

PRÉPA AGRÉG  
PHYSIQUE 2014-2015



ENS CACHAN

MONTAGE

---

## M16 : Milieux magnétiques

---

*Auteurs :*  
Edouard LE CERF  
Souhila KADDOUR

*Correcteur :*  
M. Guillaume REYDELLET

26 Septembre 2014

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Mise en évidence des caractéristiques magnétiques</b>	<b>3</b>
1.1 Les paramagnétiques . . . . .	3
1.1.1 Le barreau d'aluminium . . . . .	3
1.1.2 L'oxygène liquide . . . . .	3
1.2 Les diamagnétiques . . . . .	3
1.2.1 Le barreau de verre . . . . .	3
1.2.2 L'effet Meissner . . . . .	4
<b>2 Mesure de susceptibilité</b>	<b>5</b>
2.1 Expérience du tube de Quincke . . . . .	5
2.2 Détermination de la susceptibilité magnétique . . . . .	6
<b>3 Les ferromagnétiques</b>	<b>7</b>
3.1 Expérience de la température de Curie . . . . .	7
3.2 Mise en évidence des domaines de Weiss . . . . .	7
3.3 Cycle d'hystérésis . . . . .	8
3.3.1 Caractéristiques de l'hystérésis . . . . .	8
3.3.2 Détermination de $B_r, H_c$ . . . . .	8
<b>4 Questions-Commentaires</b>	<b>10</b>
4.1 Questions posées sur la partie 1 . . . . .	10
4.2 Commentaires . . . . .	10
4.3 Questions posées sur la partie 2 . . . . .	10
4.4 Commentaires . . . . .	10
4.5 Questions posées sur la partie 3 . . . . .	10
4.6 Commentaires . . . . .	11
<b>Conclusion</b>	<b>12</b>

## **Introduction**

Ce montage permet de mettre en évidence les différents types de magnétismes et d'insister sur leurs caractéristiques propres. Ce montage fait partie des rares où l'approche qualitative prime sur le quantitatif (peu de mesures) il est donc primordial d'insister sur la manière de présenter les expériences et sur la rigueur et la précision de nos gestes lors des manipulations.

# 1 Mise en évidence des caractéristiques magnétiques

## 1.1 Les paramagnétiques

### 1.1.1 Le barreau d'aluminium

La manipulation se fait à l'aide d'un entrefer et d'un barreau d'aluminium. Pour plus de confort et pour que la manip soit précisément effectuée, il convient d'attacher le petit barreau à un fil lui-même attaché à un support. Placer alors l'aimant de part et d'autre du barreau de sorte qu'aucune de ses extrémités ne soit en contact avec l'entrefer. Faire pivoter l'entrefer autour de l'axe du fil.

Au placement du barreau dans l'entrefer, on remarque déjà qu'il s'aligne avec les lignes de champ dans l'entrefer. Pour que ceci soit plus flagrant, on fait pivoter l'aimant et on peut faire constater que le barreau d'aluminium reste bel et bien aligné avec les lignes de champ.

L'alignement du barreau le long des lignes de champ est caractéristique d'un paramagnétique.

### 1.1.2 L'oxygène liquide

De la même manière que pour l'aluminium, il s'agit ici de mettre en avant le caractère paramagnétique de l'oxygène. D'abord, il s'agit de récupérer de l'oxygène liquide à partir d'une bombonne de  $O_2$  gazeux (disponible à l'oral?). Avec un tube à essai plongé jusqu'à mi-hauteur dans un deware contenant de l'azote liquide, le gaz se liquéfie et on peut récupérer assez de liquide dans le tube à essais au bout de 5 min seulement (prévoir de lancer cette manip avant le barreau d'alu pour gagner du temps).

Une fois notre tube à essais d'oxygène liquide en main, on le verse sur l'entrefer utilisé lors de la précédente manip (On aura pris soin cette fois de rapprocher les deux aimant à moins d'1cm l'un de l'autre pour un effet plus flagrant). Il se crée alors un pont d'oxygène liquide dans l'entrefer.

Le pont observé reflète bien l'alignement de l'oxygène liquide le long des lignes de champ de l'entrefer. Il est donc paramagnétique.

## 1.2 Les diamagnétiques

### 1.2.1 Le barreau de verre

Même manip qu'avec le barreau d'aluminium. Cette fois le barreau s'aligne perpendiculairement aux lignes de champ de l'entrefer. Le barreau a un caractère diamagnétique.

### 1.2.2 L'effet Meissner

Dans la boîte "effet Meissner" toute prête, on trouve une pierre supraconductrice, un aimant, une pince en plastique. Directement dans le fond de la boîte en polystyrène, verser l'azote liquide sur la pierre supra et attendre qu'elle se thermalise (environ 2 minutes) puis placer à l'aide de la pince en plastique le petit aimant dessus. L'aimant lévite. Pour que ça soit plus visible à la caméra, on peut facilement passer la pince blanche entre l'aimant et la pierre.

Cet effet caractéristique d'un supraconducteur s'explique par le fait que porté à très basse température, l'élément supra produit en son sein des courants dits induits parfaitement opposés aux courants dûs au champ magnétique extérieur. Ainsi, aucune ligne de champ magnétique externe ne "traverse" l'élément supra et le petit aimant est expulsé de la pierre mais s'accroche aux lignes de champ extérieur, existant juste au-dessus de cette dernière.

## 2 Mesure de susceptibilité

### 2.1 Expérience du tube de Quincke

Lors de cette expérience, il s'agit d'effectuer une des rares manip un peu quantitatives de ce montage en la mesure de susceptibilité du manganèse. On dispose pour cela :

1. d'un tube de Quincke ;
2. d'une solution de chlorure de manganèse de concentration  $400g/L$  ;
3. d'un électro-aimant alimenté par un auto-transfo
4. d'une lentille, d'une lampe blanche et d'un écran pour la projection du tube gradué.

On place la solution dans le tube de Quincke en prenant soin de centrer la hauteur de la solution par rapport aux têtes polaires des aimants. Le réservoir du tube en U est quant à lui à l'extérieur de l'entrefer. En l'absence d'induction, on pourra vérifier que la hauteur de la solution dans le tube et celle dans le réservoir sont égales.

Envoyer le courant puis faire la mesure de la nouvelle hauteur pour le champ magnétique correspondant. Si la solution est diamagnétique la solution va tendre à sortir du tube pour quitter la zone de champ de l'entrefer. Si elle est paramagnétique, elle va rester tendre à entrer dans la zone de champ de l'entrefer.

Pour la mesure du champ magnétique, bien vérifier qu'il est homogène sur toute la surface des têtes de l'électro-aimant et dans l'entrefer. Sinon, faire une moyenne pour la valeur considérée et prendre en compte les incertitudes.

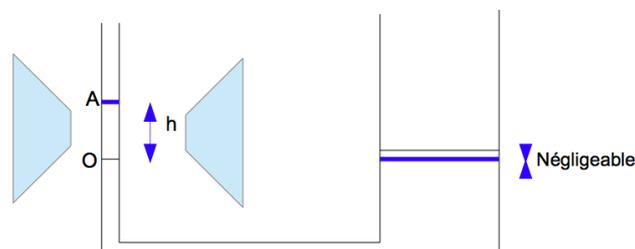


FIGURE 1 – Schéma de l'expérience.

## 2.2 Détermination de la susceptibilité magnétique

Lorsqu'une induction  $\vec{B}$  varie selon une direction donnée, tout moment magnétique  $d\vec{m}$  est soumis à une force  $d\vec{F}$  telle que :

$$dF_z = d\vec{m} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial z} \quad (1)$$

Avec une substance isotrope on a  $\vec{M} = \chi \vec{H}$   
d'où

$$dF_z = \frac{\chi}{\mu_0} \frac{\partial \vec{B}}{\partial z} \cdot \vec{B} \cdot dv \quad (2)$$

La solution est donc soumise à une force :

$$F_z = \frac{\chi}{\mu_0} \iiint \left( \frac{\partial \vec{B}}{\partial z} \cdot \vec{B} \right) dv \quad (3)$$

Ainsi, comme la force est prise en compte au niveau des deux extrémités du liquide et sachant que l'induction est considérée comme nulle au niveau du réservoir et que sa section est grande par rapport à celle du tube, on néglige le changement de hauteur au niveau du réservoir et il reste :

$$\frac{F_z}{surface_{tube}} = \frac{\chi}{2\mu_0} B^2 \quad (4)$$

A l'équilibre, cette force est compensée par la pression hydrostatique selon la verticale du tube  $P = \rho gh$

Finalement,

$$\frac{\chi}{2\mu_0} B^2 = \rho gh \quad (5)$$

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

En mesurant le champ dans l'entrefer et connaissant  $\rho$ ,  $g$  et  $\mu_0$ , on détermine une valeur de  $\chi_M n$  et surtout on peut comparer à l'observation du paramagnétisme du manganèse : la solution tendant à rester dans l'entrefer.

ATTENTION : lors de la manip B(O) avait été mesuré dans l'entrefer en l'absence d'induction. En fait, la valeur de B(O) doit être faite du côté réservoir du tube en U et c'est la raison pour laquelle elle est négligée ensuite dans le calcul.

## 3 Les ferromagnétiques

### 3.1 Expérience de la température de Curie

Cette manip est assez simple et incontournable, c'est pourquoi elle doit être bien exécutée. L'expérience est déjà montée et elle dispose sur un support d'un aimant placé derrière un écran isolant pour éviter de le brûler lors de l'expérience, d'une tige avec thermocouple dont l'extrémité est en fer.

Placer la tige sur l'aimant de part et d'autre de l'écran. Vérifier que le thermocouple indique la température de la pièce. Chauffer l'extrémité de la tige à l'aide du chalumeau. La température augmente très rapidement c'est pourquoi en se rapprochant de la température de Curie du fer ( $T_c(Fe) = 1043K$ ) il est important d'écartier le chalumeau de sorte à stabiliser du mieux possible la température. La lecture n'en sera qu'améliorée et l'erreur sur la mesure moindre lors de la désaimantation brutale du ferro. Pour cette expérience "toute-faite" c'est sur cette agilité qu'on sera jugés.

D'une manière générale, quand la température augmente, les moments magnétiques deviennent de moins en moins liés au réseau cristallin et s'orientent plus facilement sous l'effet d'un champ extérieur. La susceptibilité magnétique augmente ainsi rapidement à l'approche de la température de Curie. Elle atteint sa plus grande valeur à  $T_C$ , puis s'annule brutalement : c'est le pic d'Hopkinson ou effet Hopkinson, signe d'une transition de phase du second ordre. Il correspond dans l'expérience au détachement de la tige sur l'écran. C'est le moment où il faut lire la température qu'indique le thermomètre.

Au-delà de sa température de Curie, le matériau devient paramagnétique et l'aimantation spontanée est nulle. Sa susceptibilité suit alors la loi de Curie-Weiss  $\chi = \frac{C_m}{T-T_C}$

### 3.2 Mise en évidence des domaines de Weiss

Cette manip permet juste permet de mettre en évidence que dans des matériaux ferromagnétiques des domaines de spins différents entre en jeu et forment des domaines dits "domaines de Weiss". Lors du montage, à l'aide d'un microscope et d'une flexcam, ils avaient été projetés à l'écran et la largeur des domaines avait été mesuré. Le jury a considéré, vu que les domaines n'avaient pas vraiment de taille caractéristique que cette mesure était sans grand intérêt.

### 3.3 Cycle d'hystérésis

#### 3.3.1 Caractéristiques de l'hystérésis

Lorsqu'un corps est aimanté pour la première fois, sa courbe d'aimantation augmente jusqu'à saturation. Elle suit la loi de Rayleigh telle que  $\vec{M} = \chi\vec{H} + \xi H^2$  or  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$  donc la courbe de B a une augmentation analogue. Lorsqu'on décroît H, on constate que B décroît suivant une courbe différente que la courbe de première aimantation : on dit qu'il y a hystérésis.

Lorsqu'on atteint la valeur  $H = 0$ , on constate d'ailleurs qu'il persiste un champ B dans le matériau ferromagnétique qu'on appelle le champ rémanent  $B_r$ . Pour annuler ce champ rémanent  $B_r$ , il faut imposer une valeur négative à H qu'on appelle le champ coercitif  $H_c$ .

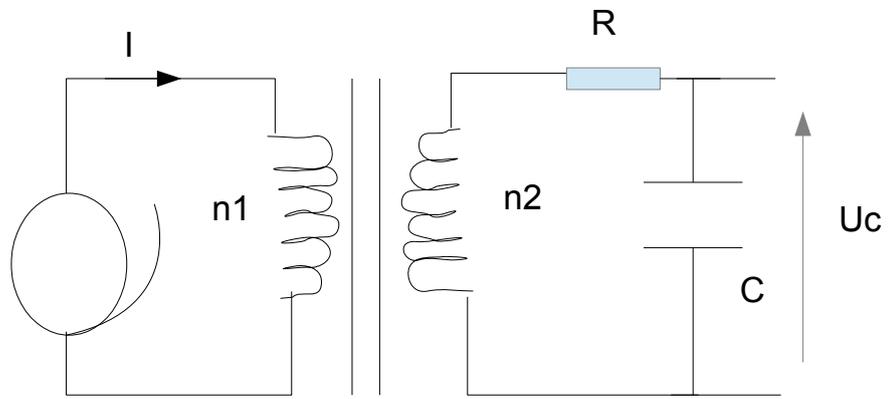
#### 3.3.2 Détermination de $B_r, H_c$

On dispose pour faire l'hystérésis :

1. d'un tore (on peut choisir le nombre de spires à considérer pour les solénoïdes :  $n_1$  dans le primaire,  $n_2$  dans le secondaire)
2. d'un auto-transformateur pour alimenter le circuit (ATTENTION à utiliser les fils de sécurité : mauvaise surprise en touchant les embouts des fils non-sécurisés sinon...)
3. une résistance et une capa.

En appliquant le théorème d'Ampère à  $\vec{H}$ , il vient que  $H$  est directement proportionnel à  $I$  donc  $H_c = \frac{n_1 \cdot I_c}{L}$  où L est la longueur du solénoïde. De plus, en obtenant la fem  $e$  aux bornes de l'enroulement du secondaire à courant  $I_2$  nul on obtient directement l'information sur le champ rémanent  $B_r$  tel que  $B_r = \frac{e \cdot R \cdot C}{n_2 \cdot S}$  où S est la section du tore.

On visualise le cycle sur l'oscilloscope d'hystérésis en traçant  $U_c$  en fonction de  $I$ . On peut alors extraire les données nécessaires à la détermination de  $H_c$  et  $B_r$ .



9  
FIGURE 2 – Schéma du circuit

## 4 Questions-Commentaires

### 4.1 Questions posées sur la partie 1

1. Comment être sûr qu'il ne s'agit que d'oxygène ?  
faisait référence au fait qu'on pouvait liquéfier l'oxygène de l'air et donc qu'il faudrait prendre en compte le fait qu'il n'y ait pas que de l'oxygène. Cependant avec la bombonne de gaz, on peut croire a priori qu'il s'agisse d' $O_2$  pur comme indiqué sur la bouteille.
2. Pourquoi cette manip permet-elle de dire que la structure réelle du  $O_2$  viole la règle de l'octet ?  
Si on suit la règle de l'octet, la molécule de  $O_2$  serait apolaire or ici il est clair que l'expérience insiste sur la présence d'électrons libres dans la structure de la molécule, électrons responsables de son caractère paramagnétique.

### 4.2 Commentaires

Barreaux aimantés, passage obligé. Bonne idée du support au lieu de tenir à la main, surtout si on tremble. Pour le dia, peut-être rapprocher les aimants pour voir la fuite du barreau.  
Pour l'oxygène liquide, faire du goutte à goutte pour voir la déviation vers l'un ou l'autre des pôles.

### 4.3 Questions posées sur la partie 2

1. A quel point la pesée influe-t-elle sur notre mesure ? A vrai dire, on a pesé grosso modo pour saturer notre solution. On n'a pas essayé pour une solution trop diluée.

### 4.4 Commentaires

Attention pour la mesure de  $B(O)$ , il s'agit de le mesurer dans le réservoir. Justement l'utilité d'un grand réservoir par rapport au tube c'est que la hauteur de  $O$  ne change pas et donc que  $B(O)$  non plus au cours de l'expérience. Attention également à mesurer le champ au niveau du liquide et pas juste n'importe où dans l'entrefer.

### 4.5 Questions posées sur la partie 3

1. Curie : Comment savoir s'il s'agit d'un aimant ?  
Il ne s'agit pas d'un aimant mais juste d'un morceau de fer.

2. Hysteresis : Quel matériau utilisé dans le tore ? Peut-on le trouver en évaluant le  $H_c$  par exemple ?

#### **4.6 Commentaires**

Peut-être aller plus loin dans les supra en mesurant la température critique de passage entre conducteur/ non-conducteur...

## Conclusion

Comme dit précédemment, ce montage fait partie des rares où il y a peu de mesures quantitatives et de vraies prises en compte d'erreur. En revanche, il faut être capable de manipuler rapidement (vu le nombre d'expériences), précisément et faire des interprétations rigoureuses des caractéristiques présentées.