

MP17: Métaux

Audrey Chatain, **Arthur Bouchut**

8 décembre 2015

Rapports de jury

- 2015, 2014, 2013 Ce montage doit mettre en évidence différentes caractéristiques propres aux métaux. L'étude de caractéristiques mécaniques, par exemple, nécessite une mise en perspective par rapport aux propriétés équivalentes d'autres matériaux. Notons que pour les mesures de résistance, le principe et l'intérêt d'un montage quatre fils doivent être connus.
- 2012 Ce montage doit mettre en évidence différentes caractéristiques propres aux métaux (conductivités thermiques et électriques, élasticité, ...) et leurs liens éventuels. 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.

Liste d'expériences possibles

1. recalescence du fer : mise en évidence qualitative de l'allotropie (4.C.45)
2. mesure de module d'Young par mesure de flèche
3. mesure de module d'Young via la propagation d'ultrasons dans une plaque (ENSC 410)
4. conductivité thermique : mesure directe sur barre de cuivre calorifugée (ENSC 449)
5. conductivité électrique : mesure directe (4 fils) sur les barres de cuivre/d'aluminium (ENSC 373)
6. conductivité électrique : mesure indirecte par chute d'un aimant dans un tube
7. plasmons de surface : calcul du nombre d'électrons de conduction par atome (O.62)

Introduction

Les métaux sont pour la plupart des solides cristallins à température ambiante. Leurs caractéristiques remarquables, comme une grande rigidité, une grande conductivité thermique et électrique ou encore une grande réflectivité, proviennent des propriétés de la matrice ionique et/ou de celles du gaz d'électrons de conduction.

1 Rigidité des métaux

Idée : mesurer la flèche d'un réglelet et en déduire son module d'Young par la théorie des poutres.

Matériel

- Aide-mémoire *Résistance des matériaux*, Goulet-Boutin-Lerouge, Dunod (621.9 GOU)
- réglelets (alu, duralumin)
- support horizontal
- un niveau pour faire l'horizontale sur l'écran
- une masse pour tenir le réglelet
- écran + crayon à papier
- pied à coulisse

Protocole

- poser le réglet sur le support et tracer l'horizontale sur l'écran au crayon à papier à l'aide du niveau (ou d'une règle en duralumin très rigide supposée horizontale mais moins précis)
- mesurer la flèche f au crayon sur l'écran pour différentes longueurs du réglet L
- tracer la droite f en fonction de L^4 : la théorie des poutres permet d'écrire (dans les notations de l'aide-mémoire p. 71 *Systèmes isostatiques/Consoles*) $f = pL^4/8EI \equiv PL^3/8EI$ avec $P = \rho g \times Lbh$ le poids et $I = bh^3/12$ le moment d'inertie d'un parallépipède rectangle (p. 27 *Caractéristiques des sections usuelles*) : la pente $3\rho g/2Eh^2$ donne accès au module d'Young E

Résultats En préparation : $E_{Al} = 64.5 \pm 1.1$ GPa et $E_{dural} = 84.6 \pm 3.6$ GPa. En théorie : $E_{Al} = 69$ GPa et $E_{dural} = 74$ GPa.

Remarques

- faire les mesures 2 fois pour chaque réglet (en le retournant) : les écarts sur la flèche mesurée peuvent être importants ; faire la moyenne des 2 valeurs de flèche
- pas sous-estimer le temps nécessaire pour rechercher les formules dans l'aide-mémoire...
- écart à la valeur attendue : la règle est tordue et probablement pas 100% pure
- source d'incertitude principale : épaisseur du réglet mesurée au pied à coulisse

2 Conductivité thermique des métaux (ENSC 449)

Idée : loi de Fourier.

Matériel

- notice ENSC 449
- barre de cuivre calorifugée
- boîtier bleu Pico (sur lequel on branche les thermocouples)
- alimentation 220V de la barre calorifugée
- logiciel Pico Technology (se référer à l'aide)
- pied à coulisse pour mesurer la section de la barre

Protocole

- allumer l'alim 2 à 3 heures avant la présentation (régime "forcé")
- le logiciel donne directement la température en différents points espacés de 10 cm : tracer la droite $T(x)$ dont la pente vaut j/λ avec $j = |\lambda \nabla T| = P/S$ ($P = 30$ W cartouche chauffante ; S mesurée au pied à coulisse)

Résultats En préparation : $\lambda_{Cu} = 641 \pm 25$ W/m/K. En théorie : $\lambda_{Cu} = 401$ W/m/K.

Remarques

- pertes latérales : $j^{\text{réel}} = j^{\text{cartouche}} - j^{\text{pertes}} = P/S - j^{\text{pertes}} < P/S$ ce qui conduit à surestimer λ
- fonctionnement d'un thermocouple : effet Seebeck
- loi de Wiedmann-Franz : $\lambda/\sigma T = \text{cste}$
- exportation des températures vers Igor : passer en visualisation tableur sur Pico, sélectionner une seule ligne, exporter dans le presse papiers (2e icône), supprimer le texte, remplacer les virgules par des points, mettre les valeurs en colonne, les copier, coller dans Igor

3 Conductivité électrique des métaux

3.1 Mesure directe (ENS 373)

Idée : loi d'Ohm.

Matériel

- notice ENS 373
- alim 36V/10A (pas besoin de l'alim géante 50V/20A comme le disent certains rapports)
- multimètre Agilent 34410A utilisé en voltmètre (intérêt : précision < mV)
- tubes de cuivre et d'aluminium (percés, rangés dans une gaine en mousse noire)
- fiches banane
- pied à coulisse pour mesurer la section des tubes

Protocole

- envoyer 10A dans le tube avec 2 fiches bananes (I contrôlée sur l'alim, limite admissible : 16A)
- relever la ddp V entre différents points du tube en mettant les fiches bananes dans les trous
- tracer la droite $R = V/I$ en fonction de la longueur L : à partir de $R = L/\sigma S$ calculer la conductivité σ pour le métal utilisé

Résultats En préparation : $\sigma_{\text{Cu}} = (54.7 \pm 0.2) 10^6$ S/m et $\sigma_{\text{Al}} = (35.4 \pm 0.5) 10^6$ S/m. En théorie : $\sigma_{\text{Cu}} = 59.6 10^6$ S/m et $\sigma_{\text{Al}} = 37.7 10^6$ S/m.

Remarques

- connaître l'intérêt de la mesure 4 fils : s'affranchir des résistances de mesure (celle du tube est très faible) : voir l'article sur Wikipedia "Mesure 4 pointes"
- valeur du courant envoyé : choisie pour avoir une ddp suffisante au vu de la précision du multimètre
- pour expliquer l'écart à la théorie : impureté du métal ; écrouissage du matériau ; surestimation de la section S (il y a des trous) qui conduit à une sous-estimation de $\sigma = 1/(\text{pente} \times S)$

3.2 Mesure indirecte

Idee : l'aimant chutant dans un tube métallique est freiné par courants de Foucault. Il atteint une vitesse limite inversement proportionnelle à la conductivité du tube. Le rapport des vitesses limites dans 2 tubes différents donne le rapport des conductivités.

Matériel

- tubes creux en cuivre et aluminium + aimant cylindrique + capteurs "bobines maison"
- oscilloscope
- BUPs 822 et 823 pour la théorie (largement suffisants à mon avis)
- (biblio additionnelle : EJP 25 (2004), 593 et AJP 74 (2006), 815)

Protocole

- positionner 2 capteurs autour du tube, dans la partie inférieure (pour que l'aimant ait atteint sa vitesse limite, ce qui a lieu assez tôt)
- faire chuter l'aimant dans le tube et relever le décalage temporel à l'oscillo
- en déduire $v = \Delta z / \Delta t$
- faire la même chose avec l'autre tube

Résultats En préparation : $v_{\text{Cu}}^{\text{max}} = 0.1872 \pm 0.0005$ m/s et $v_{\text{Al}}^{\text{max}} = 0.2387 \pm 0.0005$ m/s, ce qui donne $\sigma_{\text{Cu}}/\sigma_{\text{Al}} = 1.274 \pm 0.004$. En théorie : $\sigma_{\text{Cu}}/\sigma_{\text{Al}} = 1.581$.

Remarques

- on peut faire une mesure statistique mais ne garder que la vitesse la plus élevée (les autres valeurs viennent du fait que l'aimant frappe le bord du tube, tourne sur lui-même, etc)
- sources d'incertitude supplémentaires : tube non parfaitement vertical, non parfaitement rectiligne
- donne une valeur moins précise que la mesure directe

4 Plasmons de surface

Idée : Un faisceau laser envoyé sur un métal est totalement réfléchi¹. Mais pour une certaine incidence, le laser peut exciter un mode propre d'oscillations du gaz d'électrons libres de conduction dans le métal, appelé plasmon de surface. Dans ce cas le faisceau réfléchi est atténué. Cet angle d'incidence permet dans le cadre de ce montage de remonter aux caractéristiques du métal. Dans la vraie vie, on se sert de ce phénomène pour faire des capteurs biologiques.

Matériel

- notice O.62
- article EJP 32 (2011) 585 (Laboratory experiments for exploring the surface plasmon resonance)
- {banc + boîte en bois + laser} O.62
- éventuellement une lame $\lambda/2$ pour faire tourner facilement la polarisation du laser
- Feynman, Electromagnétisme 2, 32-6 Ondes dans les métaux

Protocole 1 : mesure point par point

- installer le laser sur le banc puis jouer sur le prisme pour le placer en incidence normale en faisant revenir le laser sur lui-même ; fixer cette position à 0°
- faire varier la position angulaire du prisme grosso modo entre -20 et 20° et mesurer pour chaque point l'intensité du faisceau réfléchi à l'aide d'une photodiode (à bouger)
- tracer la tension en sortie de la photodiode en fonction de $\theta_{\text{int}} = \text{Arcsin}(\sin(\theta_{\text{ext}} - \alpha)/n) + A$ (voir l'article) et repérer l'angle du minimum $\theta_{\text{int}}^{\text{min}}$

Protocole 2 : éclairage du prisme en faisceau élargi et projection sur un écran

- installer l'écran, mesurer la distance L écran-prisme et scotcher une feuille avec un trait vertical très noir sur l'écran (qui servira de référence pour le calcul de l'angle)
- éclairer le prisme en incidence normale sans élargir le faisceau ; faire coïncider le point à l'écran avec le trait noir ; mettre une règle dans le champ de vision
- élargir le faisceau et prendre une photo de la figure à l'écran avec l'appareil photo du département
- traitement ImageJ : (i) analyze > set scale ; (ii) sélectionner un rectangle autour de la tache lumineuse, image > crop puis analyze > plot profile ; (iii) repérer l'écart en position x entre la référence et le creux dû au plasmon à l'aide de la souris
- j'ai calculé² $\theta_{\text{int}}^{\text{min}} = \frac{\pi}{2} - \text{Arcsin}\left(\frac{1}{n} \sin \text{Arctan} \frac{x}{L}\right) \sim \frac{\pi}{2} - \frac{1}{n} \frac{x}{L}$ en considérant l'écran "loin" (bien vérifié)

Résultats En suivant le protocole 2 : $\theta_{\text{int}}^{\text{min}} = 43.9 \pm 0.3^\circ$. On peut en déduire la permittivité diélectrique de l'or : $\varepsilon_{\text{Au}} = \frac{n^2 \sin^2 \theta_{\text{int}}^{\text{min}}}{1 - n^2 \sin^2 \theta_{\text{int}}^{\text{min}}} = -13.5$ où $n = 1.515$ (à 633 nm) est l'indice du verre (valeur tabulée : $\varepsilon_{\text{Au}} = -11.2$).

Pour remonter au nombre d'électrons de conduction par atome (Feynman, limite haute fréquence) :

- $\varepsilon_{\text{Au}} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$ avec $\omega_p^2 = \frac{N_e q_e^2}{m_e \varepsilon_0}$ donc $N_e = \frac{m_e \omega^2}{q_e^2} \varepsilon_0 (1 - \varepsilon_{\text{Au}}) = 4.00 \cdot 10^{28} \text{ e}^-/\text{m}^3$
- $N_{\text{Au}} = \frac{\text{nombre d'atomes d'or par maille}}{\text{volume d'une maille}} = \frac{4}{(2\sqrt{2}R)^3} = 5.92 \cdot 10^{28} \text{ Au}/\text{m}^3$ (cfc, $R = 1.44 \text{ Angströms}$).
- nombre d'électrons de conduction par atome = $\frac{N_e}{N_{\text{Au}}} = 0.67 \sim 1$.

À comparer avec la structure électronique de l'or Au : $[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^1$

Remarques

- pour pouvoir observer le phénomène il ne faut pas que la polarisation du laser soit verticale
- pour prendre une photo, laisser la lumière de la salle allumée

1. $n^2 = \varepsilon_r \sim 1 - \omega_p^2/\omega^2$ avec ω_p dans l'UV pour la plupart des métaux ; cf Feynman
2. le calcul n'est fait nulle part ; j'ai simplement (i) écrit la loi de Descartes pour la réfraction à l'interface de sortie verre/air et (ii) considéré les angles de sortie petits ($\sin i = i$) ; la notice donne l'angle du prisme = 45°

- la précision obtenue en suivant le protocole 1 est d'autant plus petite qu'on prend de points autour de l'extinction : l'incertitude de lecture sur le vernier et le jeu mécanique du plateau tournant (hysteresis) limitent cette précision grosso modo à 0.5°
- la précision obtenue en suivant le protocole 2 est limitée essentiellement par l'incertitude sur la distance entre la feuille d'or et l'écran

Questions et commentaires

Rigidité

- pourquoi $f(L^4)$ n'est pas bien linéaire pour les faibles valeurs de L ? la théorie des poutres suppose $L \gg \sqrt{S}$ — mais l'écart n'est pas évident à interpréter en termes de contraintes
- question sur le béton armé : béton + métal, l'un est résistant en traction et l'autre en compression : les 2 se complètent
- grand module d'Young = grande résistance mécanique? non : le verre est très rigide mais casse facilement : il faut regarder les contraintes limites au-delà desquelles le matériau se rompt
- autres grandeurs mécaniques d'un métal (hors module d'Young) et comment les mesurer? coefficient de Poisson et module de cisaillement ; voir les ultrasons dans le duralumin (et pour l'interprétation, Landau, Elasticité, chapitre 3)

Conductivité thermique

- lien conductivité thermique/électrique pour un métal? loi de Wiedmann-Franz : $\lambda/\sigma T = \text{cste}$ pour les métaux ; ne surtout pas essayer de la vérifier (avec le matériel de Cachan, on n'a pas λ et σ à la même température ; peut-être possible avec matériel de Lyon) ; contre-exemple : le diamant (bon conducteur thermique, mauvais conducteur électrique)
- montrer qu'on est en régime permanent ; ne surtout pas faire l'expérience en régime sinusoïdal

Conductivité électrique

- expliquer la mesure 4 fils (on mesure $R_{\text{échantillon}} || R_{\text{voltmètre+ fils+ contacts}} \simeq R_{\text{échantillon}} < m\Omega$)
- pour la courbe $R(L)$ (loi d'Ohm) on peut forcer le passage de l'ajustement par l'origine
- en quoi sont faits les câbles haute tension? pas en cuivre même si c'est un bon conducteur, mais en alu (en fait : alliage à base d'alu) qui est moins cher et plus léger
- mesure indirecte : ne garder que la vitesse la plus élevée au lieu de la moyenne : OK, ça se défend ; éventuellement, expliquer comment on vérifie que la vitesse limite existe (en pratique, atteinte très rapidement au début de la chute)

Plasmons

- comment marche une lame demi-onde achromatique? un peu comme un doublet achromatique, deux lames biréfringentes d'effets opposés selon les longueurs d'onde... bref, se renseigner si on en utilise une (je l'avais prise pour faire tourner la polarisation linéaire du laser et montrer que l'excitation du plasmon dépend de la polarisation de la vibration lumineuse incidente)
- expliquer $\varepsilon_{\text{Au}} < 0$? $\varepsilon_{\text{Au}}^2 = 1 - \omega_p^2/\omega^2$ avec ω_p dans l'UV pour la plupart des métaux, donc les ondes visibles ne peuvent pas se propager dans le métal et sont réfléchies (la permittivité diélectrique relative c'est le carré de l'indice optique)

Général

- comment on juge la qualité d'un ajustement? calculer le χ^2 réduit (à partir du χ^2 d'Igor) et comparer avec des tables de χ^2 prenant en compte les barres d'erreurs et le nombre de degrés de liberté... j'ai l'impression qu'aucun correcteur n'avait vraiment insisté sur ça avant, mais ça semble important
- comment on ferait pour vérifier la pureté d'un métal? mesure de masse volumique en utilisant une balance pour la masse et la poussée d'Archimède pour le volume

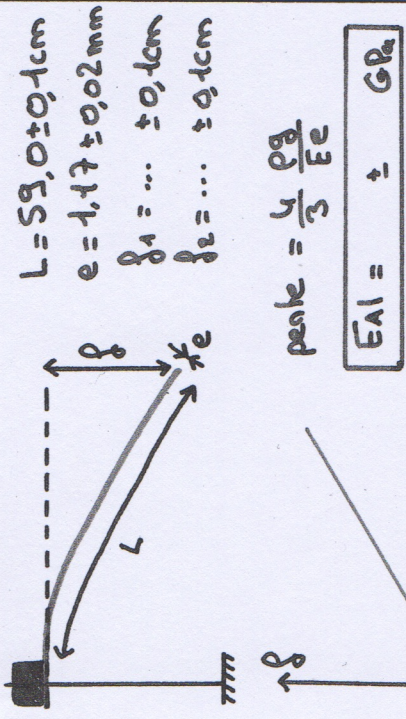
Globalement, critiques positives. Montage pas trop difficile : les expériences une fois montées, marchent bien.

MP 17 Métaux

Arthur B.
Audrey C.

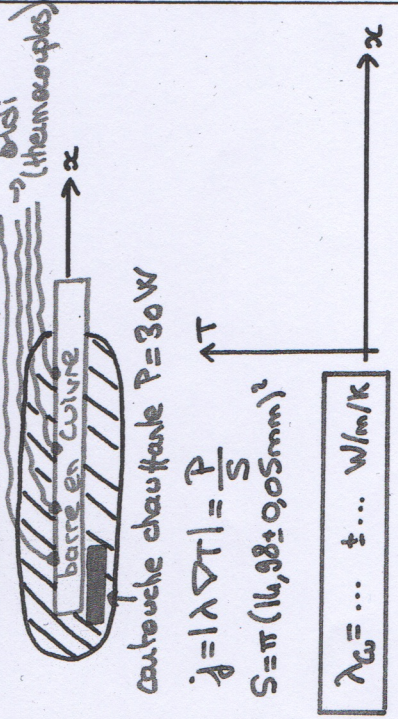
- gde rigidité
- gde conductivité
- gde réflectivité

1. Rigidité



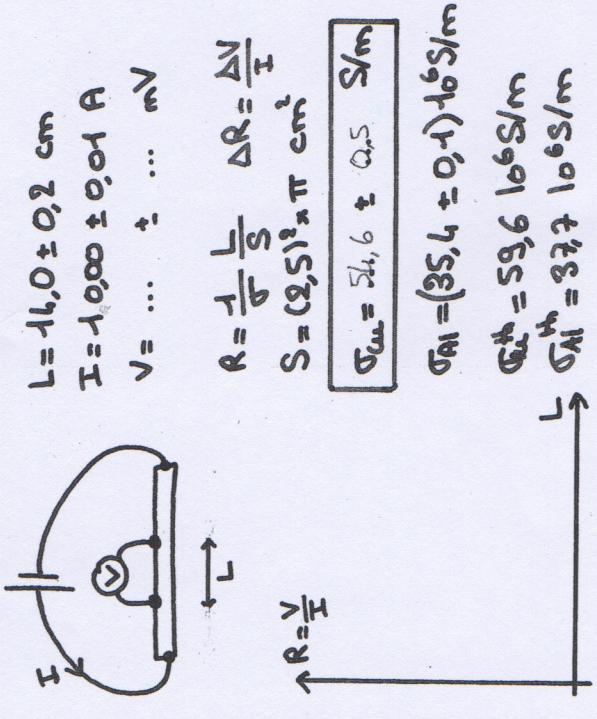
incertitudes: $\frac{\Delta E_{Al}}{E_{Al}} = \frac{\Delta e}{e}$ (le- précis)

2. Conductivité thermique

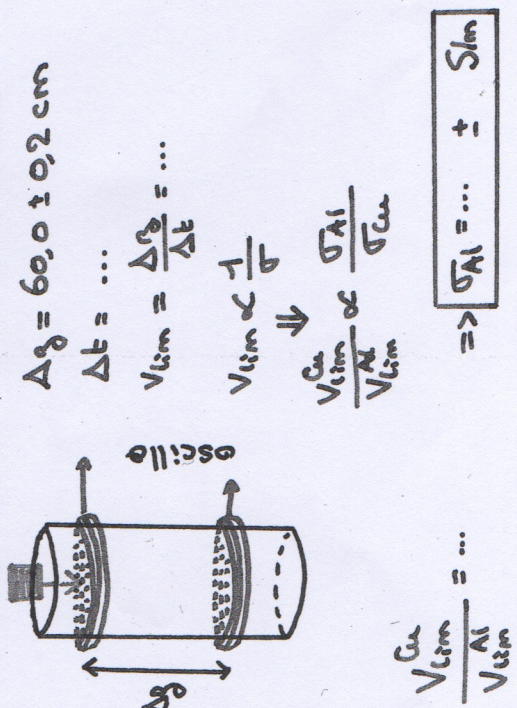


3. Conductivité électrique

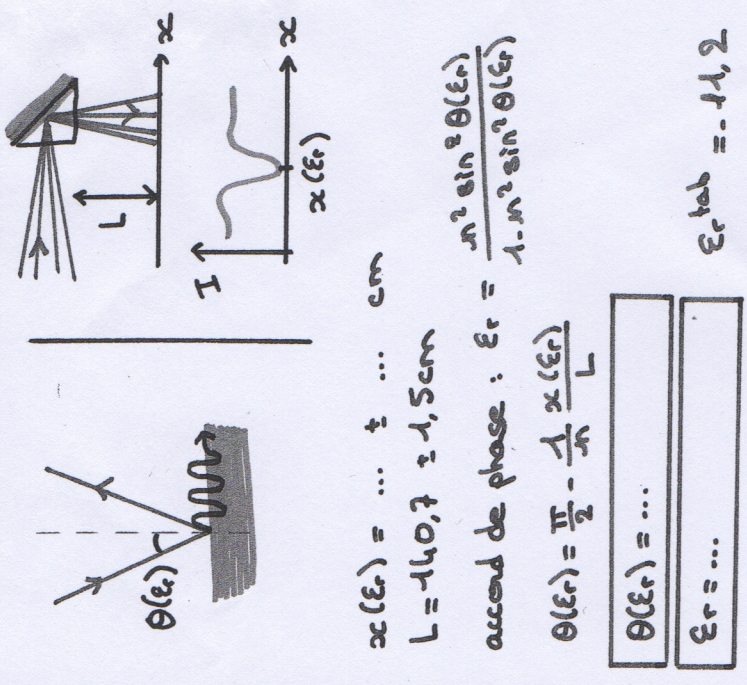
Mesure directe: loi d'Ohm



Mesure indirecte: chute d'un admet



4. Plasmons de surface



$\frac{n_e}{n_{Au}} = \dots \quad e^- \text{ de conduction / atome}$

$Au: [Xe] 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$