

Préparation à l'agrégation de Sciences-Physiques ENS Physique

---

MC - Métaux

---

Durant cette séance, on s'intéresse à différentes propriétés des métaux (à opposer aux semi-conducteurs ou aux isolants). En particulier, on s'intéresse à leur propriété de dilatation, et leurs propriétés de conduction électrique et thermique.

**Bibliographie :**

- Ashcroft & Mermin, *Physique du solide*
- Kittel, *Physique de l'état solide*
- Handbook

## I) Dilatation thermique d'un barreau de cuivre

Un objet métallique se dilate lorsqu'on le chauffe. Le but de cette expérience est de mesurer le coefficient de dilatation thermique du cuivre, défini par :  $\alpha_L = \frac{1}{L} \left( \frac{dL}{dT} \right)_P$ , où  $L$  est la longueur du barreau,  $T$  la température, et  $P$  la pression. Les valeurs tabulées pour le cuivre (qui est très pur, donc ces valeurs sont parfaitement fiables, mais elles ne sont valides qu'entre 10°C et 90°C) sont  $\alpha_L = \alpha_L^0 + 2\alpha_L^1(T - 273.5)$  avec  $\alpha_L^0 = 0.1596 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  et  $\alpha_L^1 = 0.102 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ .

Pour réaliser l'expérience, il y a deux règles à respecter impérativement : avoir une température homogène le long du barreau, ce qu'on vérifie grâce à deux thermocouples (placés au centre du barreau et à une extrémité), et minimiser les vibrations durant toute l'expérience, le dispositif permettant de mesurer la longueur du barreau étant **très** sensible (attention, toucher la table de mesure peut perturber les instruments). En pratique, avoir une température homogène impose de travailler pendant le refroidissement du barreau.

L'élément chauffant peut supporter une intensité considérable (jusqu'à 12 A), en pratique l'alimentation électrique est le facteur limitant. Par ailleurs, à ces intensités l'élément est porté au rouge, et il n'est pas question d'aller jusqu'à des températures aussi hautes. Un bon compromis est de ne pas dépasser 5A. On peut atteindre rapidement une température d'environ 250°C (en 15min). Il faut alors compter 45 min pour redescendre à 100°C. On gagne nettement sur le temps de manipulation en partant d'une température moins élevée.

### Protocole expérimental

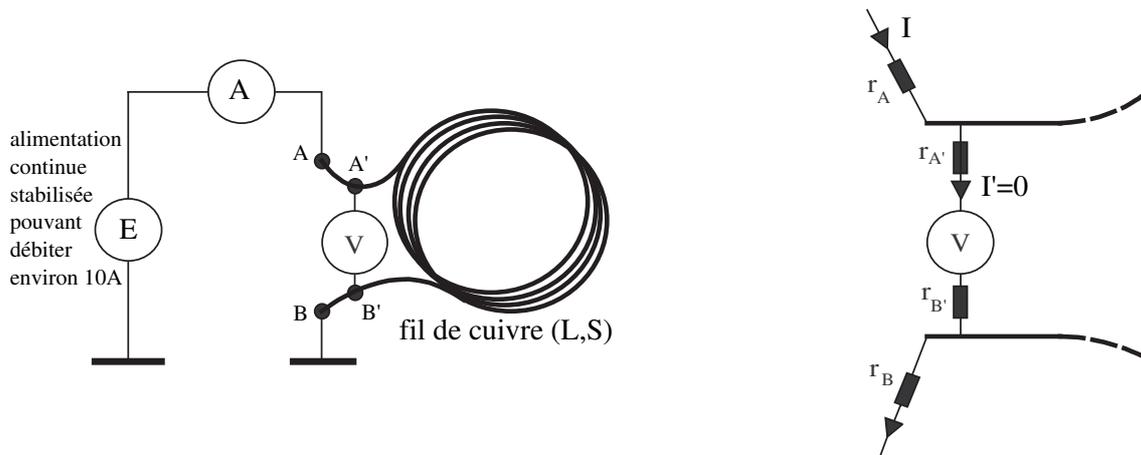
Placer les détecteurs en contact avec le barreau lorsqu'il est froid. Commencer à chauffer, sans dépasser 250°C jusqu'à observer une dilatation suffisante, mais sans faire de vraies mesures. Couper le chauffage et attendre l'homogénéisation de la température (à quelques % près). Procéder aux mesures en température décroissante.

## II) Évolution de la conductivité électrique d'un métal avec T

On dispose d'un long rouleau de fil de cuivre, de section  $S$  et longueur  $L$  connues.

### 1) Principe de la mesure à 4 points

La résistance de ce fil de cuivre étant très faible (quelques centièmes d' $\Omega$ ), on doit utiliser une méthode de mesure particulière : elle permet de s'affranchir de la résistance parasite des contacts et des fils de liaison. Le principe de cette mesure à 4 points est que les fils d'amenée du courant et de mesure de la tension ne soient pas connectés au même point du composant dont on veut mesurer la



résistance. Sur la figure ci-dessus, on représente ces résistances parasites, et on voit que la mesure au voltmètre ne les fait effectivement pas intervenir puisque  $r_{A'}$  et  $r_{B'}$  sont parcourues par un courant  $I'$  négligeable devant le courant principal  $I$ .

Comparer les indications du voltmètre lorsqu'il est branché en  $A$  et  $B$  ou en  $A'$  et  $B'$ , et en déduire un ordre de grandeur des résistances parasites.

## 2) Mesure de la conductivité électrique du cuivre

En plongeant le fil dans un cristalliseur contenant de l'eau, mesurer la résistance en fonction de la température sur une large plage (au moins  $30^\circ\text{C}$ ). Vérifier qu'on peut approximer localement la résistivité en fonction de la température par une loi affine (loi de Matthiessen :  $\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]$ )<sup>1</sup> et retrouver le coefficient  $\alpha$ , appelé coefficient de température, tabulé dans le Handbook.

## III) Mesure de la conductivité thermique du cuivre

On dispose d'un montage contenant un barreau de cuivre dont la température est fixée à une extrémité par une circulation d'eau, et qui est chauffé à l'autre extrémité par une résistance de puissance de  $47 \Omega$ . Deux thermocouples sont insérés dans le barreau, distants de 100 mm.

Faire passer une puissance de quelques watts dans la résistance de  $47 \Omega$ , et mesurer le gradient de température dans le barreau. Attendre l'établissement du régime permanent (il peut être intéressant d'estimer le temps caractéristique). En déduire la conductivité thermique du cuivre  $\lambda$ . Pour cela, on peut supposer que la puissance électrique fournie contribue entièrement au flux thermique à travers le barreau<sup>2</sup>.

### Analyse

Rapprocher la valeur trouvée pour la conductivité *thermique* de celle trouvée pour la conductivité *électrique*. La loi de Wiedemann-Franz (cf. Kittel, *Physique de l'état solide*) indique que : « pour les métaux à des températures pas trop basses, le rapport de la conductivité thermique à la conductivité

<sup>1</sup>En toute rigueur, la section et la longueur du fil augmentent avec la température. Il faudrait donc en tenir compte pour remonter à la conductivité. Cet effet est cependant négligeable ici.

<sup>2</sup>Cette hypothèse conduit vraisemblablement à surestimer le flux thermique et donc la conductivité.

électrique est directement proportionnel à la température, la valeur de la constante de proportionnalité étant indépendante du métal considéré. Ce résultat fut très important dans la théorie des métaux car il fut l'une des preuves du modèle du gaz d'électrons. » Comparer vos mesures à la valeur attendue pour le rapport

$$\frac{\lambda}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.44 \times 10^{-8} \text{ S.I.}$$

## IV) 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

Fixer, avec des pinces de chimie attachées à un pied d'optique, 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 appelée  $L$ . Mettre de la mousse (2 épaisseurs) sous le tube. L'aimant utilisé est composé de l'association de 3 aimants NdFeB très puissants. Éviter de l'approcher des écrans cathodiques ou d'autres dispositifs sensibles, et aussi de tout objet en acier (par exemple le pied), 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 numérique aux deux bobines. Régler le déclenchement en mode DC sur **Single** et adapter le **Level** à environ 0.5 V. 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 BUPs 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.

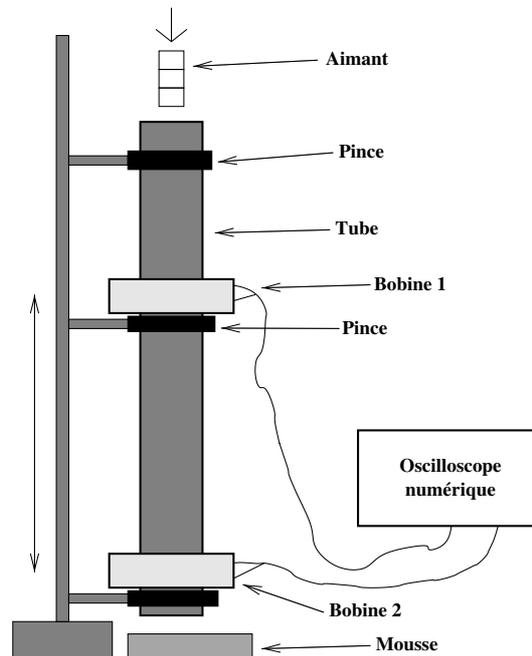


FIG. 1 – Schéma de l'expérience

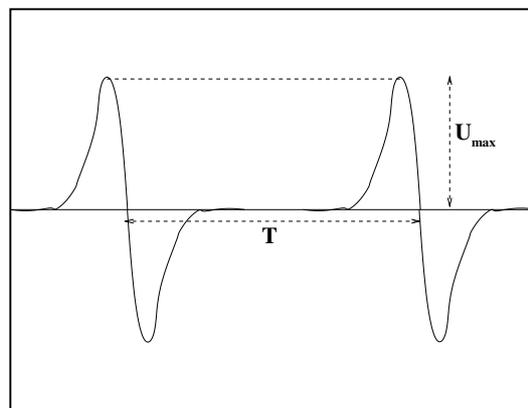


FIG. 2 – Signal observé à l'oscilloscope (deux voies) lors du passage de l'aimant à travers les bobines.

### 3) Interprétation

#### a) Le freinage magnétique

Lorsque l'aimant chute à la vitesse  $\vec{v}$ , il se forme dans le référentiel du tube un champ électrique induit  $\vec{E} = -\vec{v} \wedge \vec{B}$ , où  $\vec{B}$  est le champ magnétique produit par l'aimant ( $-\vec{v}$  est la vitesse du tube par rapport à l'aimant), et il se crée 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  $e_{induite} = -\frac{d\Phi}{dt}$ , où  $\Phi$  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) :  $2.1 \times 10^7 \text{ S.m}^{-1}$