

Montage de physique 17 : Métaux.

Yoann Genolini et Arnaud Ghibaudo

Année 2012-2013

Rapports du jury

- 2012** : « Ce montage doit mettre en évidence différentes caractéristiques propres aux métaux (conductivités thermiques et électriques, élasticité...) et leur lien éventuel. Les mesures doivent être particulièrement soignées. Il est intéressant de montrer la spécificité des valeurs obtenues. »
- 2011** : « Ce montage doit mettre en évidence différentes caractéristiques propres aux métaux. Les expériences présentées se réduisent souvent aux conductivités thermiques et électriques. »
- 2010** : « Ce montage doit mettre en évidence différentes caractéristiques propres aux métaux. L'étude de caractéristiques mécaniques par exemple nécessite d'être mise en perspective par rapport aux propriétés équivalentes d'autres matériaux. »
- 2009** : « La mesure de la conductivité thermique d'un métal par sa réponse en température à une excitation alternative a posé problème à de nombreux candidats par suite de l'analyse des mesures à l'aide d'une loi non valide avec les conditions aux limites concernées. Le régime permanent implicitement mis en jeu doit être précisé, de même que son temps d'établissement. »
- 2008** : « La mesure de la conductivité thermique d'un métal par sa réponse en température en régime variable a posé des problèmes à de nombreux candidats. Les études menées en régime permanent sont plus simples et ont donné de meilleurs résultats. »

Bibliographie

- Christian Garing, *Magnétisme : statique, induction et milieux* (chute d'un aimant dans un tube conducteur)
- Neil W. Ashcroft et N. David Mermin, *Physique des solides*

Table des matières

1 Propriétés mécaniques d'un métal	2
2 Conductivité thermique des métaux	3
3 Propriétés électriques d'un métal	4
3.1 Conductivité électrique du cuivre : loi d'Ohm	4
3.2 Conductivité électrique de l'aluminium : chute d'un aimant dans un tube conducteur	6
3.3 Nombre de porteurs de charge de l'argent par unité de volume : effet Hall	8
4 Conclusion	9

Introduction

L'utilisation des métaux a connu un essor important lors de la Protohistoire (divisée en trois âges : cuivre, bronze et fer). Bien que certains métaux étaient déjà connus et façonnés lors de la Préhistoire - l'or notamment -, ils ne servaient que de compléments à l'industrie de l'os et de la pierre. La nouvelle maîtrise de la métallurgie a provoqué de nombreux bouleversements économiques et sociaux, en apportant entre autres le mercantilisme, la richesse et donc la guerre.

À cette époque, l'homme exploitait les métaux pour leurs propriétés mécaniques, et notamment leur grande rigidité. Ce n'est que bien plus tard, avec la connaissance des phénomènes électromagnétiques et thermodynamiques, que l'on utilisa alors les métaux pour leurs propriétés électriques et thermiques.

- Le terme *métal* est très global et désigne en réalité une classe de matériaux ayant des propriétés spécifiques :
- bonnes conductions électrique et thermique

Si on introduit désormais le bloc de Dural d'une épaisseur e de $40.6 \pm 0.5 \text{ mm}$, l'expression du temps mis par le son pour parcourir la distance D entre les deux transducteurs est :

$$\Delta t = \frac{D - e}{c_{eau}} + \frac{e}{c_{Dural}} \quad (2)$$

Soit :

$$c_{Dural} = \left(\frac{\Delta t}{e} - \frac{D - e}{ec_{eau}} \right)^{-1} \quad (3)$$

Les enregistrements effectués ont pour allure :

La aussi en multipliant les mesures pour diminuer l'incertitude (difficile à calculer), on trouve :

$$c_{Dural} = (6.7 \pm 1.4) 10^3 \text{ m.s}^{-1} \quad (4)$$

La valeur tabulée pour le Dural est de 6280 m.s^{-1} . Cette valeur est bien contenue dans la barre d'incertitude de la valeur mesurée.

A partir de cette valeur, on peut remonter à une estimation du module d'Young du matériau connaissant sa densité :

$$c_{Dural} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

Comme $\rho = 2790 \text{ kg.m}^{-3}$, on en déduit que $E = (1.2 \pm 0.5) 10^{11} \text{ Pa}$.

Dans la classifications périodique des éléments présentées en introduction, le module d'Young des métaux varie d'un ordre de grandeur quand on passe du cuivre au sodium (à même température) par exemple. La rigidité que présente certains métaux à température ambiante, et qui est très convoitée pour la construction de structures rigides, ne saurait englober leur diversité. D'autres propriétés sont aussi importantes comme leur conductivité thermique. Cette dernière a été valorisée historiquement dès la découverte du cuivre dans la confection de casseroles servant à la cuisson des aliments.

2 Conductivité thermique des métaux

« Manipulation introductive » : Avec le conductoscope qui permet de visualiser le gradient de température à l'aide d'une barette à cristaux liquides, on montre que les métaux sont de bons conducteurs thermiques et que le cuivre est le meilleur conducteur parmi les quatre métaux présentés.

Pour déterminer la conductivité thermique du cuivre λ , on utilise le phénomène d'effet de peau thermique. On dispose pour cela d'une barre de cuivre calorifugée, sur laquelle est placé à une extrémité une cellule Peltier qui permet d'imposer une condition limite sinusoïdale en température. La cellule Peltier est alimentée par la Kepco elle-même commandée par un GBF. Des capteurs régulièrement espacés sur la barre, permettent de suivre l'évolution de la température à différents points. La différence d'amplitude ou de phase entre l'onde de chaleur entre les thermocouples nous permet de remonter à l'épaisseur de peau δ caractéristique du cuivre puis à λ .

Plusieurs complications sont à noter dès lors qu'on utilise cette barre. Premièrement (les faux contacts), il faut s'assurer qu'il n'y a pas de réflexion de l'onde au bout de la barre. Dans le cas contraire la solution est beaucoup plus compliquée. Pour cela en se plaçant en régime permanent (attendre longtemps... au moins 30 min), on vérifie que le dernier capteur ne subit pas de variation de température. Si ce n'est pas le cas il est alors nécessaire d'augmenter la fréquence puisque $\delta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\rho c \omega}}$. Deuxièmement la cellule Peltier se comporte aussi comme un conducteur ohmique. La cellule n'impose donc pas une parfaite sinusoïde de température, mais à cause de l'effet Joule, une température de la forme :

$$T(t, x = 0) = T_{amb} + A \sin(\omega t) + B \sin(\omega t)^2 \quad (6)$$

La résolution de l'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 T \quad (7)$$

conduit à une solution de la forme :

$$T(t, x) = T_{amb} + \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \left(A \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right) + B \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right)^2 \right) \quad (8)$$

Les acquisitions obtenues avec synchronie sont exploitées sous régréssion et fitée avec la loi ci dessus en ajoutant une phase dans le sinus. c'est la différence de phase entre deux enregistrements provenant de thermocouples voisins qui nous permet de remonter à la longueur de peau :

$$\Delta\phi = \frac{\Delta x}{\delta} \quad (9)$$

En calculant la moyenne des δ déterminés à partir des différents $\Delta\phi$, on obtient :

$$\delta = 0.058 \pm 0.004m \quad (10)$$

L'imprécision provient ici de la position des thermocouples sur la barre (estimée à $\pm 3mm$ près), et de la valeur de la phase fournie par Régréssi ($\pm 1.5\%$).

Donc connaissant δ , on peut en déduire λ :

$$\lambda = \frac{\delta^2 \rho C v C_u \omega}{2} = 358 \pm 27 W.m^{-1}.K^{-1} \quad (11)$$

Proche de la valeur tabulé à $390 W.m^{-1}.K^{-1}$ (Pérez de thermodynamique)

Cette propriété des métaux de bien conduire la chaleur est une propriété électronique de ces matériaux qui sont aussi conducteur de courant. Le caractère conducteur des métaux est la dernière propriété à avoir été découverte historiquement et valorisée. Dans la partie suivante nous allons nous quantifier cette conductivité pour le cuivre et l'aluminium.

3 Propriétés électriques d'un métal

3.1 Conductivité électrique du cuivre : loi d'Ohm

Référence : Vos notions poussées de loi d'Ohm.

Dans cette partie, nous allons mesurer la conductivité électrique du cuivre, à l'aide, ma foi, d'un montage particulièrement subtil. Pour cela, on utilise une bobine 500 spires, un générateur de tension continue, un ampèremètre et un voltmètre. On fait passer un courant I à l'intérieur de la bobine et on mesure alors le courant et la tension U aux bornes de la bobine. La bobine est constituée d'un fil de cuivre enroulé autour d'un support en plastique, elle a donc une certaine résistance R . Avec une certaine intuition physique, on pense à utiliser la loi d'Ohm, qui nous donne :

$$U = Ri \quad (12)$$

La relation entre la résistance et la conductivité électrique est $R = \frac{l}{\sigma S}$, où l est la longueur du fil de cuivre et S sa section. On en déduit la relation :

$$\sigma = \frac{Il}{US} \quad (13)$$

Ainsi, avec la mesure de I et U , et en déterminant les caractéristiques de la bobine (l et S), on peut remonter à la conductivité électrique du cuivre. C'est ce que nous faisons en prenant plusieurs points et en traçant $U = f(I)$ sur *Regressi* (figure 2).

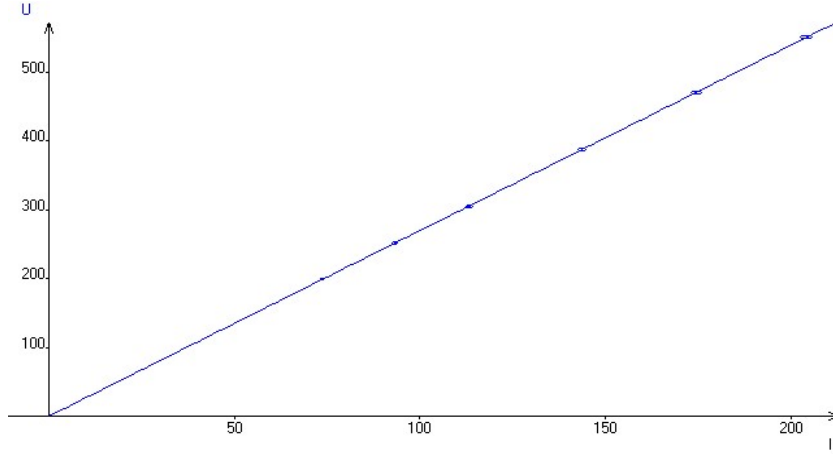
La modélisation linéaire donne la résistance de la bobine :

$$R = 2,695 \pm 0,002 \Omega \quad (14)$$

Le principe de l'expérience étant terriblement simple, il faut discuter les erreurs le plus proprement possible.

Pour les mesures électriques, il faut se référer à la documentation des multimètres (ici des *FLUKE 187*). On calcule les erreurs et on les rentre dans *Regressi*, ce qui les fait apparaître sur la courbe. L'erreur faite à ce niveau-là est très faible et peut être négligée¹.

1. En réalité, il faudrait aussi tenir compte de la résistance des fils, mais elle est difficile à estimer. Il faut bien comprendre que l'on ne mesure pas la résistance de la bobine à l'ohmmètre car l'imprécision de l'appareil est trop importante.

FIGURE 2 – Mesure de la conductivité électrique du cuivre : U en fonction de I .

Pour la section du fil de cuivre, nous n'avons pas de documentation et nous n'avons pas la possibilité de la mesurer ni d'estimer les erreurs. Il faut donc se référer à l'indication donnée sur la bobine, qui est en l'occurrence $r = 0,5$ mm. Il est difficile d'estimer l'erreur. Comme il s'agit d'un produit industriel, on peut supposer raisonnablement une erreur de 5%.

Enfin, la plus grande imprécision est faite sur la mesure de la longueur du fil. En effet, nous ne pouvons pas dérouler le fil pour le mesurer précisément - ce qui ne serait de toute façon pas possible vu sa longueur, qui sera bientôt dévoilée ! Nous devons donc faire une approximation, en estimant une longueur de spire moyenne. Pour cela, on mesure au pied à coulisse (les approximations sont déjà assez lourdes, inutile d'en rajouter en utilisant une pauvre règle à $\pm 0,5$ cm d'incertitude, conseil dû à une expérience personnelle tragique) la longueur du carré intérieur l_{int} et celle du carré extérieur l_{ext} :

$$l_{int} = 180 \pm 20 \text{ mm} \quad (15)$$

$$l_{ext} = 300 \pm 20 \text{ mm} \quad (16)$$

On a déjà une erreur faite ici, car nous ne considérons pas l'épaisseur du support pour le carré intérieur, ni le fait que les spires ne forment pas tout à fait des carrés. On suppose une erreur de 5 mm par côté mesuré pour l'intérieur, soit 20 mm d'erreur pour l_{int} . Pour la spire extérieure, on suppose une erreur de 5 mm par « coin » de la bobine, on a donc une erreur de 20 mm. On estime alors la longueur, d'une spire :

$$l_{spire} = \frac{l_{int} + l_{ext}}{2} = 240 \pm 20 \text{ mm} \quad (17)$$

On en déduit la longueur totale de la bobine en multipliant par le nombre de spires N :

$$l = N l_{spire} = 120 \pm 10 \text{ m} \quad (18)$$

Comme quoi, il y aurait quand même dix mètres de bobine qui nous échappent !

Après avoir discuté les erreurs, nous pouvons enfin calculer la conductivité électrique σ et l'erreur commise :

$$\sigma = \frac{l}{RS} = 5,8 \cdot 10^7 \pm 0,56 \cdot 10^7 \text{ S m}^{-1} \quad (19)$$

où l'erreur a été calculée à partir de la formule :

$$\Delta\sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \simeq \sqrt{0 + \left(\frac{10}{120}\right)^2 + 0,05^2} \simeq 0,097 \quad (20)$$

La valeur tabulée de la conductivité électrique du cuivre à température ambiante est $\sigma_{Cu,tab} = 5,81 \cdot 10^7 \text{ Sm}^{-1}$, le résultat obtenu est donc très satisfaisant et rentre dans la barre d'erreur.

Nous venons de déterminer la conductivité électrique du cuivre par une méthode simple. Il serait intéressant de pouvoir la comparer avec celle d'un autre métal couramment utilisé dans la vie quotidienne, c'est ce que nous allons faire en étudiant le comportement de l'aluminium.

3.2 Conductivité électrique de l'aluminium : chute d'un aimant dans un tube conducteur

Référence : Chrisitian Garing, *Magnétisme : statique, induction et milieux*, p.163-170.

Dans cette partie, nous allons déterminer la conductivité électrique de l'aluminium. Malheureusement, nous n'avons pas de bobine en aluminium sous la main, mais nous allons utiliser moult astuces pour déterminer la conductivité électrique autrement. Nous allons en fait illustrer un autre principe physique (finalement ce n'est pas plus mal!) : l'induction électromagnétique. On utilise un petit aimant, qui joue le rôle d'un dipôle magnétique, et deux tubes, un de cuivre et un d'aluminium. On lance l'aimant dans le tube de cuivre. On remarque alors que la chute est très lente.

En fait, l'aimant, lors de sa chute, crée des courants de Foucault au sein du tube en cuivre qui est très conducteur. La loi de Lenz nous permet de prévoir que ces courants vont s'opposer à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire au mouvement de l'aimant. Ainsi, la chute de l'aimant est freinée jusqu'à atteindre une vitesse limite v_{lim} . En réalité, le régime transitoire est très court et on pourra négliger le temps d'établissement du régime permanent dans nos calculs.

Un peu de théorie et un calcul assez long et pénible prévoit pour la vitesse limite :

$$v_{lim} = \frac{1024r^4mg}{45\mu_0^2\sigma e\mathcal{M}^2} \quad (21)$$

où r est le rayon moyen du cylindre, m la masse de l'aimant, g l'accélération de pesanteur, σ la conductivité électrique du tube, e l'épaisseur du tube de cuivre et $\mathcal{M}$ l'aimantation du dipôle magnétique.

On constate que la conductivité électrique du cylindre apparaît dans l'expression de la vitesse limite. On peut déterminer le rayon moyen r et l'épaisseur e à l'aide d'un pied à coulisse. La seule donnée dérangement est l'aimantation $\mathcal{M}$ de l'aimant. Pour s'en affranchir, on va en réalité effectuer une mesure relative : on fait l'expérience pour un tube de cuivre et un tube d'aluminium, et on écrit le rapport :

$$\frac{\sigma_{Al}}{\sigma_{Cu}} = \frac{r_{Al}^4 e_{Cu} v_{lim,Cu}}{e_{Al} r_{Cu}^4 v_{lim,Al}} \quad (22)$$

Soit :

$$\sigma_{Al} = \frac{r_{Al}^4 e_{Cu} v_{lim,Cu}}{e_{Al} r_{Cu}^4 v_{lim,Al}} \sigma_{Cu} \quad (23)$$

Il ne nous reste plus qu'à faire les mesures. Les mesures des longueurs au pied à coulisse donnent :

$$e_{Cu} = 1,01 \pm 0,05 \text{ mm} \quad (24)$$

$$r_{Cu} = 6,2 \pm 0,1 \text{ mm} \quad (25)$$

$$e_{Al} = 1,08 \pm 0,05 \text{ mm} \quad (26)$$

$$r_{Al} = 7,2 \pm 0,1 \text{ mm} \quad (27)$$

où les erreurs sont dues au fait que le cylindre n'est pas parfaitement circulaire. Même si les mesures demeurent très précises, il est bon de noter que le rayon apparaît tout de même à la puissance 4 dans l'expression.

Enfin, pour mesurer les vitesses limites, on utilise deux capteurs optiques reliés à un chrono-compteur. Les capteurs sont placés immédiatement avant l'entrée et après la sortie du tube. Ensuite, le problème du lâcher d'aimant se pose. On utilise les petits aimants très puissants en forme de pastille. Mais si l'on suit à l'oeil le trajet de l'aimant dans le tube, on voit qu'il tourne, ce qui nuit aux hypothèses de calcul (l'aimantation est dirigée suivant $\mathbf{u}_z$). Pour pallier ce problème, on associe d'autres aimants identiques (on en prend trois). Cela permet d'empêcher la rotation de l'aimant au cours de la chute. La temps de chute n'est pas beaucoup modifié, car la

masse m de l'aimant apparaît au numérateur dans l'expression de la vitesse limite, tandis que l'aimantation $\mathcal{M}$ de l'aimant apparaît au dénominateur. Le problème pratique de procéder ainsi est que le lâcher est un peu plus difficile. Donc pour éviter tout problème, on place le capteur du haut (l'entrée) en front descendant. On place alors l'aimant entre les deux branches du capteur (et donc il sera en partie déjà dans le tube) puis on le lâche. Le chrono-compteur se déclenchera alors lorsque l'aimant sera entièrement passé. À la sortie, le deuxième capteur est branché en front montant, il détectera donc l'apparition de l'aimant. Il faudra donc prendre en compte la taille de l'aimant dans les calculs.

On mesure alors la longueur l de l'aimant au pied à coulisse - ce qui est de grande précision vu qu'il s'aimante particulièrement bien sur le pied à coulisse - et la longueur L des tubes à la règle :

$$l = 14,88 \pm 0,01 \text{ mm} \quad (28)$$

$$L_{Cu} = 503 \pm 5 \text{ mm} \quad (29)$$

$$L_{Al} = 405 \pm 5 \text{ mm} \quad (30)$$

où les erreurs estimées sont celles des instruments de mesure. L'erreur faite sur la longueur de l'aimant est donc négligeable.

On effectue une dizaine de mesures pour les temps τ de chute dans le cylindre conducteur et on moyenne (c'est une expérience très rapide à faire, je pense qu'il est possible de demander un peu plus d'échantillons aux techniciens le jour de l'épreuve!). On obtient :

$$\tau_{Cu} = 6,5 \pm 0,8 \text{ s} \quad (31)$$

$$\tau_{Al} = 2,4 \pm 0,2 \text{ s} \quad (32)$$

où les erreurs ont été calculées à partir de la formule statistique :

$$\Delta\tau = \frac{\sqrt{\sum_i (t_i - \tau)^2}}{\sqrt{N}} \quad (33)$$

On en déduit les vitesses limites respectives :

$$v_{lim,Cu} = 7,5 \cdot 10^{-2} \pm 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1} \quad (34)$$

$$v_{lim,Al} = 16 \cdot 10^{-2} \pm 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1} \quad (35)$$

où les erreurs ont été déterminées par :

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2} \quad (36)$$

Finalement, nous pouvons déterminer la conductivité électrique de l'aluminium :

$$\boxed{\sigma_{Al} = 4,6 \cdot 10^7 \pm 0,9 \text{ S m}^{-1}} \quad (37)$$

où l'erreur a été calculée à partir de la propagation des erreurs en racine carrée.

La valeur tabulée de la conductivité de l'aluminium à température ambiante est $\sigma_{Al} = 3,54 \cdot 10^7 \text{ S m}^{-1}$. Nous avons donc le bon ordre de grandeur, mais la valeur tabulée ne rentre pas dans notre barre d'incertitude. Il faut faire attention cependant lorsque l'on fait cette comparaison, car on ignore à quelle température ambiante on se place précisément. D'autres tables donnent $\sigma_{Cu} = 5,96 \cdot 10^7 \text{ S m}^{-1}$ et $\sigma_{Al} = 3,77 \cdot 10^7 \text{ S m}^{-1}$.

Jusqu'à présent, nous avons déterminé la conductivité électrique de deux métaux de la vie quotidienne, mais seulement à température ambiante. Il s'avère que la conductivité électrique d'un métal dépend fortement de la température. Plus précisément, elle augmente lorsque la température diminue. Nous allons illustrer qualitativement ce résultat en utilisant la même expérience, mais cette fois-ci en plongeant le tube de cuivre dans de l'azote liquide. On attend quelques minutes (le temps de traiter l'effet Hall qui suit), puis on retire (avec un gant évidemment) le tube de cuivre qui aura eu le temps de s'homogénéiser raisonnablement en température. On renouvelle alors l'expérience : on lance l'aimant et on peut compter nous-mêmes le temps de chute, qui est considérablement plus important (environ dix secondes).

Nous venons de montrer que les métaux sont de bons conducteurs électriques et avant cela, nous avons vu qu'ils sont aussi de bons conducteurs thermiques. En fait, pour les métaux, les deux notions ne sont pas entièrement décorréliées : la forte mobilité électronique explique qu'ils vérifient à la fois les deux propriétés. En 1853, une loi empirique reliant les deux conductivités a été établie, il s'agit de la *loi de Wiedmann-Franz* :

$$\lambda = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 T \sigma \quad (38)$$

Ainsi, plus un métal est un bon conducteur électrique, plus il est aussi un bon conducteur thermique. Nous avons en figure 3 quelques conductivités électriques de différents types de matériaux à température ambiante. On met en évidence le fait que les métaux sont en effet meilleurs conducteurs électriques que les autres classes de matériaux.

Substance	$\sigma, \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$	Substance	$\sigma, \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$
Métaux		Semi-conducteurs	
Cuivre	$5,81 \times 10^7$	Carbone	$2,8 \times 10^4$
Argent	$6,14 \times 10^7$	Germanium	$2,2 \times 10^{-2}$
Aluminium	$3,54 \times 10^7$	Silicium	$1,6 \times 10^{-5}$
Fer	$1,53 \times 10^7$		
Tungstène	$1,82 \times 10^7$	Isolants	
Alliages		Verre	$10^{-10} \text{ à } 10^{-14}$
Manganèse	$2,27 \times 10^6$	Lucite	$< 10^{-13}$
Constantan	$2,04 \times 10^6$	Mica	$10^{-11} \text{ à } 10^{-15}$
Nichrome	$1,0 \times 10^6$	Quartz	$1,33 \times 10^{-18}$
		Teflon	$< 10^{-13}$
		Paraffine	$3,37 \times 10^{-17}$

FIGURE 3 – Quelques conductivités électriques à température ambiante (banque d'images, LY07PPS002).

De nos jours, cette propriété des métaux est exploitée dans toute l'électronique, notamment dans le transport, c'est-à-dire les câbles électriques.

Nous allons aborder une dernière partie, qui mettra en évidence le nombre important de porteurs de charge par unité de volume existant dans les métaux.

3.3 Nombre de porteurs de charge de l'argent par unité de volume : effet Hall

La forte conductivité électriques des métaux est liée au nombre important d'électrons très mobiles - appartenant à la bande de conduction. Nous allons voir qu'il est possible d'avoir accès à ce nombre en se basant sur l'effet Hall.

On place une lame d'argent dans l'entrefer d'un électroaimant qui génère un champ magnétique $\mathbf{B}$ transverse. Nous faisons circuler un courant I dans la barre dans le sens de la longueur. Les porteurs de charge mobiles sont alors déviés et une différence de potentiel apparaît dans la direction de la largeur : c'est la *tension de Hall*. On détermine alors la relation liant la tension de Hall U_H , l'intensité I et l'amplitude du champ magnétique B :

$$U_H = \frac{BI}{nqe} \quad (39)$$

où n est le nombre de porteurs de charge par unité de volume, q la charge élémentaire et e l'épaisseur de la lame d'argent.

En réalité, les soudures permettant de mesurer la tension de Hall ne sont a priori pas parfaitement alignées, il existe donc une tension parasite δ dans la mesure. La lame d'argent est munie d'un potentiomètre qui est censé permettre de corriger ce problème (on remarque que l'un des côtés de la lame a deux soudures). Néanmoins, il

est préférable d'en faire abstraction, et d'effectuer la correction comme pour les autres lames qui n'ont pas ce système : pour chaque mesure, on modifie le sens du champ magnétique créé par l'électroaimant. Ainsi, on a deux mesures :

$$U_{H,plus} = \frac{BI}{nqe} + \delta \quad (40)$$

$$U_{H,moins} = -\frac{BI}{nqe} + \delta \quad (41)$$

Ainsi, on peut éliminer δ en écrivant :

$$U_H = \frac{U_{H,plus} - U_{H,moins}}{2} = \frac{BI}{nqe} \quad (42)$$

On effectue une série de mesures en faisant varier I et en se plaçant à un champ magnétique B constant. Ici on a pris :

$$B = 500 \pm 10 \text{ mT} \quad (43)$$

où l'erreur est estimée en considérant le fait que le champ dans l'entrefer n'est pas tout à fait homogène. La mesure est effectuée à l'aide d'un teslamètre et il est important de noter que celui-ci est en fait une sonde à effet Hall.

Le courant I est mesuré à l'aide d'une pince ampèremétrique (les courants mis en jeu sont importants, on ne peut donc pas utiliser un multimètre).

La tension de Hall U_H est mesurée à l'aide d'un microvoltmètre (ici un *FLUKE 8846A*, précis à $0,1 \mu\text{V}$).

Enfin, l'épaisseur de la lame d'argent est donnée sur le support et vaut $e = 5.10^{-5} \text{ m}$.

On trouve finalement :

$$\boxed{n = 8,75.10^{28} \text{ m}^{-3}} \quad (44)$$

4 Conclusion

Nous avons vu dans cette leçon que les métaux sont des bons conducteurs électriques et thermiques, que cela est dû à un nombre conséquent d'électrons mobiles, et qu'ils ont un module de compression élevé. Nous avons évoqué plusieurs utilisations des métaux, mais nous avons parlé principalement des métaux « courants », c'est-à-dire ceux auxquels nous pensons lorsque l'on parle de « métal » : le fer, l'or, le cuivre... et nous avons vu cependant, dans la classification périodique des éléments, qu'il en existe bien d'autres ! Les propriétés physiques peuvent varier de plusieurs ordres de grandeurs d'un métal à l'autre. Néanmoins, une différence importante se fera au niveau des propriétés chimiques : les différents métaux n'ayant pas la même place dans le tableau de Mendeleiev, ils auront nécessairement une réactivité chimique différente.