

# 16. Milieux magnétiques

Élise CAMUS et Maxime MARTINEZ

## Bibliographie

- ⊞ **Montages de physique**, *Patrick Charmont* : manip d'intro et le FeCl<sub>3</sub>
- ⊞ **Dictionnaire d'expériences IV**, *Quaranta* : ferromagnétisme et le FeCl<sub>3</sub>
- ⊞ **JPCE**, *Les agrégés* : dernière manip
- ⊞ **Magnétisme II**, *Trémollet* : quelques aspects pratiques de culture G

## Extraits de commentaires du jury

**2017** : il n'est pas souhaitable de se limiter aux milieux ferromagnétiques, savoir justifier le mécanisme de montée et la position du ménisque pour FeCl<sub>3</sub>.

**2015, 2016** : l'étude du transformateur est marginale dans ce montage.

**2008** : les grandeurs mesurées, telles que les champs rémanent et coercitif, doivent être comparées et/ou commentées.

**2007** : il faut pouvoir justifier la forme des pièces polaires de l'électro-aimant choisi.

## Plan

<b>1 Ascension d'un fluide paramagnétique</b>	<b>2</b>
1.1 Aspects théoriques . . . . .	2
1.2 Aspects pratiques . . . . .	2
1.3 Grandeurs tabulées . . . . .	3
<b>2 Étude d'un matériau ferromagnétique</b>	<b>3</b>
2.1 Mise en évidence du ferromagnétisme . . . . .	4
2.2 Aspects théoriques . . . . .	4
2.3 Aspects pratiques . . . . .	4
<b>3 Mesure de l'aimantation d'un aimant</b>	<b>5</b>
3.1 Aspects théoriques . . . . .	5
3.2 Aspects pratiques . . . . .	5
3.3 Critique de la mesure . . . . .	6

## Introduction

On désigne par milieu magnétique tout milieu qui présente une aimantation  $\mathbf{M}$  lorsqu'on lui applique un champ  $\mathbf{B}$ , on note alors (a priori  $\chi(\mathbf{H})$  et  $\mu(\mathbf{H})$ )

$$\mathbf{M} = \frac{\chi}{(1 + \chi)\mu_0} \mathbf{B} = \chi \mathbf{H} \quad \text{et} \quad \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu \mathbf{H}$$

Les équations de MAXWELL deviennent

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{et} \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt}$$

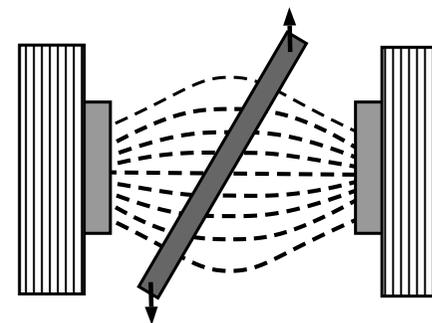
On remarque que la relation pour  $\mathbf{M}$  est définie en fonction de  $\mathbf{H}$ , car en pratique on contrôle l'intensité, c'est à dire le mouvement des charges libres, plus précisément dans l'ARQS magnétique, on a

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

Quand un matériau magnétique est soumis à un champ  $\mathbf{B}$  alors celui-ci subit une force volumique

$$\mathbf{f} = \frac{\chi}{2\mu_0} \nabla \|\mathbf{B}\|^2 \quad (1)$$

## Mise en évidence du diamagnétisme



Le diamagnétisme est la réponse universelle, linéaire de la matière à l'application d'un champ, elle est négative et de très faible amplitude ( $\chi \sim 10^{-6}$ ), elle correspond à un effet inductif des électrons en mouvement soumis à un champ magnétique. On se propose de montrer son effet sur l'équilibre d'un barreau.

Pour cette expérience qualitative il faut utiliser le barreau de bismuth (qui présente un diamagnétisme anormalement élevé), il est alors soumis à la force volumique (1).

Pour avoir un gradient important le mieux est d'utiliser des pièces tronconiques. Cependant pour des soucis pratiques (on ne peut pas utiliser à ce moment là l'électroaimant sur lequel on peut fixer de telles pièces), on utilise un petit électroaimant à pièces plates. Pour voir l'effet il faut relativement resserrer les pièces ( $\sim 3\text{cm}$ ), on a alors un gradient de champ modéré et radial, dirigé vers l'axe de symétrie donc la force aligne les pièces sur le champ (car comme  $\chi < 0$ , la force sur chaque élément de volume est radiale vers l'extérieur, donc un couple s'exerce).

## 1. Ascension d'un fluide paramagnétique

### 1.1. Aspects théoriques

On va maintenant mettre en évidence le paramagnétisme qui est une conséquence de l'orientation des moments magnétiques des atomes sur le champ magnétique appliqué. Cet effet dépend de la température, n'apparaît que dans des atomes pour lesquels les sous-couches électroniques ne sont pas toutes remplies.

On se propose de montrer le paramagnétisme dans un liquide ( $\text{FeCl}_3$ ). Les forces volumiques magnétiques vont s'ajouter à l'équilibre hydrostatique (noter que  $z_1$  et  $z_2$  sont définis positivement  $\delta h = z_1 + z_2$ )

$$\nabla \left( -\rho_{\text{sol}}gz - P + \frac{\chi_{\text{sol}}}{2\mu_0} \|\mathbf{B}\|^2 \right) = \mathbf{0} \Rightarrow (z_2 + z_1) = \frac{\chi_{\text{sol}}}{2\rho_{\text{sol}}g\mu_0} B^2$$

Il faut ensuite relier  $\chi_{\text{sol}}$  à  $\chi_{\text{FeCl}_3}$ , comme l'aimantation  $\mathbf{M}$  est intensive on peut écrire  $\sum V_{\text{sol}} \mathbf{M}_{\text{sol}} = V_i \mathbf{M}_i$ , on introduit le titre massique  $t_m = m_{\text{FeCl}_3} / m_{\text{sol}}$

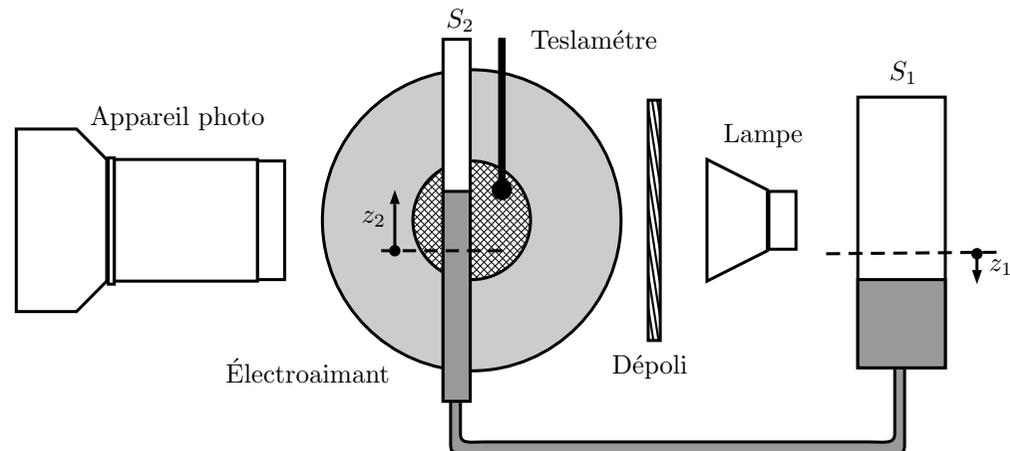
$$\frac{\chi_{\text{sol}}}{\rho_{\text{sol}}} = t_m \frac{\chi_{\text{FeCl}_3}}{\rho_{\text{FeCl}_3}} + (1 - t_m) \frac{\chi_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Il faut enfin écrire la conservation du volume :  $z_1 S_1 = z_2 S_2$  et on a

$$z_2 = \frac{\|\mathbf{B}\|^2}{2\mu_0 g \left(1 + \frac{S_1}{S_2}\right)} \left( t_m \frac{\chi_{\text{FeCl}_3}}{\rho_{\text{FeCl}_3}} + (1 - t_m) \frac{\chi_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right)$$

Ou encore en ayant tracé  $z_2 = \alpha \|\mathbf{B}\|^2 + \beta$

$$\chi_{\text{FeCl}_3} = \frac{\rho_{\text{FeCl}_3}}{t_m} \left( 2\alpha\mu_0 g \left(1 + \frac{S_2}{S_1}\right) + (t_m - 1) \frac{\chi_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right)$$



Il peut paraître contre intuitif d'observer une ascension dans un champ constant alors que la force est en  $\nabla \|\mathbf{B}\|^2$  mais on peut réfléchir ainsi : pour que le champ soit différents au niveau des deux surfaces il y a forcément un gradient de champ quelque part.

### 1.2. Aspects pratiques

#### Comment rendre $z_2$ le plus grand possible ?

On peut a priori agir sur deux grandeurs

- on peut imposer  $\mathbf{B}$  grand, le mieux pour cela étant des pièces tronconiques, mais le champ est alors moins homogène qu'avec des pièces planes ce qui peut rendre la mesure de  $\mathbf{B}$  délicate, nous utilisons donc des pièces cylindriques
- on peut prendre  $S_2 \ll S_1$  on a choisi deux tubes de diamètres très différents (une seringue et une pipette) : ceci permet de gagner un facteur 2 par rapport à l'ancien dispositif et permet une ascension raisonnable même avec des pièces cylindriques (de l'ordre de 1cm)

#### Comment mesurer $z_2$ ?

Avec ce dispositif il est évident que l'ascension doit se mesurer sur le tube dans l'entrefer. Projeter est envisageable, bien qu'un peu difficile car le tout est déjà bien encombré (mais tout à fait réalisable, le but ici est de montrer qu'on peut réaliser une mesure plus précise), on opte ici pour une série de photos traitées à l'aide du logiciel **ImageJ**, qui se prête bien à l'analyse de séquences

d'images.

On réalise une séquence d'image en notant l'intensité du champ  $\mathbf{B}$  correspondante (voir paragraphe suivant) pour chaque image (il faut être méthodique, on a vite fait de s'embrouiller). Pour éviter les problèmes de mouillage on peut (il faut) exercer une pression manuelle sur le tuyau (on s'intéresse à un équilibre hydrostatique). Le fait de mesurer des différences de hauteurs, permet aussi de ne pas se soucier de l'effet de la capillarité sur la surface libre (tant qu'on garde la même convention de lecture).

Il faut alors traiter les images. Les éléments indispensables pour travailler avec **ImageJ** sont les fonctions : Mesure (sert à mesurer les grandeurs relatives au curseur sélectionné : rectangle, ligne, etc), Set Scale (permet de définir une échelle pour l'image en cours, ou pour l'ensemble des images) et Plot Profile (permet de tracer le profil d'intensité lumineuse sur une ligne).

On ouvre la première image et on peut définir une échelle qui sera la même pour toutes les photos (si on a travaillé proprement sans tout faire bouger). Pour cela on utilise Plot Profile sur une ligne verticale entre deux repères (morceaux d'adhésif noir, dont on peut mesurer la distance au pied à coulisse). Puis on réitère le procédé pour déterminer la position relative du ménisque par rapport à un des repères, sur chaque photo (on peut passer d'une photo à l'autre à l'aide de Ctrl+Maj+O). J'ai décidé de déterminer cette position par le milieu de la vallée (correspondant au ménisque) du profil d'intensité (j'utilise pour cela le curseur rectangle). Ça peut paraître étrange, mais perso, j'arrive mieux à distinguer le milieu.

### Comment mesurer $\mathbf{B}$ ?

Quand on utilise un électroaimant, il faut toujours commencer par le désaimanter, puis réaliser son étalonnage. Cela peut être laborieux et surtout amener des incertitudes difficiles à quantifier sur la répétabilité de la mesure, en outre la relation n'est pas linéaire ce qui est jamais satisfaisant pour une courbe d'étalonnage. Ici comme précisé précédemment on détermine le champ directement dans l'entrefer au moment de la mesure. On se place alors à proximité de la surface libre, en constatant que l'effet de la translation est quasi nul. Cela permet une mesure assez fine. Bien penser à retourner la sonde pour chaque mesure, pour compenser les défauts de soudure. Attention le bon alignement de la sonde dans le champ est important.

### 1.3. Grandeurs tabulées

Les grandeurs tabulées ne sont pas celles données par le Quaranta IV (on va essayer de les mettre dans la notice). Les valeurs molaires de  $\chi$  sont historiquement données<sup>1,2</sup> en unités CGS, pour retrouver les  $\chi$  qui nous intéressent il faut donc appliquer la conversion suivante

$$\chi_{\text{FeCl}_3} = 4\pi \chi_{\text{FeCl}_3}^{\text{mol}} \frac{\rho_{\text{FeCl}_3}}{M_{\text{FeCl}_3}}$$

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\chi$ (cm <sup>3</sup> /mol)	$M$ (g/mol)
FeCl <sub>3</sub>	2.804 ± 0.001	(1.3450 ± 0.0001) × 10 <sup>-2</sup>	162.2 ± 0.1
H <sub>2</sub> O	1.000 ± 0.001	(-12.96 ± 0.01) × 10 <sup>-6</sup>	18.01 ± 0.1

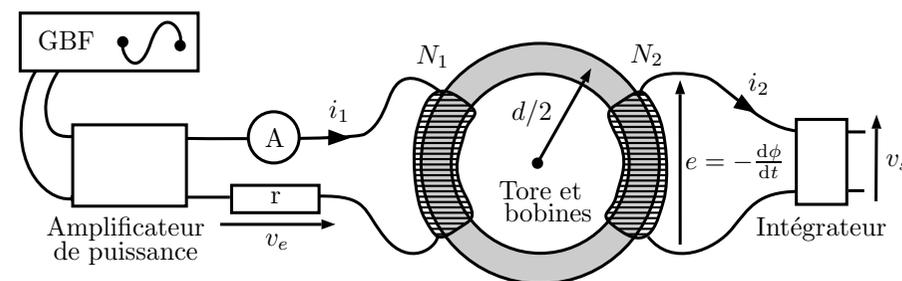
Finalement on a

$$\chi_{\text{FeCl}_3} = (2.922 \pm 0.003) \times 10^{-3} \quad \text{et} \quad \chi_{\text{H}_2\text{O}} = (-9.04 \pm 0.03) \times 10^{-6}$$

Expérimentalement, si on travaille bien on peut montrer que l'on ne peut en réalité **pas** négliger le diamagnétisme de l'eau, en préparation on a trouvé

$$\chi_{\text{FeCl}_3} = (2.87 \pm 0.08) \times 10^{-3}$$

## 2. Étude d'un matériau ferromagnétique



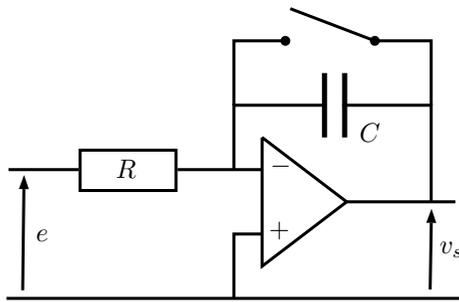
1. [https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB5444364\\_EN.htm](https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB5444364_EN.htm)  
 2. [https://www.gemstonemagnetism.com/uploads/Magnetic\\_Susceptibilities\\_of\\_the\\_Elements.pdf](https://www.gemstonemagnetism.com/uploads/Magnetic_Susceptibilities_of_the_Elements.pdf)

## 2.1. Mise en évidence du ferromagnétisme

Dans toutes les expériences précédentes on a utilisé des électroaimants, dans ces derniers se trouve un noyau d'un matériau ferromagnétique, on peut montrer l'intérêt de celui-ci. Pour cela, on mesure le champ à proximité d'une bobine avec et sans noyau. Ces matériaux ont donc une grande capacité à guider les lignes de champs : c'est le ferromagnétisme.

## 2.2. Aspects théoriques

On va ici utiliser un montage de type transformateur, dans le but d'étudier les propriétés d'un matériau ferromagnétique. Au primaire on contrôle une intensité, l'application du théorème d'AMPÈRE donne, si l'on suppose le courant nul au secondaire (avec un montage suiveur, ou bien avec une grande résistance d'entrée)



$$\pi d \|\mathbf{H}\| = N_1 i_1 - N_2 i_2 \approx N_1 i_1$$

Au secondaire justement, on a  $e = -d\Phi / dt$ , on utilise donc un circuit intégrateur, il vient (avec  $S$  la surface d'une spire)

$$v_s = -\frac{1}{RC} e(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t \frac{d\phi}{dt} dt$$

$$v_s = \frac{N_2 S}{RC} (B(0) + B(t))$$

## 2.3. Aspects pratiques

### Pourquoi un montage intégrateur ?

Pourquoi utiliser un montage intégrateur et non pas pseudo-intégrateur, pour rappel la différence entre les deux montages vient du fait que le deuxième coupe la composante continue associée à la dérive de l'offset de l'AO. Ce deuxième montage est donc un filtre coupe bas, hors ici on va travailler à (très) basse fréquence (typiquement 1Hz), cela reviendrait à un choix de résistance un peu trop élevé ( $R \ll 1/Cf \approx 0.1M\Omega$ ) pour pouvoir effectivement intégrer notre signal. En pratique, c'est peut-être réalisable, mais pas nécessaire car ici la

dérive n'est pas gênante.

On ajoute un bouton poussoir qui permet de remettre à zéro l'intégration. Plus précisément : quand on arrête l'expérience la valeur de  $B$  n'est pas nulle, car il y a un champ rémanent, cela veut dire que  $v_s$  est aussi non nul, notons cette valeur  $B_r$ . De fait, si on démarre à ce niveau la prochaine mesure, le montage va intégrer, mais  $\frac{N_2}{RC}(B_r + B(t))$  et donc tout le cycle sera décalé. Il faut garder cela en tête, en pratique la solution pour avoir un cycle centré, c'est de désaimanter, remettre à zéro l'intégrateur, puis faire parcourir le cycle : il devrait s'ouvrir depuis le point  $(0, 0)$ .

### Quelles valeurs pour les composants ?

Pour le primaire, on a pas trop le choix, on est limité par l'ampli de puissance de toute façon. Pour le secondaire, on voit (notice) que les champs à saturation ( $\mathbf{B}_{sat}$ ) attendus sont de l'ordre de 1.0T. Ce qui donne l'ordre de grandeurs de champs attendus, par simplicité on fixe  $C \approx 1\mu F$ , avec  $N_2 = 500$  et  $S = 0.2 \times 10^{-3} m^2$  on a alors  $R \sim 500 * 10^3 / v_s$ , on veut que notre  $v_s$  soit de l'ordre de 10V pour **LatisPro**, on a donc finalement  $R \sim 50k\Omega$ . On prend  $R$  variable pour ajuster le signal en fonction du matériau.

### Comment démagnétiser un ferromagnétique ?

Il faut commencer par faire parcourir des cycles d'hystérésis à une fréquence assez élevée genre 100Hz (pour avoir une variation *smooth* quand on va tendre vers le cycle limite), l'amplitude initiale puis diminuer l'amplitude du signal : on diminue ainsi la taille du cycle qui ne peut se refermer que sur le point  $(0; 0)$ . On a alors démagnétiser notre matériau.

### Comment réaliser une courbe de première aimantation ?

Avant toute chose il faut commencer par désaimanter le matériau (cf point précédent). La première méthode (un peu bourrin) consiste à utiliser une alim de puissance (attention, il est tentant de vouloir brancher une petite alim directement sur l'ampli utilisé avec le GBF, mais ça ne marche pas (je pense qu'il s'agit d'un problème d'impédance de sortie des petites alims)), c'est un peu bourrin car l'alim ne fournit pas une tension très régulière, et la courbe est donc un peu moche (c'est peu dire).

La deuxième méthode consiste à envoyer une rampe de tension, le problème c'est que l'on ne veut en envoyer qu'une seule : il faut utiliser le mode BURST du

GBF. Seulement en utilisant une rampe, on a pas réussi à ne pas avoir de sauts de tension au début, et du coup c'est loupé. Il faut donc utiliser le mode BURST mais avec une sinusoïde, ou plus précisément un quart de sinusoïde (#astuce) : on paramètre la fréquence du burst sur 4s, on synchronise **LatisPro** avec le trigger du GBF on paramètre une acquisition de 1s, on utilise un déclenchement manuel. A priori la forme du signal n'a aucune importance (sinon on pourrait pas le faire à la main), donc c'est justifié. La courbe est nettement mieux résolu qu'à la main.

### 3. Mesure de l'aimantation d'un aimant

#### 3.1. Aspects théoriques

On utilise le fait qu'un aimant permanent de volume  $V$  et d'aimantation  $\mathbf{M}$  subisse une force

$$\mathbf{F} = V(\mathbf{M} \cdot \nabla)\mathbf{B}$$

On fait ici l'hypothèse que  $\mathbf{M}$  est selon  $\mathbf{e}_z$ , en outre on place l'aimant sur l'axe de bobines placées en configuration anti-HELMOLTZ, on a alors une expression linéaire pour le champ magnétique

$$\mathbf{B} = \frac{48}{25\sqrt{5}} \frac{\mu_0 N I}{R^2} z \mathbf{e}_z + \mathcal{O}\left(\left(\frac{z}{r}\right)^4\right)$$

On va ensuite équilibrer une balance de manière à compenser le poids de l'aimant, on mesurera  $\Delta m$

$$\Delta m = V \|\mathbf{M}\| \frac{48}{25\sqrt{5}} \frac{\mu_0 N}{R^2} I$$

Le but de l'expérience est de calculer  $\mathbf{M}$ , pour cela, on va commencer par déterminer le préfacteur dans l'expression de  $\mathbf{B}$ . Pour cela on travaillera à  $I_0$  fixé on va mesurer  $\mathbf{B}$  en fonction de  $z$ , on a alors

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_z = \alpha z + \beta$$

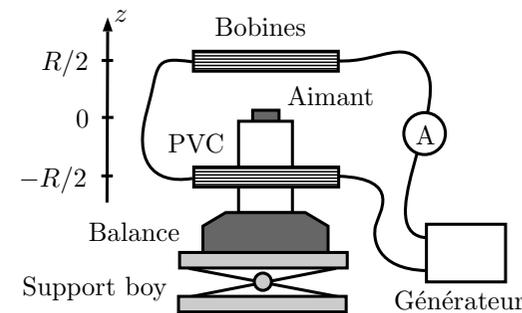
Ensuite on mesurera  $\delta m$  en fonction de  $I$  de sorte que finalement

$$\Delta m = V \|\mathbf{M}\| \alpha \frac{I}{I_0}$$

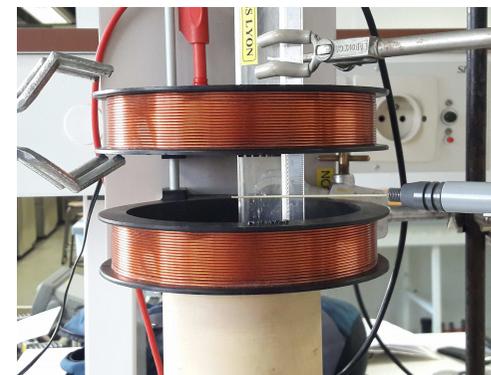
### 3.2. Aspects pratiques

#### Comment mettre en place le dispositif?

Le déroulement de l'expérience peut dérouter un peu, en particulier il faut être un peu astucieux pour réussir à faire tenir tout le système, vu qu'on ne voit pas très bien le système dans le JPCE, voici ce que l'on a fait

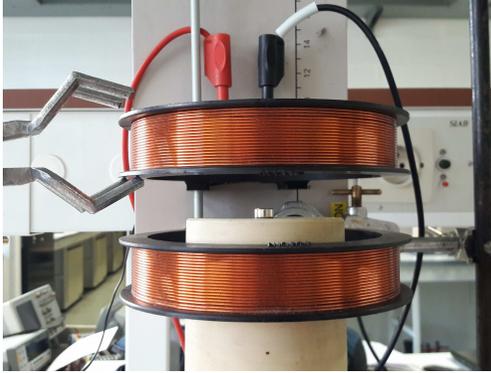


#### Comment mesurer $\mathbf{B}$ pour l'étalonnage?



La mesure directe avec l'aide de la sonde Jeulin n'est vraiment pas précise (au mieux le pas est de 1cm, alors que  $R \sim 5\text{cm}$ ), on a donc préféré utiliser un teslamètre. Pour repérer sa position (relative, au prix d'un offset non nul sur la modélisation affine) on a suspendu une règle. Retourner la sonde peut s'avérer ici laborieux, on peut sûrement supposer cette erreur minoritaire.

## Comment mesurer $\Delta m$ ?



Pour positionner le mieux est d'allumer l'alimentation est de trouver la position la plus stable. Le gradient étant homogène sur tout l'axe la position n'est pas si importante, même si a priori l'approximation linéaire est encore mieux vérifié au centre. Ensuite il suffit de faire le zéro et de mesurer  $\delta m$  pour différentes valeurs de  $i$ .

## Comment déterminer $V$ ?

C'est ici la partie la plus simple, il suffit de mesurer les dimension du l'aimant au pied à coulisse (plus dur qu'il n'y parait). En fait il est surtout intéressant de noter que le volume réel aimanté est nécessairement inférieur a celui mesuré, d'une manière non quantifiable, il faut donc le garder à l'esprit pour la discussion critique de la mesure.

### 3.3. Critique de la mesure

Une critique assez détaillée de la mesure est faite dans le JPCE, en particulier la cause la plus vraisemblable du désaccord assez important avec la valeur tabulée ne ne semble pouvoir s'expliquer que pas une désaimantation induite par un chauffage.

## Commentaires et idées