

# Compte-Rendu MP16 : Milieux magnétiques

Trinôme 11 : **Manon BALLU**, Corentin CARREZ, Yehudi SIMON

2 Novembre 2018

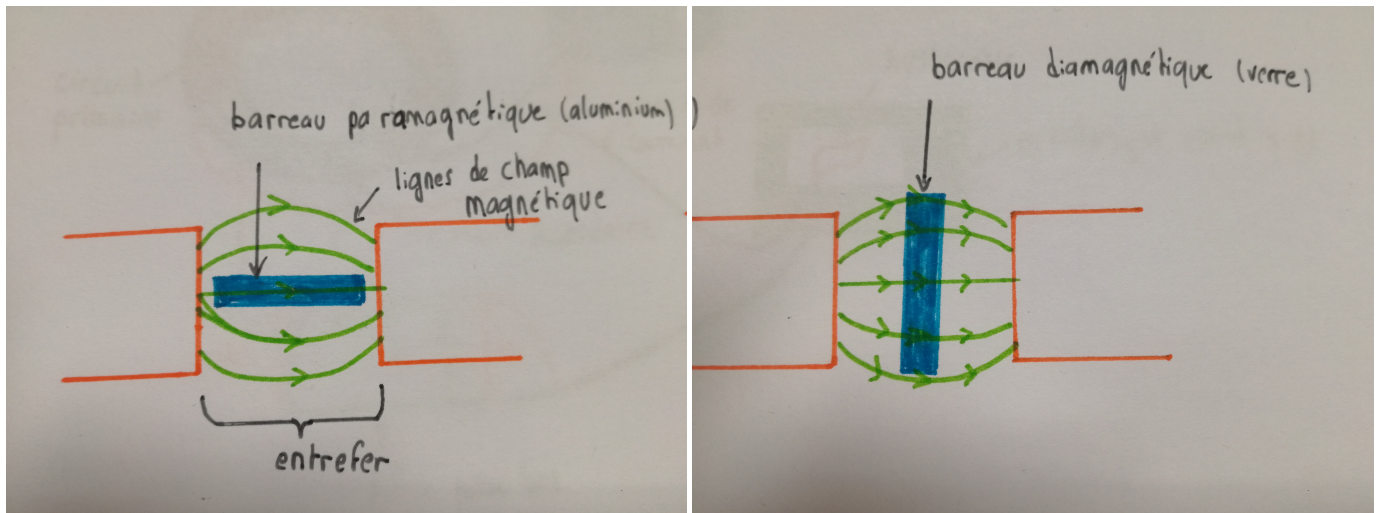
## 1 Objectifs du montage

Illustrer des propriétés de différents milieux magnétiques (paramagnétique, ferromagnétique et diamagnétique) et plus particulièrement leur comportement lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique.

## 2 Proposition de plan

### 2.1 Éléments introductifs

Mise en évidence des comportements paramagnétique et diamagnétique : barreau d'aluminium et de verre dans un entrefer. Le barreau d'aluminium (paramagnétique) s'aligne sur les lignes de champs, comme pour un ferromagnétique (exemple de la boussole), même si l'effet est moins important. Au contraire le barreau de verre (diamagnétique) s'oriente perpendiculairement aux lignes de champs. (Pour bien montrer ces phénomènes on tourne doucement l'aimant et on vérifie que le barreau d'aluminium reste parallèle aux lignes de champ, et que celui de verre reste perpendiculaire, on peut resserrer l'entrefer dans ce dernier cas car l'effet est vraiment faible).



Ces observations résultent des forces volumiques de Laplace :

$$\vec{F}_L = \frac{\chi}{2\mu_0} \text{grad}(B^2)$$

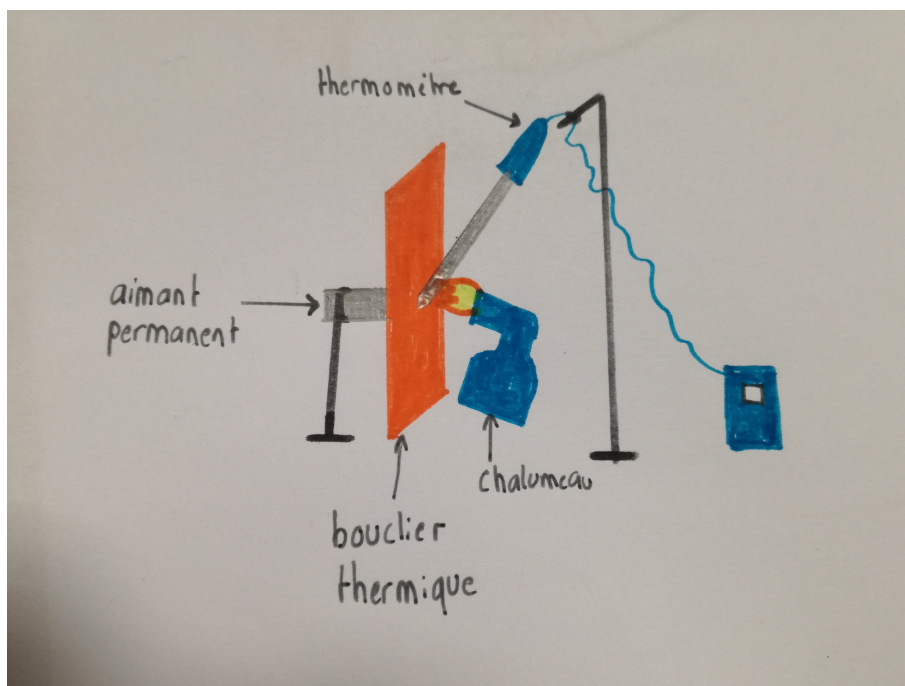
avec  $\chi$  la susceptibilité magnétique.

$\chi > 0$  pour les milieux paramagnétiques et  $\chi < 0$  pour les milieux diamagnétiques.

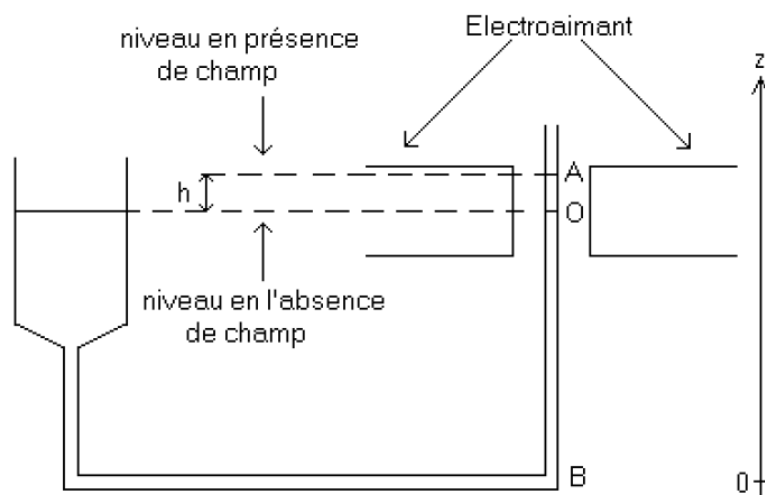
### 2.2 Transition paramagnétique-ferromagnétique

Le but de cette expérience est d'estimer la température de Curie du fer, qui est la température pour laquelle on passe d'un comportement ferromagnétique à paramagnétique. Pour cela on dispose d'un thermomètre avec une pointe en fer qu'on "colle" à un aimant au néodyme. On place un bouclier thermique entre les deux pour ne pas (trop) chauffer l'aimant. On utilise un chalumeau pour chauffer la pointe du thermomètre jusqu'à ce qu'elle se décroche. La température de décrochement donne une estimation de la température de Curie ( $770^\circ\text{C}$ ). Il faut néanmoins être critique sur cette expérience car le décrochement se fera avant la désaimantation complète à cause du poids. De plus la température de Curie est définie en champ nul ce qui n'est pas le cas de l'expérience. Enfin des mesures successives

pour faire une analyse statistique peuvent donner une température de décrochement qui a une tendance décroissante car l'aimant chauffe malgré le bouclier thermique et produit donc un champ moins important (désaimantation du néodyme vers 350°C). En pratique on trouve d'assez grands écarts sur la température de décrochement : entre 710°C et 770°C sur une dizaine d'essais.



### 2.3 Mesure d'une susceptibilité magnétique : tube de Quincke



**Figure 1** – Schéma tube de Quincke issu de la fiche du département

Le but de cette expérience est de mesurer la susceptibilité magnétique d'une solution de  $\text{MnCl}_2$  (paramagnétique). On applique un champ magnétique à l'aide d'un électroaimant au niveau de l'interface solution-air du tube étroit (voir schéma). La hauteur du ménisque augmente avec  $B$ . On note  $h$  la hauteur du ménisque par rapport à sa hauteur sans champ magnétique.

Un calcul d'hydrostatique donne :

$$g \vec{\text{rad}} P - \rho \vec{g} + \frac{\chi}{2\mu_0} g \vec{\text{rad}}(B^2)$$

donc

$$P - \rho g z + \frac{\chi}{2\mu_0} B^2 = cste$$

d'où

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

On considère toujours la surface libre de la solution. La pression y sera donc toujours proche de la pression atmosphérique (on néglige la surpression de Laplace par commodité).

Pour plus de précision et de confort, on projettera l'image du ménisque sur un écran au moyen d'une lampe blanche et d'une lentille ( $f \sim 150\text{mm}$ ,  $G \sim 10$ ) sans oublier le filtre anti-calorique (à ne pas confondre avec un calorimètre qui laisse moins bien passer la lumière...).

On part de la situation où l'on alimente pas l'électroaimant. Il existe un champ rémanent (milieu ferromagnétique ayant été aimanté) à mesurer (faible, de l'ordre de  $5\text{mT}$ ). On repère la position du bas (image inversée donc haut) du ménisque sans courant appliqué. On augmente ensuite progressivement la valeur du champ en marquant les positions successives du ménisque. On a ainsi une mesure de  $\Delta h$  la différence de hauteur du ménisque en fonction du champ appliqué, qui permet de faire une régression linéaire pour retrouver  $\chi$ .

Pour faire la régression linéaire il faut connaître le champ appliqué. Soit on étalonne l'électroaimant séparément en mesurant  $B$  en fonction du courant imposé (pratique et systématique si on fixe la sonde au milieu de l'entrefer) soit on mesure  $B$  à la sonde à chaque mesure de  $h$ . Cette dernière méthode préconisée par les professeurs implique de bouger le tube à chaque mesure et donc devoir repartir du courant nul à chaque étape... rend la prise de point fastidieuse.

Après régression linéaire on obtient  $\chi = (1,65 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$  avec Igor en prenant des incertitudes de  $10\text{mT}$  pour la mesure de  $B$  et  $0,08\text{ mm}$  pour  $h$  ( $1\text{mm}$  sur la mesure de  $h$  à l'écran avec un grandissement de  $12$ ). On a trouvé une valeur tabulée  $\chi_{\text{tab}} = 1,7 \cdot 10^{-4}$  ce qui est cohérent.

Si on propage simplement les incertitudes, on a

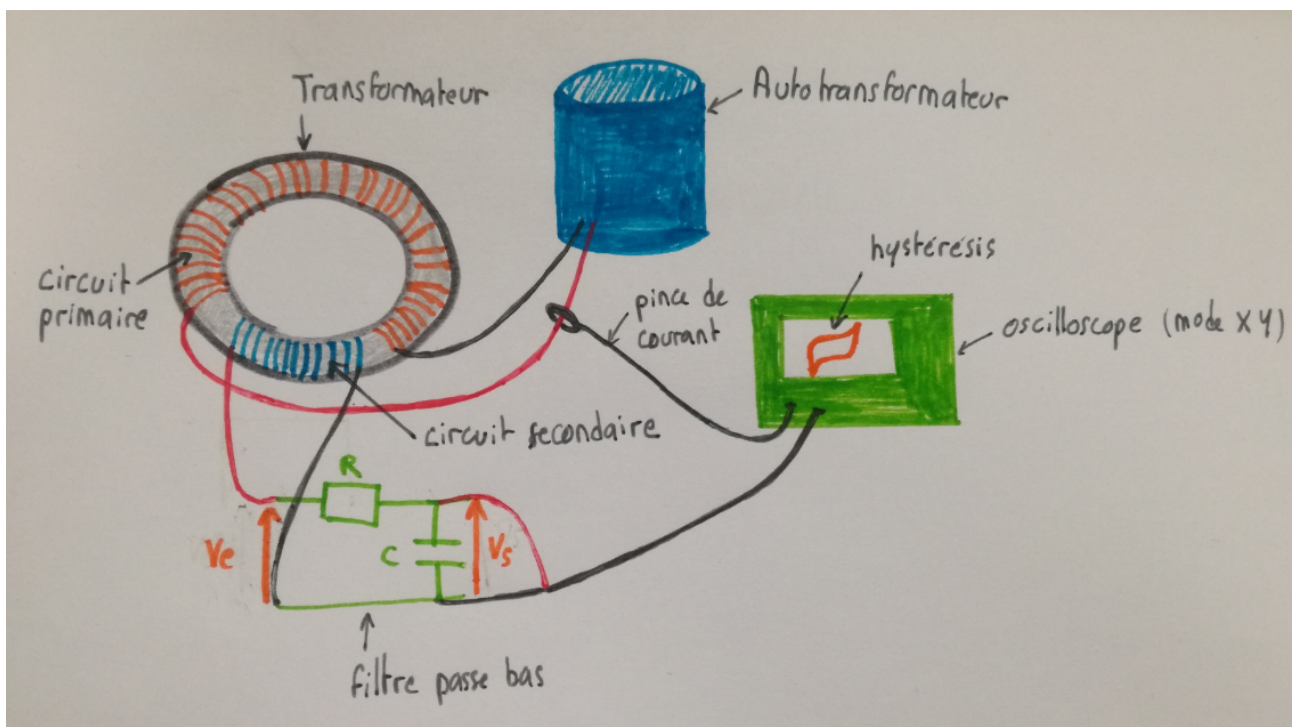
$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2} \sim 10\%$$

La régression linéaire d'Igor est donc meilleure qu'un calcul de propagation d'incertitude sur un point mais reste du même ordre de grandeur.

## 2.4 Effets non linéaires sur un transformateur : hystérésis et pertes fer

### 2.4.1 Cycle d'hystérésis

Le but de cette expérience est de retrouver le cycle d'hystérésis caractéristique des matériaux ferromagnétiques (lorsqu'on trace le champ magnétique  $\vec{B}$  en fonction du champ d'excitation  $\vec{H}$ ). Pour cela on fait passer un courant alternatif  $i$  dans la bobine du primaire (on utilise un autotransformateur pour alimenter le circuit (à  $50\text{Hz}$ )) ce qui crée un champ d'excitation  $\vec{H}$  dans le noyau du fer du transformateur. Le courant  $i$  est proportionnel à  $\vec{H}$  et on branche donc une sonde de courant le mesurant sur la voie 1 d'un oscilloscope. Pour avoir une image du champ  $\vec{B}$  on branche la sortie du secondaire sur un filtre passe bas ( $f_c = 1\text{Hz}$ ) qui joue le rôle d'intégrateur et on mesure la tension à la sortie du filtre sur la voie 2 de l'oscilloscope. En effet par induction on a une  $f_{em}$  dans le circuit secondaire proportionnelle à la dérivée du flux du champ magnétique. En intégrant cette tension on obtient donc une tension proportionnelle au flux  $\Phi \simeq BS$ . En utilisant l'oscilloscope en mode XY on affiche le cycle d'hystérésis.



### 2.4.2 Pertes fer

Le but de cette expérience est de mesurer les pertes fer du transformateur (pertes fer = perte dues au cycle d'hystérésis + pertes causées par les courants de Foucault). Pour cela on mesure la puissance à vide, à laquelle il faut retrancher les pertes Joule. On doit donc d'abord mesurer la résistance  $R$  du circuit primaire. On peut faire une régression linéaire en traçant  $i$  en fonction de  $U$  (avec une alimentation continue!! et donc des multimètres car les wattmètres fonctionnent en alternatif) qui sera plus précise qu'une mesure à l'ohmmètre car  $R$  est très faible. On trouve  $R = 1,1\Omega$ . On alimente ensuite le circuit avec un courant alternatif et on branche un wattmètre pour mesurer la puissance d'entrée à vide. On le fait pour différentes tensions d'entrée pour vérifier la loi  $P_{fer} = \alpha U^2$ . Une régression linéaire donne  $\alpha$ .

## 3 Expériences alternatives

- Magnétostriction
- Domaines de Weiss, observation
- Domaines de Weiss, effet Faraday
- Mise en évidence du caractère paramagnétique de  $O_2$
- Boussole
- Effet Meissner, supraconducteur

## 4 Subtilités

Trouver une valeur tabulée de  $\chi$  du chlorure de manganèse s'avère compliqué, pas forcément reproductible en condition d'examen si pas préparé.

Mesure sur le tube de Quincke peut être laborieuse et difficile à justifier pourquoi celle qu'on choisit est optimale (plusieurs approximations, méthodes, avec ou sans étalonnage...).

## 5 Bibliographie indicative

- Dictionnaire de la physique expérimentale tome IV, Quantara
- Fiche manip Quincke du département
- Magnetic Susceptibility Measurements of solutions by surface nanodisplacement detection, Egami, Monjushiro et Watari (Analytical sciences septembre 2006) pour la valeur tabulée (presque honnête) de  $\chi_m$  de  $MnCl_2$
- Poly JBD pour les pertes fer

## 6 Remarques, questions du correcteur

*Correction étudiante :*

- Définition aimant permanent  $\rightarrow$  Ferromagnétique qui crée un champ magnétique sans avoir besoin d'excitation. C'est aussi un matériau dur (à cycle d'hystérésis large pour avoir un fort  $B$  rémanent et un  $H$  coercitif fort aussi).
- Trace la courbe de première aimantation, et nom des points particuliers.
- Ordre de grandeur de la susceptibilité  $\rightarrow$  ferromagnétique  $\chi_m = 200$ , para  $\chi_m = 10^{-4}$ , dia  $\chi_m = -10^{-6}$ .
- Si on met de l'eau pure à la place du  $MnCl_2 \rightarrow$  Alors on verra le liquide descendre et non monter.
- Comment observer les domaines de Weiss ?  $\rightarrow$  Au microscope, en projection, ou par effet Faraday (cela permet même d'évaluer la taille des domaines). On a dans la collection une lamelle de grenat où on visualise aisément les domaines de Weiss.
- Unité de  $\alpha$  ?  $\rightarrow$  en  $W.V^{-2}$

*Correction de JBD :*

- Pourquoi les ferromagnétiques s'alignent comme cela dans l'aimant ?  $\rightarrow$  Cela est dû au gradient de  $B^2$ , qui s'oriente "radialement" autour du centre de l'entrefer. La position stable est celle observée, alors que la position perpendiculaire est un équilibre instable. C'est l'inverse pour un diamagnétique.
- $T_{Curie}$  de l'aimant permanent ?  $\rightarrow$  c'est environ 350K. C'est d'ailleurs une des sources d'incertitude sur la mesure de  $T_{Curie}$  du fer. Il faut donc en théorie attendre qu'il refroidissent complètement. Cela peut induire une dérive des mesures (décrochage de plus en plus vite)
- Autre source d'erreur ?  $\rightarrow$  La source d'erreur principale est le fait que **le thermomètre est en alliage de fer et non du fer pur!!!** (Il ne rouille pas).

- Démontrer la relation d'hydrostatique utilisée  $\rightarrow$  Bernoulli en prenant en compte les forces volumiques de Laplace.
- Faire un étalonnage sur  $B=f(I)$  n'est pas forcément pertinent il vaudrait mieux prendre directement  $B$  au teslamètre! Mais cela pose des problèmes car il faudrait reprendre le zéro de  $h$  à chaque points. *(Cela va dans le sens d'une remarque de Restagno passant par là qui disait de prendre un plus gros électro-aimant et de le faire monter/descendre à chaque point pour rester dans l'entrefer)*. Mais cela rallongerait considérablement les manip'.
- Caractéristique du filtre?  $\rightarrow f_c = 2 \text{ Hz}$  pour que  $f = 50 \text{ Hz}$  soit dans la plage d'intégration du passe bas mais pas trop atténué.
- Lien entre  $i$  et  $H$  et  $u$  et  $B$ ?  $\rightarrow H = N^*i/l$  par le théorème d'Ampère et  $u = -S \frac{\partial B}{\partial t}$  par induction avant l'intégrateur puis  $U = -\frac{SB}{RC}$  après.
- Dépendance du cycle d'hystérésis?  $\rightarrow$  Il dépend principalement de la géométrie du transformateur! *(et de  $f$ )*
- Peut on mesurer  $r$  à l'ohmmètre?  $\rightarrow$  Non car  $r$  trop petit, l'appareil serait imprécis.
- Les pertes fer sont elles toujours proportionnelles à  $U_{eff}^2$ ?  $\rightarrow A priori$  non mais c'est souvent le cas car ce sont les courants induits sources des pertes fer (par hystérésis ou par effet Joule des courants de Foucault) et ces courants ont une dépendance en  $U_{eff}^2$ .