

MP17 : Métaux

Date : 08/04/2021

Binôme : B01 : Fabien Baudribos et Armel Jouan

1 Objectifs pédagogiques

- Mettre en évidence les différentes caractéristiques des métaux
- Les comparer et en déduire des propriétés pour les différents métaux étudiés

2 Objectifs et messages forts du montage

Rapports du jury :

2017 : 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 : il subsiste une confusion chez de nombreux candidats entre ce montage à quatre fils et la distinction entre courte et longue dérivation. Un montage à quatre points n'a pas pour but de seulement s'affranchir de la résistance des fils, contrairement à ce que pensent de nombreux candidats.

2013 à 2016 : 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. 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.

3 Introduction générale

Un métal est un matériau donc la cohésion est assurée par des liaisons métalliques : les atomes mettent en commun un ou plusieurs électrons pour former ces liaisons.

Les métaux composent la majorité des éléments du tableau périodique.

1A	2A	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B	11B	12B	13A	14A	15A	16A	17A	18A	
1	H	non-métaux															He	
2	Li	Be	métaux									B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
* lanthanides			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
** actinides			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Aux conditions normales de température et de pression, les métaux sont généralement sous forme solide.

Ils possèdent des propriétés remarquables tels que : une grande rigidité, une conduction thermique importante et une conduction électrique aussi importante.

Je vais maintenant lancer la manip sur la conductivité thermique du cuivre car c'est une expérience de thermodynamique qui demande une acquisition d'au moins un quart d'heure.

4 Proposition de plan

I. Module d'Young des métaux

Idée : mesurer la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore dans le métal pour remonter à son module d'Young

Matériels :

- Emetteur d'impulsion ultrasonore
- Malette avec les sondes ultrasonores (émetteur-récepteur)
- Boite transparente avec le tube test en plexi et avec les deux tubes en alu et acier
- Gel pour adaptation d'impédance
- Oscilloscope 4 voies
- 4 ou 5 câbles coaxiales
- Balance

Théorie :

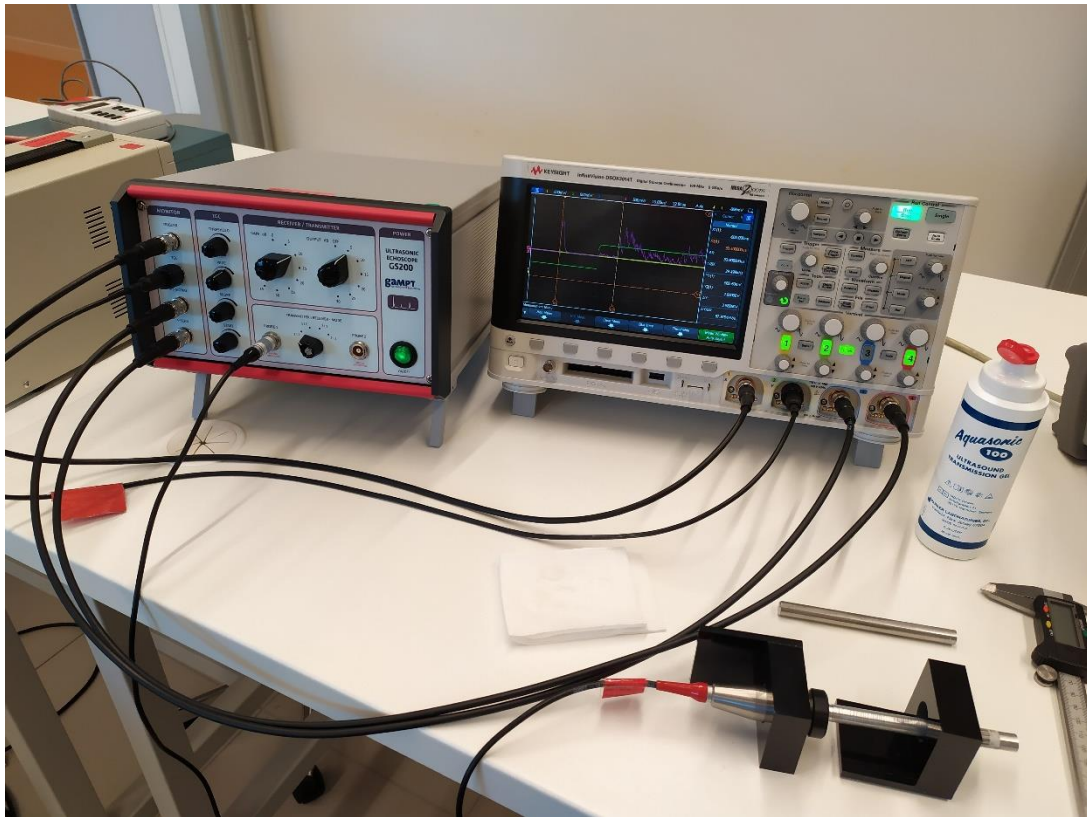
Grâce à un rapide calcul de force et un PFD (cf biblio) on peut montrer que l'élongation d'un métal

suit l'équation de d'Alembert suivante : $\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0$ donc $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ où E est le module d'Young du métal et ρ est la masse volumique du métal.

Il suffit donc de mesurer la vitesse de propagation d'une onde dans le métal pour remonter à son module d'Young.

Protocole :

- On mesure les dimensions du tube de métal étudié avec un pied à coulisse et on le pèse pour remonter à sa masse volumique
- On branche le générateur d'impulsions ultrasonores sur l'oscilloscope : les quatre voies du générateur sur l'oscilloscope (la première sert à trigger, la deuxième représente la fenêtre d'observation du signal reçu que l'on peut déplacer grâce au générateur d'impulsion, la troisième représente le signal reçu et la quatrième représente l'enveloppe de celui-ci)
- Ensuite, on place l'émetteur ultrasonore sur son support et on réalise une adaptation d'impédance entre l'émetteur et le métal avec du gel.
- On se place dans le mode 1-1 où l'émetteur va aussi servir de récepteur et capter le signal réfléchi au bout du tube de métal
- Enfin on peut mesurer sur l'oscilloscope la différence de temps Δt entre l'impulsion ultrasonore et sa réception (pour avoir un signal plus propre, on peut moyenner le signal)



Résultats :

On a : $c = \frac{2L}{\Delta t}$ car l'onde parcourt un aller-retour dans le métal (avec L : longueur du tube)

Donc $E = \rho c^2 = \rho \left(\frac{2L}{\Delta t} \right)^2$

On peut faire la mesure pour différents types métaux : aluminium, acier ou encore d'autres matériaux comme le plexi.

On a obtenu les résultats suivants :

$$E_{Al,exp} = 111 \pm 2 \text{ GPa} \quad E_{Al,tab} = 62 \text{ GPa}$$

$$E_{acier,exp} = 224 \pm 3 \text{ GPa} \quad E_{acier,tab} = 200 - 220 \text{ GPa}$$

On peut conclure ici que les métaux sont effectivement assez rigides en comparant avec d'autres matériaux : bois $E=15$, polystyrène=3

Remarques :

- On peut réaliser une étude statistique en préparation de mesures de Δt et prendre un point de plus en live pour améliorer l'incertitude de la mesure
- Pertinent de faire la mesure pour deux ou trois matériaux différents pour comparer mais on peut faire qu'une seule mesure en live

II. Conductivité électrique

Matériels :

- Barres en aluminium et en cuivre avec les trous pour mesure en 4 fils
- Alimentation 36V/10A
- Voltmètre de précision Agilent 34410A car tensions sont faibles
- Fils bananes
- Ampèremètre
- Pied à coulisse

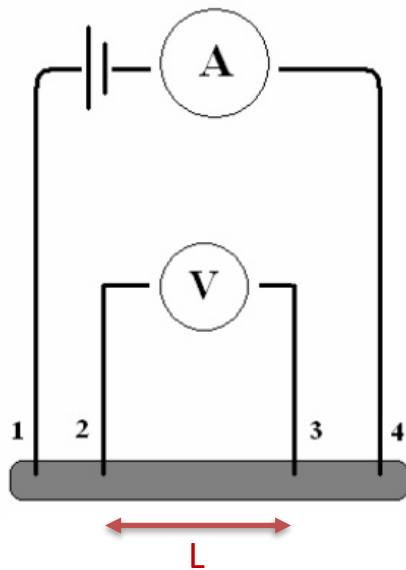
Théorie :

La loi d'Ohm nous donne pour un cylindre de longueur L et de section S : $U = RI$ où $R = \frac{L}{\sigma S}$ avec σ la conductivité thermique du matériau.

Il suffit donc de mesurer la tension dans un cylindre en métal pour différentes longueurs avec un courant que l'on impose.

Protocole :

On va réaliser un montage 4 fils dans cette manip car on veut une mesure précise de la résistance du tube en métal et donc réduire l'impact des résistances des fils et des contacts entre les fils et le métal sur nos mesures.



On envoie grâce à l'alimentation un courant d'environ 10A car la résistance est assez faible et on relève la tension et le courant grâce aux voltmètre et ampèremètre.

On trace ensuite U/I en fonction de L et on en déduit la conductivité électrique grâce à la pente de la droite. On peut faire ceci pour deux métaux différents : aluminium et cuivre.

On a obtenu les résultats suivants :

$$\begin{aligned}\sigma_{Al,exp} &= (36,0 \pm 0,3) \cdot 10^6 \text{ S/m} & \sigma_{Al,tab} &= 37,7 \cdot 10^6 \text{ S/m} \\ \sigma_{Cu,exp} &= (56,7 \pm 0,6) \cdot 10^6 \text{ S/m} & \sigma_{Cu,tab} &= 59,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}\end{aligned}$$

On peut conclure en rappelant que les métaux sont de bons conducteurs en général et que c'est bien le cas pour ces deux métaux et c'est pour cela qu'on les utilise pour le transport d'énergie électrique. On peut dire que de bons conducteurs électriques sont aussi de bons conducteurs thermiques.

Remarques :

- Attention à bien prendre les incertitudes sur Igor, ne pas hésiter à utiliser python pour une meilleure compréhension des incertitudes
- C'est normal de trouver une conductivité plus faible que les valeurs théoriques car ce ne sont pas des barreaux purs
- Aller chercher les valeurs tabulées dans des handbooks
- Se limiter à la mesure pour un seul métal en live mais on peut faire la mesure pour un autre métal en préparation

III. Conductivité thermique

Matériels :

- Banc de conductivité thermique du cuivre calorifugé
- Boîtier picolog normalement fourni déjà avec le banc
- GBF capable de fournir un signal de qqes mHz
- Logiciel Picolog
- Notice du banc

Théorie :

Avec la loi de Fick et l'équation locale du flux thermique, on obtient l'équation de diffusion thermique : $\frac{\partial T}{\partial t} - D \Delta T = 0$ où $D = \frac{\lambda}{\rho c_v}$ avec D le coefficient de diffusion thermique et λ la conductivité thermique.

A partir de cette équation différentielle, on peut trouver l'équation des ondes thermiques dans la barre de cuivre (livre de prépa deuxième année) :

$$T_i(z, t) = T_i + a e^{-\frac{z}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{z}{\delta}\right) \text{ où } \delta = \sqrt{\frac{2D}{\omega}} \text{ où } i \text{ est le numéro du capteur et avec pour condition au limite : } T(z = 0, t) = T_0 + a \cos(\omega t)$$

Il nous suffit donc de mesurer δ pour remonter à la conductivité thermique.

Protocole :

Penser à allumer le banc 2 à 3 avant les mesures pour que le régime permanent soit atteint.

On impose grâce à un module Peltier une oscillation de température d'un côté de la barre de cuivre. Le module Peltier est lui-même commandé par un GBF qui envoie une sinusoïde de tension de fréquence de 2mHz (amplitude entre 0V et 500 mV) afin que l'onde thermique puisse quand même pénétrer dans le barreau de cuivre. On choisit f de façon que le temps d'acquisition ne soit pas trop long mais aussi que tous les thermocouples puissent mesurer une sinusoïde avec une amplitude mesurable : il faut que 5δ environ égal à la longueur de la barre.

Des thermocouples sont placés le long de la barre de cuivre afin de suivre l'évolution de la température à différentes positions de la barre (cf notice pour connaître la position précise des thermocouples). Il suffit donc de lancer une acquisition d'environ 2 périodes (environ 20 minutes pour une fréquence de 2mHz).

On peut remonter au δ de deux manières différentes : soit avec la décroissance exponentielle ou avec la phase des sinusoïdes.

En live, je conseille de mesurer les déphasages des 4-5 premiers capteurs directement sur le logiciel Picolog avec le pointeur est en zoomant sur les courbes car beaucoup plus parlant pour le jury que de faire du traitement de données sur Igor.

J'ai obtenu le résultat suivant :

$$\lambda_{Cu,exp} = 348 \pm 44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \lambda_{Cu,tab} = 390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

On peut comparer avec l'aluminium : 237 W/m/K, le bois 0,16 W/m/K ou le polystyrène : 0,036 W/m/K

Remarques :

- Bien prendre 10 minutes pour cette manip afin de bien décrire le modèle et les hypothèses : modèle semi-infini, choix de la fréquence de travail, module Peltier, pourquoi faire une consigne sinusoïdale et non linéaire, ...
- Tester le temps de thermalisation car cela peut être long

5 Conclusion du montage, ouverture possible

On a pu vérifier les propriétés remarquables des métaux : rigide, de bons conducteurs électriques et thermiques.

Ouverture possible : parler des semi-conducteurs

6 Autres manips, alternatives pour le montage

- Pour le module d'Young : oscillation d'un réglet (cf manip surprise du montage de Arthur)
- Pour la conductivité électrique : la chute d'un aimant dans un tube métallique ou l'effet d'écran (assez long) cf MP20 : induction, auto-induction

7 Questions du correcteur

Module d'Young :

- Comment retrouver l'équation de D'Alembert et quelles sont les hypothèses ? le calcul est détaillé en annexe et l'hypothèse principale est que l'on suppose que le métal reste dans le régime élastique
- Quelle est la fréquence des impulsions ultrasonores utilisées ? Elle est de l'ordre du MHz
- Pourquoi le choix des ultrasons ? car le signal reçu est beaucoup plus propre avec des hautes fréquences
- Intérêt de moyenniser le signal ? Réduire le bruit du signal et donc d'être plus précis
- Pourquoi on doit faire une adaptation d'impédance ? car la densité de l'air et du métal sont très différentes donc l'impédance des deux milieux aussi et l'onde ne rentrera que très peu dans le métal sans le gel (coefficient de réflexion très élevé)
- Quelle est la composition de l'acier ? en majorité du fer avec du carbone

Conductivité électrique :

- De quoi dépend la conductivité ? de la température
- Autres méthodes de mesure de σ ? Chute d'un aimant dans un tube, et l'effet d'écran

Conductivité thermique :

- Pourquoi mesurer le déphasage et pas les amplitudes ? car c'est plus précis
- Pourquoi ce choix de fréquence ? cf plus haut

Manip surprise :

Pendule pesant avec frottement

Réaliser une acquisition avec Latispro et faire une TF avec ce même logiciel pour remonter aux différentes grandeurs caractéristiques du pendule : période, ...

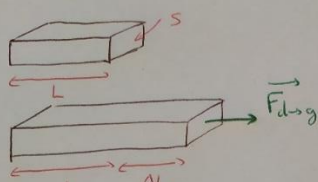
8 Remarques importantes du correcteur

- Préparer une manip en plus en cas de problème le jour J
- Garder l'ordre conductivité électrique/conductivité thermique

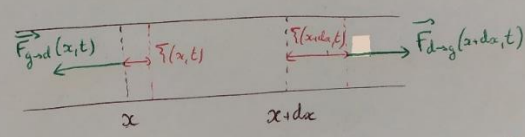
9 Bibliographie pour construire la leçon

- Calcul de l'équation de d'Alembert avec la vidéo suivante :
https://www.youtube.com/watch?v=PiJ_SiOvadM

Module d'Young


$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \frac{F_{d \rightarrow g}}{S}$$

Modèle microscopique



On assimile : L à dx et ΔL à $\xi(x+dx, t) - \xi(x, t) = \frac{\partial \xi}{\partial x} dx$

d'où : $\frac{\Delta L}{L} = \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{E} \frac{F_{d \rightarrow g}}{S} \Rightarrow \| \vec{F}_{d \rightarrow g} \| (x, t) = SE \frac{\partial \xi}{\partial x} (x, t)$

PFO sur l'élément dx :

$$\rho S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} (x, t) = \| \vec{F}_{d \rightarrow g} \| + \| \vec{F}_{g \rightarrow d} \| = SE \left[\frac{\partial \xi}{\partial x} (x+dx, t) - \frac{\partial \xi}{\partial x} (x, t) \right]$$
$$\Leftrightarrow \rho S dx \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} (x, t) = SE \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx$$
$$\Leftrightarrow \boxed{\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{où } c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}}$$

- Physique expérimentale, ALD pour les deux manips sur les conductivités