

Loi de Wiedemann-Franz

Dans les métaux, ce sont principalement les électrons qui transportent la chaleur. Les conductivités électrique et thermique sont donc reliées. C'est ce qu'exprime la loi de Wiedemann-Franz.

Le but de cette expérience est de mesurer aussi précisément que possible les propriétés électriques et thermiques de différents métaux. Dans la partie A, on mesurera la conductivité électrique du cuivre, du laiton et de l'aluminium. Dans la partie B, c'est la conductivité thermique du cuivre qu'il faut mesurer. En C, on mesurera la capacité thermique du cuivre et en D, les conductivités thermiques du laiton et de l'aluminium. Enfin, dans la partie E, il s'agit de vérifier la relation universelle existant entre ces deux propriétés physiques dans le cas des métaux étudiés.

Dans cette expérience, aucun calcul d'incertitude n'est attendu.

Attention : les parties B et D comportent un temps d'attente de **15 minutes**. Tenez-en compte dans la planification de votre temps.

Consignes de sécurité

Ne connecter aucun fil ni aucun instrument directement aux prises de courant de 220V/25A, exception faite des sources de tension fournies.

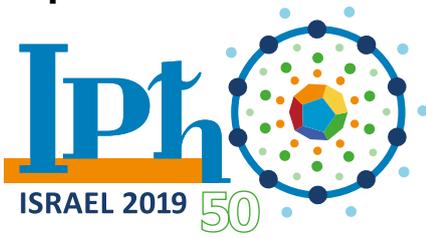
Liste du matériel



Figure 1

1. **Barreau en cuivre** creux et cylindrique, 200,0 mm de long, trou central de 6,0 mm de diamètre intérieur et **2,0 mm** de diamètre extérieur.
2. **Barreau en laiton** creux et cylindrique, 200,0 mm de long, trou central de 6,0 mm de diamètre intérieur et **19,0 mm** de diamètre extérieur.
3. **Barreau en aluminium** creux et cylindrique, 200,0 mm de long, trou central de 6,0 mm de diamètre intérieur et **20,0 mm** de diamètre extérieur.

Experiment



Q2-2

Français (France)

- Un petit aimant permanent. Sa masse est de 1,2 gramme.
- Réservoir d'eau (un récipient utilisé pour confectionner une sorte de pâtisserie israélienne appelée « Jachnun »). Le couvercle de ce récipient comporte un échangeur de chaleur et un pas de vis. 4 litres d'eau douce (2 bouteilles de 2 litres) permettent de remplir ce réservoir.
- Barreau 1 (Rod # 1) - un barreau de cuivre avec un diamètre de 20,0 mm qui comporte des capteurs de température reliés à une prise série et une résistance chauffante reliée aux fils rouges (figure 2.a). Ces fils seront connectés à l'alimentation (n°15) par l'intermédiaire d'un circuit électrique. Le barreau est entouré par une couche isolante de couleur noire.
- Barreau 2 (Rod # 2) - un barreau composite avec un diamètre de 20,0 mm qui comporte des capteurs de température reliés à une prise série et une résistance chauffante reliée aux fils rouges (figure 2.b). Ces fils seront connectés à l'alimentation (n°15) par l'intermédiaire d'un circuit électrique. Le barreau est entouré par une couche isolante de couleur noire.
- Un capuchon isolant thermique
- Une alimentation 12V DC pour l'afficheur digital
- Afficheur digital. Ce boîtier affiche les valeurs données par les 8 thermomètres. C'est aussi un chronomètre. Voyez les instructions ci-dessous.
- Câble de connexion qui relie les capteurs de température du barreau à l'afficheur digital.
- Voltmètre - Le sélecteur de fonction doit être placé sur 20 V DC (Figure 3).
- Ampèremètre - Le sélecteur de fonction doit être placé sur 10 A DC (Figure 3).
- Des câbles de connexion électrique.
- Une alimentation de 9 V DC pour le chauffage (fils banane).

Avvertissements : 1. seules les alimentations fournies (munies d'une prise standard AC) peuvent être connectées à la prise de courant. Connecter d'autres câbles ou matériels à la prise est strictement interdit et peut causer des blessures sérieuses.

2. Ne pas immerger les barreaux dans l'eau.

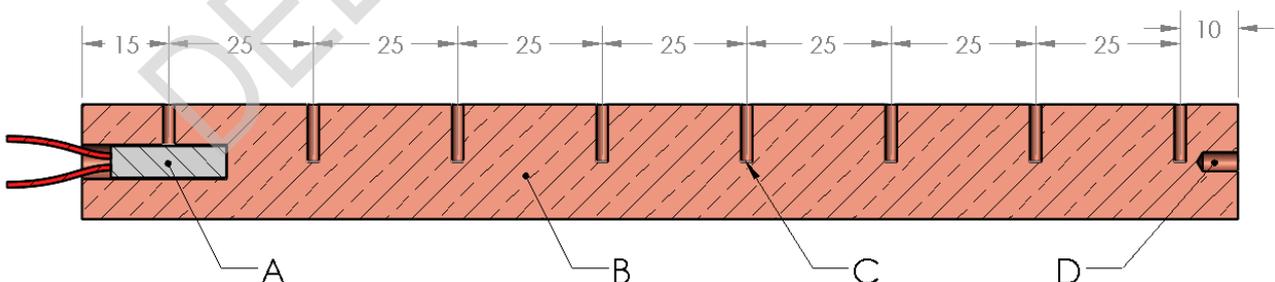


Figure 2.a - Schéma du barreau 1.

Les distances sont données en mm avec une précision de 0,1mm.

(A) Résistance chauffante connectée aux fils rouges. (B) Barreau de cuivre. (C) Huit capteurs de température, chacun représenté par une encoche telle que celle indiquée par la flèche.

(D) Pas de vis pour fixer le couvercle du réservoir d'eau

Experiment



Q2-3

Français (France)

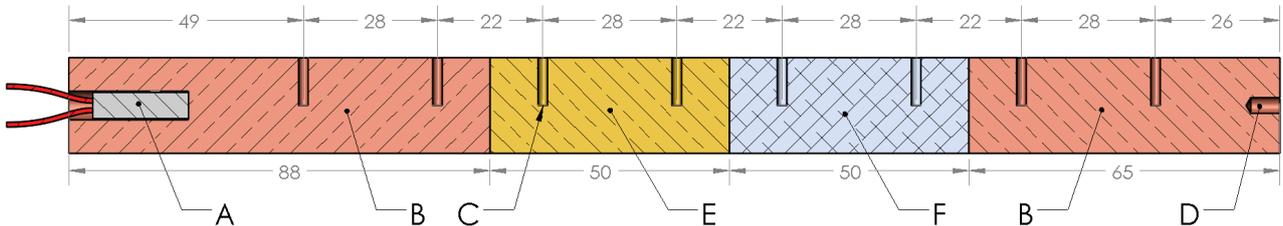


Figure 2.b - Schéma du barreau 2.

Les distances sont données en mm avec une précision de 0,1mm.

(A) Résistance chauffante connectée aux fils rouges. (B) Barreau de cuivre. (C) Huit capteurs de température, chacun représenté par une encoche telle que celle indiquée par la flèche.

(D) Pas de vis pour fixer le couvercle du réservoir d'eau. (E) Barreau en laiton. (F) Barreau en aluminium.



Figure 3 – Ampèremètre et Voltmètre

(1) – Position du sélecteur sur 10A. (2) Bornes à utiliser en Ampèremètre.

(3) – Position du sélecteur sur 20V. (4) Bornes à utiliser en Voltmètre.

Utilisation de l'afficheur digital

Connecter l'afficheur digital à son alimentation 12 V DC.

L'afficheur peut afficher la température ou bien servir de chronomètre. Lorsque les capteurs sont connectés, l'afficheur se place automatiquement en fonction "thermomètre". Lorsque le câble des capteurs est déconnecté, le mode chronomètre est activé et l'écran affichera les mots « Timer mode ».

En mode thermomètre :

- Presser le bouton rouge en le maintenant 3 secondes pour remettre le temps à zéro
- En pressant brièvement le bouton rouge, l'affichage se bloque sur la dernière valeur (l'afficheur continue à compter le temps depuis le dernier reset, sans l'afficher).
- En pressant à nouveau le bouton rouge, on reprend l'affichage en temps réel de la température et du temps.

En mode chronomètre :

- Presser le bouton rouge pour démarrer la mesure
- Presser à nouveau le bouton pour arrêter le chronomètre
- En pressant à nouveau le bouton, le chronomètre revient à zéro.

Experiment



Q2-4

Français (France)

L'afficheur digital doit être calibré pour chaque barreau avant la première utilisation. Les capteurs de température utilisés dans l'expérience ne sont pas exactement identiques. Par conséquent, pendant que le barreau est en équilibre thermique, on désire le calibrer pour obtenir la même lecture pour tous les capteurs. Pour ce faire, connecter d'abord une extrémité du câble de connexion au barreau. Ensuite, appuyer et maintenir enfoncé le bouton rouge tout en connectant l'autre extrémité du câble à l'afficheur. Le fait de débrancher le boîtier des câbles d'alimentation ou des capteurs n'effacera pas cette calibration.

AVERTISSEMENT : Effectuer la calibration **avant** de raccorder le barreau au réservoir d'eau ou de raccorder le chauffage à l'alimentation électrique. Ceci garantit que la température du barreau est uniforme pendant la calibration.

En cas de problème avec l'afficheur digital, débrancher l'alimentation et la rebrancher ensuite. L'afficheur reviendra à sa dernière calibration.

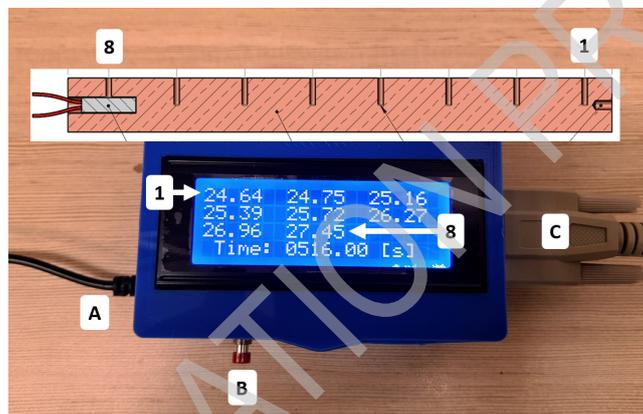


Figure 4 - L'afficheur digital

(A) Câble d'alimentation 12V DC. (B) Bouton rouge multifonction.
(C) Câble des thermomètres. (1 - 8) Lectures des thermomètres, ligne par ligne, en degrés Celsius, ordonnées horizontalement.

Partie A : Conductivité électrique du cuivre, de l'aluminium et du laiton (1,5 point)

Théorie

Lorsqu'un aimant permanent tombe à l'intérieur d'un tube cylindrique creux, il subit une force dissipative due aux courants de Foucault induits. Par conséquent, l'aimant atteint une vitesse limite. Pour cette géométrie, la vitesse limite peut être exprimée comme suit :

$$v_{limite} = \frac{8\pi m g a^2}{\mu_0^2 (\pi r_m^2 M)^2 \sigma w f\left(\frac{d}{a}\right)}. \quad (1)$$

Dans cette expression, m est la masse de l'aimant, σ la conductivité électrique du matériau dans lequel est fait le tube, a est le rayon intérieur du tube, r_m et d sont respectivement le rayon et la hauteur de l'aimant cylindrique, M est le moment magnétique permanent de l'aimant, w est l'épaisseur du tube (différence entre le rayon extérieur et le rayon intérieur) et $f\left(\frac{d}{a}\right)$ est un facteur d'échelle. Dans notre cas, $a \approx r_m$,

Experiment



Q2-5

Français (France)

$d = 2r_m \approx 2a$ et $f(2) \approx 1,75$. Par conséquent, la durée de chute de l'aimant à travers le tube prend la forme approchée suivante :

$$t = 0,22 \frac{\pi r_m^2 (\mu_0 M)^2 w L_0}{mg} \sigma. \quad (2)$$

où $L_0 = 0,2$ m est la longueur du tube. On suppose que l'aimant atteint sa vitesse limite immédiatement après avoir été lâché.

Les caractéristiques du tube et de l'aimant nécessaires au calcul sont :

$$\mu_0 M = 0,65 \text{ T};$$

$$w_{\text{Aluminum}} = w_{\text{Cuivre}} = 7,0 \times 10^{-3} \text{ m}; w_{\text{Laiton}} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ m};$$

$$m = 1,2 \times 10^{-3} \text{ kg}; g = 9,8 \text{ m/s}^2; r_m = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

DELEGATION PRINT

Experiment



Q2-6

Français (France)

Expérience

A.1 En utilisant l'afficheur digital en mode chronomètre, mesurer les durées de chute de l'aimant à travers les tubes creux en aluminium, en cuivre et en laiton. Reporter vos mesures dans le tableau A1. 1.0pt

A.2 En utilisant l'expression de t ci-dessus, déterminer les valeurs de $\sigma_{\text{Aluminium}}$, σ_{Cuivre} et σ_{Laiton} pour les trois matériaux. 0.5pt

Partie B : Conductivité thermique du cuivre (3,0 points)

Le but de cette partie est de mesurer la conductivité thermique du cuivre dans un régime quasistationnaire.

Théorie

La conductivité thermique κ est définie par l'équation $P(x) = -\kappa A \cdot \frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$. Cette équation décrit une relation linéaire entre la puissance traversant une section transversale du matériau et le gradient de température : $P(x)$ est la puissance traversant une section transversale à l'abscisse x , A est l'aire de la section transversale du barreau et $\Delta T(x) / \Delta x$ est le gradient de température en x .

Expérience

Brancher l'afficheur digital à la prise externe et calibrer le barreau 1. Verser 4 litres (2 bouteilles) d'eau dans le récipient pour immerger complètement l'échangeur thermique et fermer le couvercle.

B.1 Noter la température initiale du barreau 1 lorsqu'il est placé sur la table. 0.1pt

Débrancher le câble de lecture du barreau. Retirer le capuchon isolant et visser le barreau 1 sur le couvercle du réservoir. Rebrancher le câble au boîtier de lecture, comme illustré à la figure 5. Veiller à ne pas serrer trop fort.



Figure 5

Experiment



Q2-7

Français (France)

- B.2** Faire le schéma du montage électrique permettant d'alimenter la résistance chauffante. Représenter également ce qui permettra de mesurer la puissance. Votre schéma doit contenir les éléments suivants : 0.5pt
- l'alimentation continue de 9 V ;
 - la résistance chauffante (déjà branchée sur le barreau) ;
 - le voltmètre ;
 - l'ampèremètre ;
 - et les fils.
- En l'absence d'interrupteur, on pourra manipuler les fils pour ouvrir ou fermer le circuit.

La conductivité thermique sera mesurée en appliquant un flux thermique constant d'un côté du barreau tout en maintenant l'autre côté du barreau à la température du réservoir d'eau, supposée constante.

L'objectif est de se rapprocher d'un état stationnaire pour tous les thermomètres. Réaliser le circuit de la question B.2 qui alimentera le moment venu la résistance chauffante.

- B.3** Faire les mesures nécessaires pour calculer la valeur de la puissance P appliquée à la résistance chauffante et reporter la valeur de P trouvée sur la feuille de réponse. 0.1pt

Chauffer pendant 15 minutes (on pourra utiliser ce temps pour réfléchir à la suite).

- B.4** Noter dans le tableau fourni les températures des huit thermomètres après une durée de chauffage de 15 min, de 17,5 min et de 20 min. 0.5pt

- B.5** Sur une seule feuille de papier millimétré, tracer les trois courbes de la température en fonction de la position pour chacun des instants ci-dessus. Ces courbes seront également utilisées dans la partie D. 1.0pt

- B.6** Utiliser le graphique précédent pour extraire la conductivité thermique du cuivre, κ_0 , en utilisant vos données à l'instant 17,5 min. Ne pas tenir compte des pertes de chaleur dans cette partie. Estimer l'accroissement moyen de température du barreau, $\Delta T / \Delta t$, à l'instant 17,5 min. 0.5pt

- B.7** Peut-on s'attendre à une valeur de κ_0 égale, plus grande ou plus faible que la valeur réelle de κ ? 0.3pt

Partie C : Estimation des pertes thermiques et de la capacité thermique du cuivre (4,0 points)

Théorie

La capacité thermique C est définie par l'une des équations suivantes, au choix :

$$\Delta Q = C \Delta T, \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right). \quad (3)$$

Experiment



Q2-8

Français (France)

où, $\Delta Q/\Delta t$ est la puissance thermique reçue par matériau et $\Delta T/\Delta t$ est le taux de variation de la température. La capacité thermique massique c_p est la capacité thermique par unité de masse. Prendre comme masse du barreau de cuivre la valeur de 0,58 kg.

Expérience

Éteindre l'alimentation de la résistance chauffante. Débrancher le circuit de chauffage, dévisser et placer le barreau 1 sur la table. Replacer le capuchon isolant sur le barreau, comme vous l'avez trouvé au début de l'expérience. Rebrancher le circuit de chauffage et reconnecter le barreau à l'afficheur digital.

AVERTISSEMENT : Dans cette partie, ne pas laisser la résistance chauffante allumée pendant de longues périodes sans surveiller la température.

En utilisant un cycle de refroidissement, de chauffage puis à nouveau de refroidissement, on peut extraire à la fois les pertes thermiques et la capacité thermique du matériau. L'étape de chauffage devra modifier la température moyenne d'environ 2,5°C. La précision nécessaire à cette étape peut être obtenue en effectuant une séquence de refroidissement – chauffage – refroidissement de 10 à 15 minutes.

On s'arrangera ici pour travailler à une température moyenne proche de celle du régime stationnaire, comme dans la partie B.

Afin de prendre en compte toute l'énergie thermique stockée dans le barreau, on désire suivre l'évolution de sa température moyenne. La mesure de la température au centre du barreau est une bonne approximation de cette température moyenne.

C.1	Effectuer une séquence de refroidissement – chauffage – refroidissement et noter dans le tableau C1 les mesures nécessaires à l'obtention de la température moyenne du barreau.	1.0pt
C.2	Tracer sur une feuille de papier millimétré la température moyenne en fonction du temps.	1.0pt
C.3	À l'aide du graphique obtenu, calculer la capacité thermique massique c_p et la puissance thermique P_{perdue} perdue par le barreau, au voisinage de la température moyenne utilisée dans la partie B. Décrire la méthode utilisée à l'aide de schémas et d'équations.	1.0pt

Pour améliorer la précision de la conductivité thermique obtenue dans la partie B, il est important de prendre en compte les deux mécanismes principaux suivants :

- Il y a une perte thermique due au transfert thermique radial à travers l'isolant.
- Le système n'a pas atteint un état stationnaire au moment de la mesure.

En se limitant au premier ordre, on pourra supposer qu'en raison de ces mécanismes le taux de variation du flux de puissance à travers le barreau, $\Delta P(x)/\Delta x$, est constant.

C.4	Écrire une équation qui corrige au premier ordre la conductivité thermique trouvée dans la partie B en tenant compte des deux mécanismes. Utiliser les grandeurs $\kappa_0, P, c_p, m, P_{perdue}, \frac{\Delta T}{\Delta t}$ des parties B et C pour exprimer la valeur corrigée de la conductivité thermique, κ_{cuivre} et calculer sa valeur.	1.0pt
------------	--	-------

Experiment



Q2-9

Français (France)

Partie D : Conductivité thermique du laiton et de l'aluminium (1,0 point)

Connecter le barreau 2 à l'afficheur numérique et calibrer les thermomètres de cette barreau comme indiqué au début de la partie B (en maintenant le bouton rouge enfoncé, connecter le barreau 2 à l'afficheur en utilisant le câble de connexion).

D.1 Noter la température initiale de la barreau posée sur la table. 0.1pt

Débrancher le câble et visser la barreau 2 sur le couvercle du réservoir comme indiqué sur la figure 4. Rebrancher le câble sur l'afficheur digital.

Répéter la procédure utilisée dans la partie B pour se rapprocher de l'état stationnaire en chauffant.

Chauffer pendant au moins **15 minutes** avant de faire les mesures.

Étant donné la précision requise dans cette partie, on supposera que le barreau a alors atteint son régime stationnaire. De plus, on supposera que la perte de chaleur par unité de longueur est uniforme le long du barreau.

D.2 Noter les températures mesurées par les huit thermomètres du barreau 2 et noter $\Delta T/\Delta x$ pour chacune de ses sections. 0.2pt

Pour une approximation au premier ordre, on utilisera la même hypothèse que dans la question C.4, à savoir que $\Delta P(x)/\Delta x$ est constant.

D.3 Donner l'expression de κ_{laiton} et $\kappa_{\text{aluminium}}$ en fonction de vos résultats expérimentaux. Calculez leurs valeurs numériques. 0.7pt

Partie E : La loi Wiedemann-Franz (0,5 point)

La loi Wiedemann-Franz stipule que, dans les métaux où le transfert thermique est dominé par les électrons de conduction, le rapport des conductivités thermique et électrique dépend linéairement de la température absolue. De plus, la loi stipule que la pente $L = \frac{\kappa}{\sigma T}$ (connue sous le nom de "nombre de Lorenz") liée à cette relation est la même pour la plupart des métaux et ne dépend que de constantes fondamentales. En réalité, pour les métaux à température ambiante, cette loi n'est valable qu'avec une précision d'environ 10%.

E.1 Noter les résultats pour les conductivités thermique et électrique (κ, σ) dans le tableau E1. Calculer la valeur de L pour chaque matériau et noter cette valeur dans le même tableau E1, en supposant que la conductivité thermique ne dépende pas de la température au premier ordre. 0.5pt