

# MP 17: Métaux

Elio Thellier & Dihya Sadi

session 2021

## 1 Mesure du module d'Young de quelques métaux.

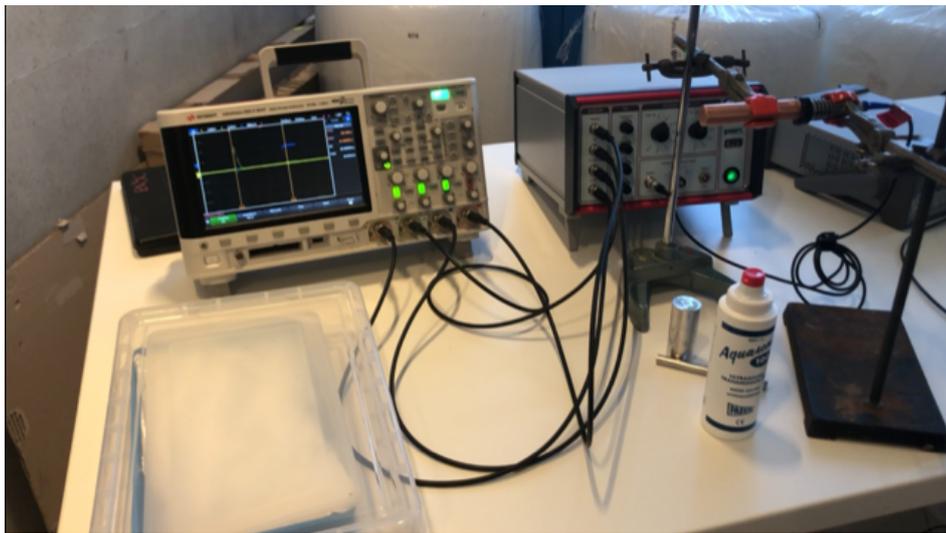


Figure 1: Illustration de l'expérience

Principe : On veut mesurer le module d'Young  $E$  (tel que  $\frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L}$ ) d'un métal. Pour cela on utilise la mesure de la célérité d'une onde ultrasonore longitudinale pour récupérer  $E$  par la relation  $c_{long} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$  où  $\nu$  est le coefficient de Poisson (tel que  $\nu = \frac{\Delta l/l}{\Delta L/L}$ ) donc on fait une réflexion dans un métal et on remonte à la célérité par la relation  $c = \frac{2L}{\Delta t}$ .

Commentaire : initialement on travaillait avec la formule simple  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  et on trouvait toujours autour de 193 GPa (au lieu de 124GPa pour le cuivre), l'expérience reproduit toujours ce résultat, c'est donc le modèle qu'on remet en question. C'est pour ça qu'on a pris en compte le coefficient de Poisson, le résultat est bien plus proche de la valeur recherchée (dernier essai : 128GPa, ajouter les incertitudes)

### 1.1 Matériel

- Cylindres de différents métaux.
- Oscilloscope 4 voies.
- Ultrasonic echoscope GS200.
- 4 ou 5 câbles coax.
- Supports pinces + noix pour les barreaux de métaux.

- Éprouvette pleine d'eau (ou pied à coulisse) et balance pour faire la mesure de la masse volumique du métal avec incertitudes.
- Gel d'adaptation d'impédance.

## 1.2 Protocole

- Mesure de la masse volumique : mesure de la masse et du volume du barreau avec les incertitudes que l'on propage.
- On utilise un générateur d'impulsions d'ondes ultra-sonores qu'on envoie dans le barreau grâce au gel qui permet à l'onde de rentrer et sortir du barreau. Se mettre en "mode 1-1" pour que la sonde fonctionne en émetteur et récepteur en même temps
- Sur l'oscilloscope visualiser les 4 sorties :
  - Trigger : permet de trigger en externe, au rythme auquel le générateur envoie des impulsions.
  - TGC : Permet de sélectionner une partie du signal pour identifier la réflexion : on peut choisir sa largeur avec le bouton Wide, et le départ avec le bouton start. Mettre les boutons threshold et slope au max pour avoir presque un créneau. Expliquer d'ailleurs qu'on sélectionne une petite portion et qu'on fait un gain (ailleurs gain = 0 donc on supprime, et sur le créneau gain > 1 pour amplifier et bien voir le retour)
  - US-signal : signal réel : on voit qu'on envoie un paquet d'onde
  - A-scan : simplement l'enveloppe du signal réel
- Sur l'oscilloscope on visualise ce qu'on envoie et le retour et on mesure  $\Delta t$  avec les curseurs, ce qui nous permet de remonter à la célérité de l'onde puis au module d'Young.
- On fait la mesure plusieurs fois et on en fait une étude statistique en enlevant le barreau et le gel pour changer les biais de mesure. Les incertitudes sont plutôt faibles en fait. C'est normal le protocole est très simple.

Pour le cuivre pur, on attend  $E_{tab} = 124GPa$ . Par exemple pour du bois  $E=15$  et pour du polystyrène  $E=3$ . Donc les métaux ont cette première propriété d'être très rigides, mais pas de généralité, par exemple pour l'indium  $E=10$  alors que pour le bambou  $E=20$ . Vocabulaire : maléable (feuille), ductile (fil), rigide, dur (rayure pénétration), solide (ou résilient : énergie nécessaire pour briser)...

## 1.3 Questions et remarques

- Pourquoi des ultrasons ?
- Domaine de validité de cette équation de d'Alembert ? Domaine d'élasticité du matériau
- Pourquoi il y a une réflexion au bout du barreau ? Parce que on a une interface métal-air sans adaptation d'impédance.  $Z_{acoustique} = \frac{p}{v}$ , pour une acoustique plane progressive  $Z_{ac} = \pm \rho c$ . L'impédance de l'air est très faible devant celle du métal, donc réflexion quasi totale. On rappelle grâce aux relations de continuité de la pression et de la vitesse on trouve le coefficient de réflexion en amplitude  $r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \approx 1$  si  $Z_2 \ll Z_1$
- (Mais si il y a une réflexion très forte dans le barreau quel type d'onde il y a à l'intérieur ? Si on alimente avec un sinus on aurait des ondes stationnaires...)

## 2 Mesure de la conductivité électrique.

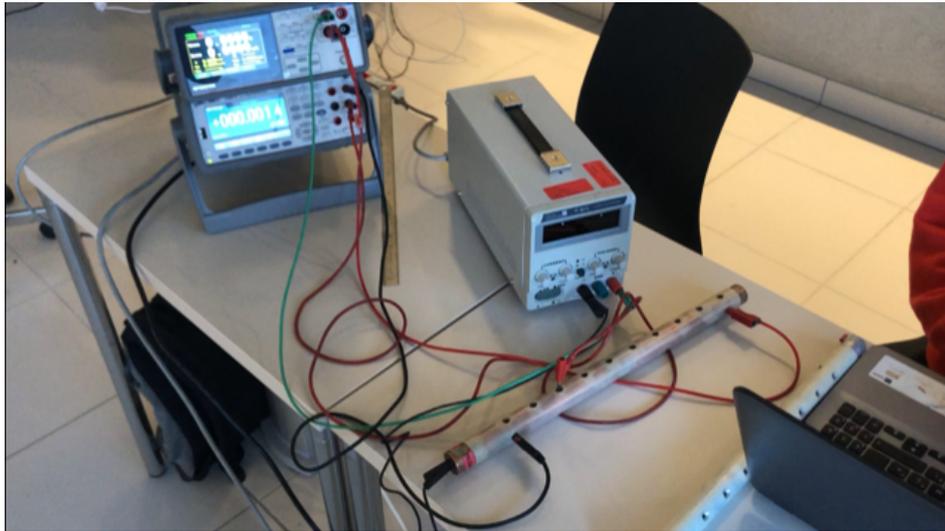


Figure 2: Illustration de l'expérience

Principe : On cherche à remonter à la conductivité électrique d'un barreau de métal à partir de la loi d'Ohm :

$$\frac{U}{I} = \frac{L}{\sigma S}$$

### 2.1 Matériel

- Alimentation stabilisée 36V et 10A type FI 3610
- Fils "dénudés"
- Ampèremètre : prendre n'importe quel wattmètre
- Multimètre : il en faut un de précision. Keysight Digit multimeter 34461A
- Deux barreaux métalliques avec des trous dedans...

### 2.2 Protocole

On réalise un montage 4 fils de sorte que les fils utiles pour la prise de tension ne sont pas parcouru pas un courant (car l'impédance du voltmètre est immense). Ainsi la tension que le mesure  $U = RI$  ne provient que de la partie parcourue par un courant c'est à dire le barreau qui nous intéresse. Les deux autres fils servent eux à acheminer le courant. Grâce à  $R = \frac{l}{\sigma S}$  On trace la résistance en fonction de la longueur et on remonte à la conductivité du métal.

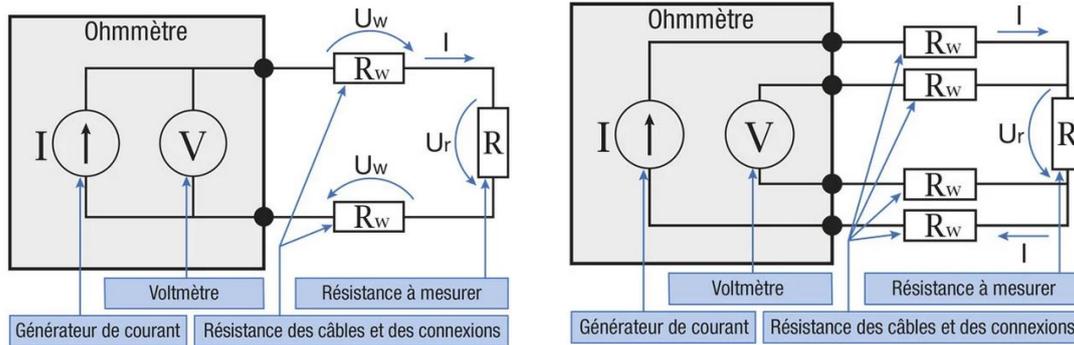


Figure 3: Avantage montage 4 fils pris sur ce site

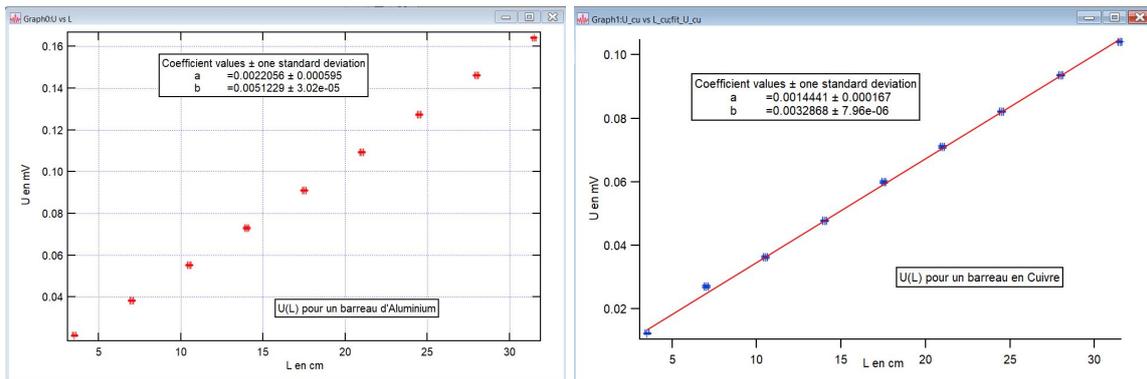


Figure 4: Résultats Cu et Al

On commence par placer le circuit courant. La résistance qu'on va mesurer est très faible donc on envoie un courant très fort, environ 9A, de sorte à avoir une tension mesurable avec un multimètre de précision.

Insister sur le fait que le montage 4 fils est nécessaire parce que la résistance des fils est à priori grande devant celle du barreau, leur section étant plus faible et leur longueur plus grande que celle du barreau. Mais pas grave il suffit de retirer un offset à la courbe finale ? Non car en changeant les points de mesure pour avoir différent L, on établit différents contacts qui viennent changer de manière aléatoire la mesure.

### 3 Mesure de la conductivité thermique du cuivre.

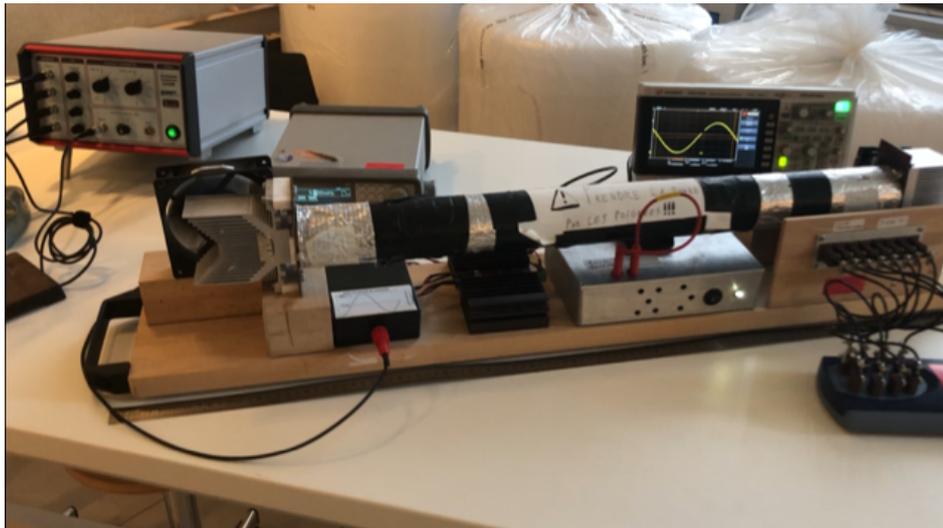


Figure 5: Illustration de l'expérience

#### Matériel

- Logiciel Picolog
- Barreau de cuivre calorifugé avec le module Peltier et les capteurs de températures régulièrement espacés.
- GBF pour piloter la température
- oscilloscope pour vérifier le signal du GBF

Effet Peltier : on impose une différence de potentiel entre les deux soudures du métal : l'une des deux va se refroidir et l'autre va chauffer. Ce que génère l'effet Peltier ce n'est pas une température mais un flux d'énergie thermique. Ce n'est pas un thermostat. Il fournit de la chaleur. C'est comme une corde de Melde : on impose une variation de position, (ie) une vibration, et non pas une position. Le Peltier impose un transfert thermique, c'est pourquoi la condition limite en  $x = 0$  concerne  $\frac{\partial T}{\partial x}$  et non pas  $T$ .

Pour pouvoir considérer que la barre est semi infinie il faut que la longueur de la barre soit grande devant la profondeur de pénétration de l'onde (cf Physique Expérimentale ALD), on impose donc une fréquence pour l'excitation de telle sorte que  $\delta = 10cm$  car la barre fait environ 50 cm, ici on trouve  $f=3.7mHz$

Principe : On envoie des ondes thermiques sinusoïdales dans un barreau de cuivre et en plaçant tout le long du barreau des capteurs de température, on peut tracer la phase en fonction de la pénétration, ou le  $\ln$  de l'amplitude en fonction de la pénétration, et dans les deux cas on obtient une droite de pente  $-\frac{1}{\delta}$  car  $T(x, T) = T_0 + \Delta T e^{-x/\delta} \sin(\omega t - \frac{x}{\delta})$ . Avec la profondeur de peau on remonte à la conductivité thermique car :  $\delta = \frac{2D}{\omega}$  et  $D = \frac{\lambda_{th}}{\rho}$

Protocole : Avec le GBF envoyer un signal sinuzoïdale entre 0 et 1V (strictement positif) de fréquence calculée pour considéré le barreau semi infini. Ouvrir le logiciel Picolog 5, qui peut ne pas être déjà installé il faut alors le télécharger en choisissant d'installer le module/pilote TC-08. Pour utiliser le logiciel et transférer les données sur IGOR, cf [notice d'utilisation de la barre](#) (elle est obsolète au

début, concernant les alimentations (désormais le boîtier gris gère l'ampli et les ventilateurs tout seul) et le signal GBF qui n'a plus à être négatif.

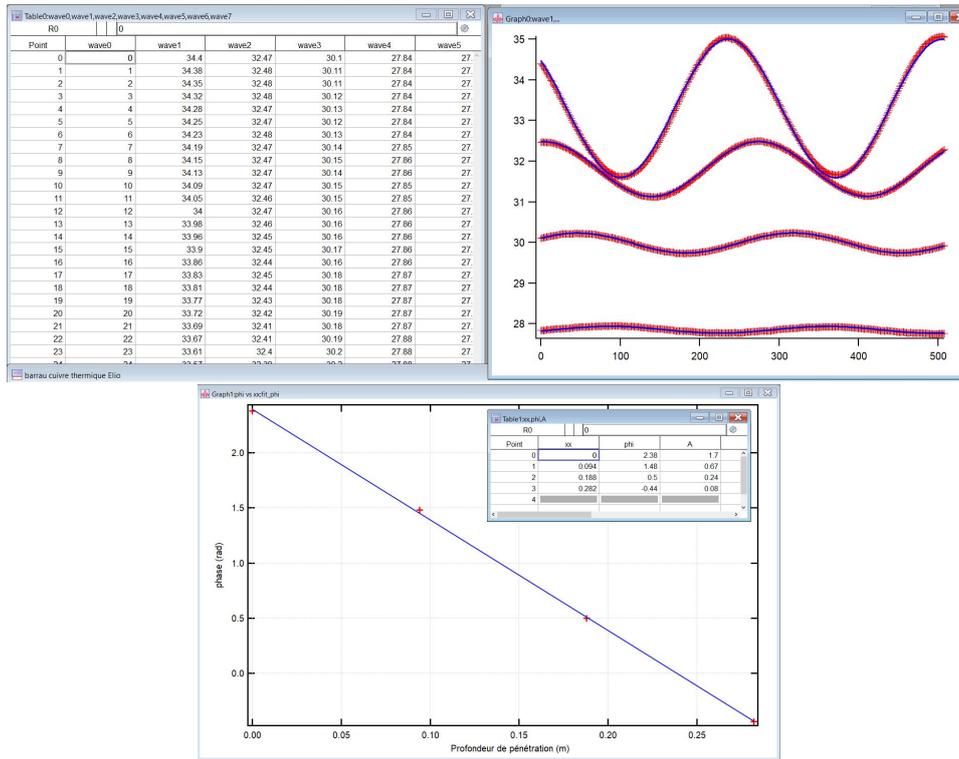


Figure 6: Résultat passé.

Incertitudes sur la mesure de la conductivité thermique :

$$\lambda = \rho c \pi f \delta^2$$

Pour les valeurs de la capacité calorifique  $c$  et de la masse volumique du cuivre cf livre d'ALD.

On a des incertitudes sur :

- La fréquence donnée par le GBF : regarder la notice et calibration sur la base de données ou vérifier à l'oscilloscope (à l'oscillo j'ai trouvé  $\pm 1s$  sur 270s donc erreur de moins de 0.5% négligeable face aux autres.
- Mesure sur la profondeur de peau : après traitement IGOR j'avais trouvé 1% d'erreur
- Discussion à avoir : on en a en vérité aussi sur  $\rho$  et sur  $c$ , mais on ne peut pas vérifier, et on ne sait pas si le cuivre est pur ou pas...
- Idem il faudrait pouvoir avoir l'incertitude sur la position des thermocouples et on la connaît pas, on peut toutefois l'estimer à l'aveugle connaissant la taille typique d'un capteur (1mm) et en faisant l'hypothèse que le travail du constructeur est appliqué (position des trous toujours pris par rapport à l'origine, et non par rapport au précédent) : incertitude de 2 mm ?

Idée : comparer l'incertitude sur  $\delta$  obtenue avec l'amplitude avec celle obtenue avec la phase.

## 4 Magnétostriction

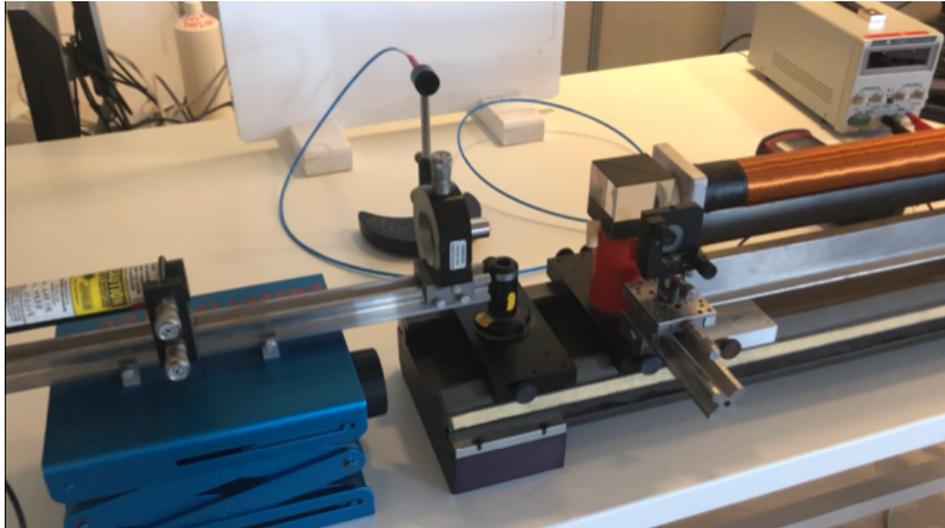


Figure 7: Illustration de l'expérience

Principe : Sous l'effet d'une excitation magnétique, les matériaux ferromagnétiques (qui sont tous des métaux) modifient leur forme. On va s'intéresser à une tige de Nickel introduite dans une bobine, et voir son allongement relatif en fonction de l'excitation magnétique imposée par une mesure d'interférométrie type Michelson.

Matériel :

- Laser épuré (surtout pour élargir le faisceau, le trou n'est pas nécessaire).
- Échantillon de Nickel avec miroir optique collé au bout.
- Montagne magnétostriction : bobine, cube semi, miroir réglable.
- Petite vis avec rondelles pour fixer l'extrémité de l'échantillon.
- Écran et éventuellement lentille de grande focale pour faire l'image de l'infini dessus.
- Alimentation stabilisée **FI3610**, les autres sautent en changeant de calibre quand on augmente trop I, et donc les anneaux sautent et on perd le compte.
- Un multimètre pour mesurer plus précisément le courant envoyé dans la bobine.
- Spectro pour mesurer la longueur d'onde utilisée et son incertitude.

**Attention** : On fait passer de grands courant dans un bobine de grande inductance L : couper brutalement I (en éteignant l'alim sans remettre à zéro, OU en changeant de calibre sur le multimètre (ouvre et ferme le circuit)) génère une immense tension et détruit le matériel !

**Attention** : La bobine chauffe rapidement avec le courant, et l'échantillon se dilate, on ne peut donc plus mesurer une élongation dûe au champ magnétique. Il faut donc faire des points à bas courants, et aller vite au delà. Vérifier expérimentalement que le barreau ne se dilate pas : à I fixe les anneaux sont fixes. Sinon, il se dilate.

Protocole : Avant de d'introduire l'échantillon et de régler le Michelson en lame d'air, on mesure la longueur totale du barreau avec les incertitudes. L'étalonnage courant-excitation magnétique H a été faite dans le poly de JBD, on se sert directement de la relation linéaire dans IGOR pour transformer automatiquement I en H. Pour différente valeur de I on compte le nombre d'anneaux qui ont

défilé. D'un anneau à l'autre correspond un chariotage de  $\frac{\lambda}{2}$ . On compare ensuite avec la courbe obtenue dans l'article du CNRS en 2017. Il donne la valeur "max" de la pente, c'est son coef  $d_{33}$  et on peut donc se comparer à ça. Si notre pente est moins négative, c'est parce qu'on a du fer dans le Nickel. Si on suppose que la proportion fer Nickel est directement proportionnelle à la pente totale, on peut annoncer la composition de notre échantillon (mais cette hypothèse n'a aucune raison d'être, c'est donc très certainement faux, c'est plus pour la mini démarche sympathique).

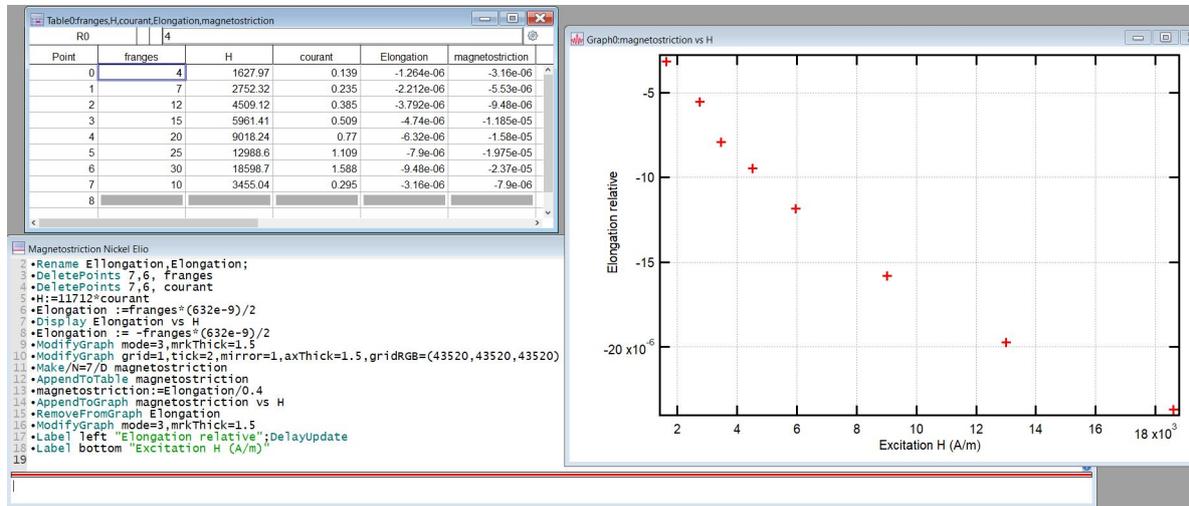


Figure 8: Résultat passé.

## 5 Autre manip

- Vérifier la loi de Wiedemann Franz.
- Ecrantage par courants de Foucault. Savoir en parler.
- Mesure du module d'Young par flexion d'un réglet
- Mesure de conductivité électrique par chute d'un aimant dans différents tubes