énergie par effet Joule et en régime permanent (au bout d’environ 10 cm de chute), la puissance dissipée par effet Joule égale la puissance de la force de gravité. Faire un calcul de la forme de la force est assez complexe, car le champ magnétique de l’aimant n’est pas rigoureusement dipolaire, et deux longueurs caractéristiques, le rayon intérieur du tube et son épaisseur, interviennent dans le problème. Néanmoins, on peut montrer que la force de freinage est proportionnelle à la conductivité du métal et à la vitesse de l’aimant. On a ainsi une force de freinage de type frottement visqueux.

Dans les applications industrielles, c’est en général une pièce mobile métallique qui est freinée dans le champ d’un électroaimant (freinage des roues de camion).

b) La technique de mesure

On mesure aux bornes d’une bobine la f.é.m. induite $e_{\text{induite}} = -\frac{d\Phi}{dt}$, où Φ est le flux du champ magnétique de l’aimant à travers la surface circulaire contenue dans la bobine. Lorsque l’aimant s’approche, si le flux augmente (cela dépend du pôle de l’aimant et de l’orientation choisie sur la bobine), la tension est négative, puis lorsque l’aimant s’éloigne du centre de la bobine, le flux diminue et la tension devient positive. Une modélisation simple de la mesure est difficile, en raison des dimensions respectives des bobines et de l’aimant. Néanmoins, la tension maximale est en ordre de grandeur proportionnelle à la vitesse de chute de l’aimant.

4) Données

a) Dimensions

- Dimensions des tubes métalliques : diamètre intérieur 30 mm, diamètre extérieur 32 mm, longueur 500 mm
- Dimensions du tube en plexiglas : diamètre intérieur 26 mm, diamètre extérieur 32 mm
- Dimensions des bobines de 500 tours : diamètre intérieur 34 mm, longueur 20 mm

b) Conductivités

Les valeurs proposées ci-dessous ont été déterminées par une mesure directe :

- Conductivité du cuivre (non pur ici) : $4.8 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$
- Conductivité du laiton (alliage cuivre + zinc) : $1.4 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$
- Conductivité du duralumin (alliage aluminium + cuivre + additifs) : $2.1 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$