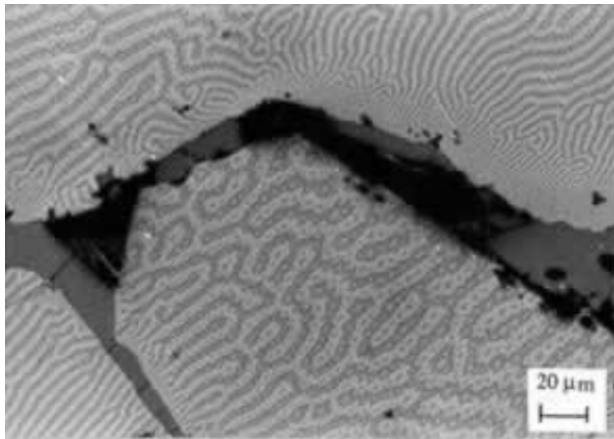
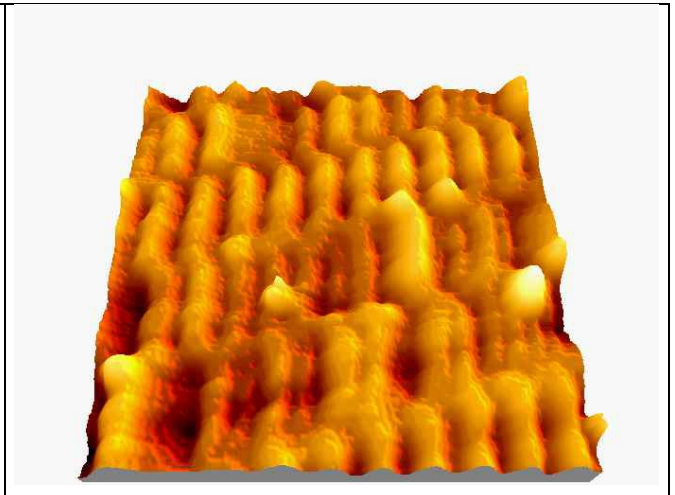


Projet expérimental de Physique Statistique

AIMANTATION



Les domaines de Weiss d'un matériau ferromagnétique observés en microscopie à effet Kerr.



Les zones magnétiques polarisées (bit 0 ou 1) à la surface d'un disque dur

Ce projet vous propose une approche expérimentale du magnétisme dans la matière. L'expérience consiste à étudier l'aimantation de différents matériaux en fonction du champ magnétique appliqué et/ou de la température. Le but du projet est de découvrir ainsi différents comportements magnétiques observés dans les solides, diamagnétisme, paramagnétisme, ferromagnétisme, supraconductivité...

1 Montage expérimental

Plusieurs techniques permettent de mesurer l'aimantation, souvent basées sur la loi de l'induction de Lenz. Mais ici, nous allons plutôt utiliser une mesure de force. Si un échantillon possédant un moment magnétique M est placé dans un champ magnétique B , il va en effet subir une force magnétique F . C'est cette force qui, par exemple, maintient les magnets sur les portes des frigos. Cette force s'écrit :

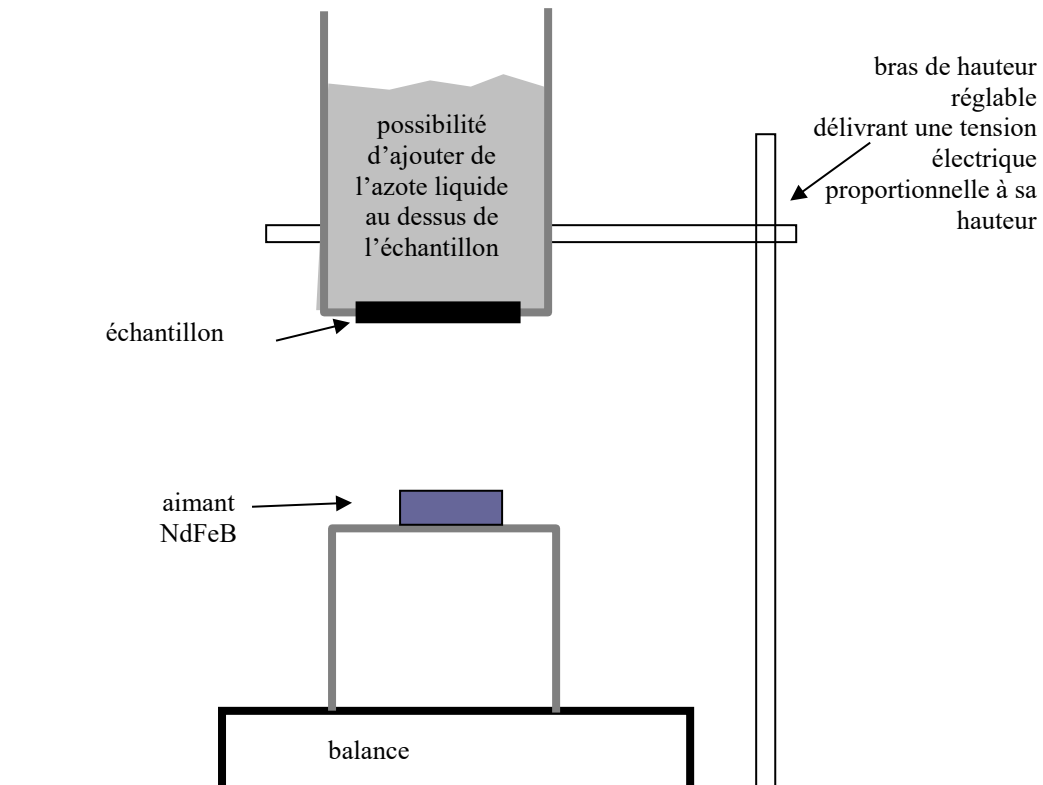
$$\vec{F} = V M \overrightarrow{\text{grad}B},$$

ou, si on projette sur un axe,

$$F_z = V M \frac{\partial B_z}{\partial z},$$

où V est le volume de l'échantillon, M son aimantation et \vec{B} le champ magnétique appliqué. Mesurer la force magnétique permet donc de mesurer l'aimantation M . On voit que cette force apparaît seulement si le gradient du champ est non nul.

Le montage pour mesurer cette force est représenté sur la figure ci-contre :



L'échantillon est placé au dessus d'un aimant qui crée le champ B (en réalité, B est rigoureusement appelée « induction »). Si l'échantillon est déplacé verticalement, cela modifie le champ B et la force qu'il subit. L'aimant est placé au-dessus d'une balance. La force exercée par l'échantillon sur l'aimant est mesurée via le poids exercé sur la balance.

L'échantillon peut éventuellement être refroidi par de l'azote liquide afin de varier la température ou réchauffé par un sèche-cheveux ou une soufflette.

L'azote : Il est impératif de demander l'autorisation à l'enseignant avant toute manipulation impliquant l'azote liquide. Ne prenez pas d'initiative à ce sujet !

La balance : ne jamais approcher d'aimant trop près du plateau de la balance. Choisir la balance adaptée à votre mesure (deux balances disponibles).

2 Nature du travail à effectuer

- **Détermination du champ magnétique B**

La valeur du champ B au niveau de l'échantillon dépend de sa position par rapport à l'aimant NdFeB. Ce champ a été mesuré avec une sonde Hall en fonction de la hauteur z entre l'aimant et l'échantillon. Ce champ suit la loi suivante :

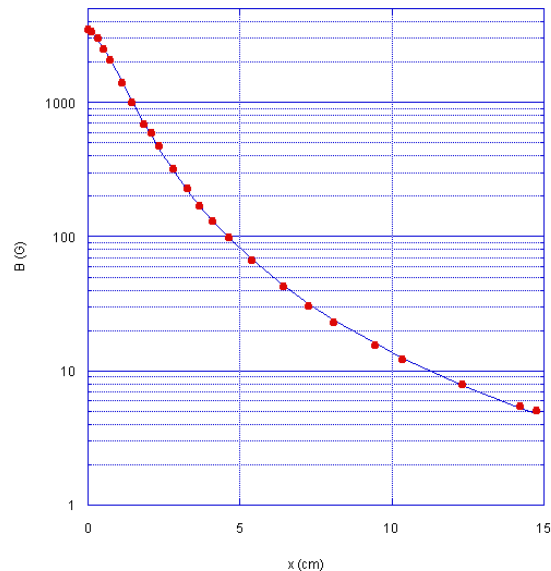
$$B(z) = B_0 \left[\frac{z-z_1}{[(z-z_1)^2 + R^2]^{1/2}} - \frac{z-z_2}{[(z-z_2)^2 + R^2]^{1/2}} \right]$$

$$\frac{dB}{dz} = B_0 \times R^2 \times \left[\frac{1}{[(z-z_1)^2 + R^2]^{3/2}} - \frac{1}{[(z-z_2)^2 + R^2]^{3/2}} \right]$$

avec z en cm, distance entre échantillon et surface de l'aimant (z = 0 quand échantillon au contact de l'aimant) et B en gauss (rappel : 1 Tesla= 10 000 Gauss)

$$\begin{aligned} B_0 &= 2859,7 \\ z_1 &= -3,3854 \\ z_2 &= 0,43022 \\ R &= 1,3568 \end{aligned}$$

Vérifier cette calibration à l'aide d'un gaussmètre.



- **Construire une interface de mesure**

Développer un programme et une interface informatique permettant de mesurer l'aimantation M de l'échantillon en fonction de la hauteur z et du champ appliqué B(z). Il pourra être utile, dans ce programme, de suivre en permanence et en direct les variations de hauteur et de poids, mais de décider avec un bouton quand on souhaite sauver un point de mesure dans un fichier.

Pour tester votre interface et votre montage, voici un test simple : mesurez l'aimantation d'un petit aimant NdFeB en fonction du champ appliqué. Normalement, cet aimant étant « permanent » et puissant, son aimantation n'est pas modifiée par le champ magnétique appliqué, au moins aux petits champs utilisés ici. Utilisez cette propriété pour vérifier votre montage.

- **Mesures quantitatives**

Vous pouvez maintenant mesurer l'aimantation M de différents matériaux en fonction du champ appliqué.

L'objectif est que vous découvriez et compreniez différents comportements magnétiques de la matière. Une série de matériaux variés vous est proposée, mais n'hésitez pas à mener des mesures sur d'autres matériaux si vous le souhaitez.

Menez ces mesures à température ambiante et tentez ainsi de distinguer les différents comportements magnétiques parmi les matériaux qui vont être proposés, en fonction du champ appliqué. Comparez à la littérature. Tentez, quand c'est possible, de déduire des valeurs quantitatives de paramètres physiques en jeu, en évaluant bien les incertitudes associées à votre mesure. N'hésitez pas à mener des mesures sur d'autres matériaux si vous le souhaitez.

Vous pourrez également compléter ces mesures par des mesures en fonction de la température (il faudra équiper votre montage d'une mesure de température à l'aide d'un thermomètre de type sonde platine). Là encore, comparez aux comportements typiques connus en magnétisme, et déduisez, quand c'est possible, des paramètres pertinents décrivant la physique en jeu.

Vous devrez décrire vos résultats en les classant selon les grandes familles de comportements magnétiques connus.

3 Le magnétisme en (très) résumé

Les matériaux peuvent avoir une aimantation M pour des raisons très variées, toutes d'origine quantique. Voici les principaux comportements connus :

Le paramagnétisme : l'aimantation est linéaire avec le champ magnétique et suit :

$$M = \chi H$$

où χ est appelée « susceptibilité magnétique » et est positive pour les paramagnétiques

Ce paramagnétisme peut avoir des origines très variées et plusieurs causes à la fois dans les solides : le spin et/ou le moment orbital des électrons non appariés dans certains isolants (« paramagnétisme de Curie »), le spin des électrons de conduction dans des métaux (« paramagnétisme de Pauli»), les effets associés au cristal (« paramagnétisme de Van Vleck) etc. C'est souvent la valeur de χ et son comportement en fonction de la température qui permet de distinguer ces comportements.

Le diamagnétisme : l'aimantation est également linéaire mais la susceptibilité χ est négative

Ce diamagnétisme peut provenir par exemple du comportement des électrons des couches internes dans les atomes (diamagnétisme de Langevin) ou du moment orbital des électrons de conduction dans un métal (diamagnétisme de Landau) ou d'effets quantiques originaux comme dans les supraconducteurs.

Le ferromagnétisme : l'aimantation n'est pas linéaire avec le champ magnétique. Cette aimantation peut même être non nulle sans champ magnétique. Elle présente de plus un comportement hystérétique (on ne retrouve pas la même valeur de l'aimantation selon l'histoire de l'échantillon en champ magnétique et/ou en température). Ce ferromagnétisme apparaît en dessous d'une température critique de Curie T_C et vient de la mise en ordre des spins du matériau tous parallèles.

D'autres ordres magnétiques : dans d'autres matériaux, les spins s'ordonnent également, mais pas tous parallèles. Par exemple, dans les matériaux anti-ferromagnétiques, en deçà d'une certaine température T_N de Néel, les spins sont antiparallèles. Dans ce cas, l'aimantation peut être linéaire avec le champ appliqué contrairement au ferromagnétisme. Autre exemple d'organisation, les matériaux ferri-magnétiques (superposition d'un ferromagnétique et d'un anti-ferromagnétique) ou encore les matériaux héli-magnétiques (les porteurs de moments sont disposés selon des hélices).

La supraconductivité : certains matériaux deviennent, en dessous d'une température T_C , supraconducteurs. Cette fois, ce sont des effets quantiques collectifs qui vont être responsable de la réponse magnétique du matériau. A bas

champ, le matériau est diamagnétique, donc $\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$ avec χ négatif, mais cette fois, c'est un diamagnétisme « géant » qui apparaît. A champ plus élevé, le comportement est plus complexe, et dépend notamment de l'apparition ou pas de vortex dans le composé.

Pour chacun des comportements ici évoqués, plusieurs paramètres physiques vont apparaître qui caractérisent le matériau. Par exemple, pour un ferromagnétique, l'aimantation par atome en l'absence de champ extérieur ou la température de Curie, ou pour un paramagnétique la constante de Curie qui est liée à l'aimantation effective moyenne portée par chaque atome qui répond au champ extérieur.

Souvent dans un matériau, plusieurs comportements peuvent s'additionner. Par exemple, dans du cuivre métallique, il y aura à la fois le paramagnétisme de Pauli (spin des électrons de conduction), le diamagnétisme de Landau (moment orbital des électrons de conduction), le diamagnétisme de Langevin (les autres électrons), etc. Il est alors important de déterminer si un comportement domine franchement les autres ou pas, ou bien si la dépendance en température permet de distinguer les différentes contributions.

Ces dernières années, la recherche dans le domaine du magnétisme s'est orientée vers des états encore plus exotiques en jouant sur la nature des couplages microscopiques entre moments pour obtenir des verres, glaces ou encore liquides de spins, analogues magnétiques des états de la matière.

Quelques ouvrages de référence pour vous aider :

- C. Kittel, "Physique de l'état solide", Dunod Université
- Ashcroft/Mermin, "Solid state physics", Saunders college publishing
- E. du Trémolet de Lacheisserie, "Magnétisme I et II", collection Grenoble Sciences
- S. Blundell, "Magnetism in Condensed Matter", Oxford Press

4 Les matériaux dont vous disposez

* aimants divers de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ($\rho=7.4 \text{ g/cm}^3$)

* Gadolinium : $\rho=7.9 \text{ g/cm}^3$

épais: 410.7mg

Fin : 114.6mg

Rouge avec sonde Pt : 523.3mg

Vert avec sonde Pt : 222.2mg

* Pyrolytic Graphite: $\rho=2.2 \text{ g/cm}^3$, $m=406.4\text{mg}$

* Cr_2O_3 : oxyde de chrome (III) $\rho=5.2 \text{ g/cm}^3$, $m=573\text{mg}$

* $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$: Sulfate de manganèse monohydraté $\rho=3.25 \text{ g/cm}^3$

* $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$: Sulfate de gadolinium octohydraté $\rho=3.01 \text{ g/cm}^3$

2 échantillons : sans sonde platine : 1.040g

avec sonde platine : 1.004g (Pt : 112.3 ohm @294K, 23.8ohm @ 77.4K)