

MP1 - DYNAMIQUE DU POINT ET DU SOLIDE

4 juin 2021

Deleuze Julie & Jocteur Tristan

Niveau : Classes préparatoires

Bibliographie

- ♣ *Fascicule de TP Electromagnétisme, Partie Matériaux,*
Quelqu'un-e
- ♣ *Fascicule de TP Optique, Partie Photorécepteurs,*
Quelqu'un-e

Table des matières

1	Un thermomètre primaire : le tube de Kundt	2
2	Le thermomètre à sonde de Platine	4
3	Le thermocouple	5

Remarques sur les montages précédents

- **2017** : Les caméras infrarouges entrent parfaitement dans le cadre de ce montage. Certains candidats font une erreur sur la mesure de la résistance par la méthode 4 fils à cause d'une copie non réfléchiée de certains ouvrages. La question de la référence de température dans un thermomètre à thermocouple commercial ne doit pas surprendre les candidats.
- **2014, 2015, 2016** : De nombreux candidats utilisent à bon escient les échelles secondaires de température (résistance de platine) et ont compris que la notion de point fixe est essentielle pour l'établissement d'une échelle thermométrique. En revanche, certains ignorent encore les mécanismes physiques mis en jeux dans les différents capteurs qu'ils utilisent et ne réfléchissent pas suffisamment à la précision requise lors de l'utilisation d'un thermomètre « de référence ». Enfin, il serait intéressant de faire intervenir des capteurs de température plus modernes, comme des caméras infra-rouge.

Bon basiquement c un montage sur les capteurs... Ça serait bien de trouver une caméra IR pour une manip quali en ouverture pour que le jury se branle dessus. Il faut commencer par un thermomètre primaire pour la logique : le tube de Kundt ça a l'air d'être ce qui marche le mieux et ça permet de tracer une droite. Ensuite le thermomètre à sonde de Pt hyper original, ça permet de parler de l'importance des points de changement d'état pour les définitions des échelles de T et un thermomètre d'usage courant, le thermocouple on peut faire un temps de réponse c bieng. Le pyromètre optique c assez boîte noire donc bof mais on peut en parler en ouverture comme moyen de mesurer des grandes T à distance. Donc basiquement montage de pacary. Ya tous les protocoles dans le poly de TP. Bien poenser à utiliser les caractéristiques des capteurs comme fil conducteur.

1 Un thermomètre primaire : le tube de Kundt

➤ Fruchart



le tube de Kundt agit comme un guide d'onde : il faut choisir une fréquence inférieure à 4 kHz environ pour avoir propagation. Il est préférable de repérer le maximum de noeuds et de ventres pour minimiser l'incertitude sur la mesure de la longueur d'onde : il faut alors choisir une petite longueur d'onde donc une grande fréquence.

2.2 Le thermomètre acoustique : étude du tube de Kundt

✎ [FLICLD] p.528

Le thermomètre acoustique repose sur la mesure de la vitesse du son c_s dans un résonateur. Celle-ci permet de déterminer la température de façon indépendante de toute échelle. Pour un gaz parfait, en notant γ le coefficient isentropique du gaz, M sa masse molaire et R la constante des gaz parfaits, la célérité du son s'exprime :

$$c = \frac{\gamma RT}{M}$$

Nous avons à disposition un tube de Kundt, schématisé en figure 6.3 à gauche. Le tube de Kundt est un tuyau rempli d'air de longueur L et de section circulaire. Le tuyau est thermalisé par un bain thermostaté. À son entrée est placé un haut-parleur excité par un GBF. L'onde acoustique générée par le haut-parleur est réfléchiée partiellement sur l'autre extrémité, fermée par un

bouchon : cela conduit à la propagation d'une onde stationnaire (voir figure 6.3 à droite)². Un microphone mobile permet de mesurer le champ de surpression acoustique.

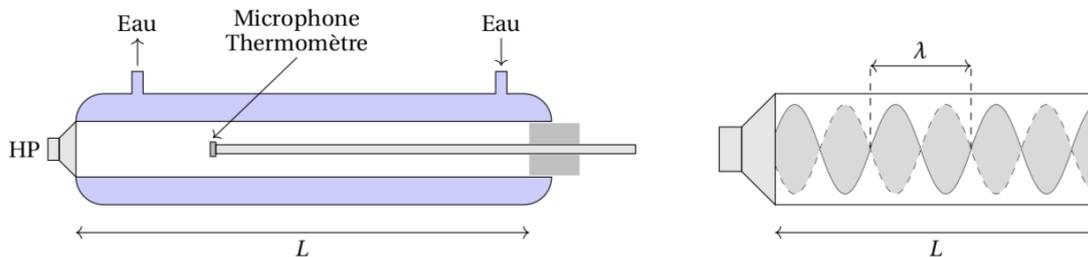


FIGURE 6.3 – À gauche, schéma du tube de Kundt. À droite, onde stationnaire de surpression dans le tube.

La mesure de la vitesse du son dans un tube de Kundt est simple à réaliser : en mesurant à la fois la fréquence f et la longueur d'onde $\lambda = 2\pi/k$ de l'onde sonore, on remonte à sa célérité $c = \lambda f$. En effectuant cette mesure à plusieurs températures, on détermine la variation de la célérité du son dans l'air avec la température, que l'on peut comparer à la prédiction théorique concernant le gaz parfait. La fréquence est imposée à l'aide du haut-parleur ; la longueur d'onde est la période spatiale du système d'ondes stationnaires qui s'établit dans le tube.

Pour faciliter la mesure, on peut exploiter l'existence de résonances. La longueur d'onde à la résonance $\lambda_n = 2L/n$ ne dépend pas de la température mais seulement de la géométrie du tube.

Mesurer la température à l'aide du thermomètre situé sur la tige du micro (dispositif P72.3). On commencera par une mesure à température ambiante.

Le bain thermostaté ne fournit qu'une indication : à cause des pertes, sa température n'est pas forcément celle de l'air contenu dans le tube.

Alimenter le haut-parleur avec un GBF (amplitude 2 V) et brancher le micro sur l'oscilloscope. Ajuster la fréquence du GBF pour se placer à une résonance. On peut commencer à $f \approx 2$ kHz. On peut repérer celle-ci par l'existence de nœuds d'onde stationnaire. On peut également utiliser la méthode de Lissajous : sur l'oscilloscope, on met le signal de sortie du GBF et le signal du micro en mode XY. On obtient une ellipse : on cherche à réduire cette ellipse à une droite en changeant la fréquence.

Mesurer la fréquence du signal sonore, à l'aide d'un fréquencemètre ou de l'oscilloscope. En déplaçant le micro, repérer les maxima et minima successifs de l'amplitude de l'onde stationnaire. En déduire la longueur d'onde $\lambda = 2(x_{i+m} - x_i)/m$, m désignant le nombre de maxima d'amplitude observés (voir schéma 6.3).

Cette mesure doit être très soignée : mesurer le plus grand nombre de maxima/minima possible. On pourra marquer la tige du micro à l'aide d'un marqueur pour éviter toute erreur de parallaxe.

REMARQUE : une incertitude de 1 cm sur la mesure de la longueur est une incertitude d'environ 3% sur la célérité, donc de 6% sur la température, c'est-à-dire ± 20 K!

On va maintenant faire les mesures en augmentant la température, car le refroidissement du système est très long. Avec les thermostats PO.86, il est possible de régler la température de consigne, l'actionnement du réfrigérateur, et d'autres paramètres (débit de la pompe, etc.) avec le bouton Menu.

Réaliser la mesure pour différentes températures : remettre la tige du micro dans le tube (pour qu'elle soit thermalisée aussi), attendre la thermalisation (contrôler avec le thermocouple), puis rechercher de nouveau la résonance en changeant la fréquence, et répéter le protocole.

L'inertie thermique du dispositif est assez importante : la thermalisation peut prendre plusieurs minutes : vous pouvez mener d'autres expériences en parallèle de celle-ci.

Calculer la célérité $c = \lambda f$ pour différentes températures et tracer $c^2 = f(T)$: on cherche un ajustement linéaire, de pente $\gamma R/M$.

2 Le thermomètre à sonde de Platine

✦ Asch et Taillet

À la différence des thermomètres primaires, les thermomètres secondaires ne sont pas capables de réaliser une mesure directe de la température : ils dépendent d'une échelle de température et nécessitent un étalonnage ou une calibration. Dans l'EIT-90, la température est définie au moyen de thermomètres à résistance de platine entre 13,8 K et 1035 K; ce dernier étant calibré à partir des points fixes de référence. Les coefficients donnant la résistance en fonction de la température peuvent être consultés dans [R2510].

Le thermomètre à résistance de platine est un thermomètre pour lequel la température est déduite de la mesure de la résistance électrique d'un fil de platine. Le platine est utilisé car il présente sur d'autres métaux l'avantage de pouvoir être obtenu sous forme très pure et de garder des propriétés électriques stables. Dans le domaine de température entre 0°C et 850°C, la variation de la résistance R avec la température peut se modéliser par l'équation de Callendar-Van Dusen :

$$R(T) = R_0 (1 + aT + bT^2)$$

Attention, T désigne la température en °C. Les valeurs a et b ont été déterminées grâce aux points fixes de définition et sont désormais définis par l'EIT-90. R_0 désigne la résistance à $T = 0$ °C. Afin d'avoir des valeurs précises, on emploie des résistances préalablement étalonnées, en particulier, on nomme Pt100 la résistance pour laquelle $R_0 = 100 \Omega$. On a, pour cette résistance :

$$a = 3,90802 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{et} \quad b = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

On peut trouver ces valeurs dans [Asch], p.270 ou [Taillet Dico], p.680.

Nous allons réaliser l'étalonnage de la sonde de platine à l'aide de trois points fixes : la fusion de l'eau $T = 273,15$ K et de l'étain $T = 505,01$ K, et l'ébullition de l'eau $T \approx 373$ K. On repèrera le changement d'état par la présence d'un palier de température correspondant au changement d'état.

Toutes les mesures seront réalisées avec un montage 4-fils. On pourra utiliser le multimètre Fluke 8846A P69.35. Il est également possible de réaliser un montage électronique permettant d'éviter l'utilisation d'un ohmmètre 4-fils.

Pour mesurer la résistance, utiliser le multimètre de précision P69.35. Brancher la sonde de platine P102.120 (boîtier et sonde). Les deux bornes du haut à une extrémité de la résistance doivent être branchées sur les entrées HI, les deux autres bornes sont à relier aux entrées LOW. Ne pas oublier d'activer la fonction 4-WIRE.

L'avantage du montage 4-fils est qu'il n'y a pas de courant qui circule dans la maille du voltmètre : cela évite la mesure des résistances parasites des fils et soudures.

Mesurer la résistance de la Pt100 P102.120 pour les différents changement d'état. On pourra éventuellement utiliser la fonction mémoire du multimètre 4-fils pour voir les plateaux de changement d'état (voir sa notice).

- Mesurer la résistance en immergeant l'extrémité de la sonde dans un mélange eau/glace, on doit trouver 100 Ω .
- Faire fondre de l'étain P75 dans un creuset P101 (suspendu par un trépied) en chauffant avec un bec Bunsen P101.29 (relié au gaz avec les tuyaux rouges P101), y placer la sonde de platine. Relever la valeur de résistance correspondant au plateau de température. Pour récupérer la sonde de platine, il faut faire refondre l'étain : cela peut être l'occasion d'une deuxième mesure en montée.
- Faire bouillir de l'eau en déposant un béccher sur une plaque chauffante P101.16 et enregistrer simultanément la résistance : relever la valeur de résistance correspondant au plateau de température.

REMARQUE : Si on utilise l'ébullition du diazote pour étalonner la Pt100, il faut interpoler la valeur de résistance avec un polynôme d'ordre 3 pour se conformer à l'EIT-90.

REMARQUE : Il est possible de mettre en évidence l'effet d'autoéchauffement du capteur avec la sonde de platine, en suivant un protocole analogue à celui présenté dans la partie 4.2.

Étalonnage

✦

⊖

Auto-échauffement

✦

⊖

On branche en série un générateur de courant, un rhéostat et la sonde (+voltmètre et ampèremètre). On envoie une certaine intensité et on mesure la tension. On trace $R = U$ en fonction de I . Le rhéostat sert à modifier l'intensité I et comme ça on peut utiliser un générateur de tension stabilisé. Normalement la résistance ne devrait pas dépendre de l'intensité, mais ici, on observe un effet de dérive du fait de l'échauffement par effet Joule.



Temps de réponse



Même montage que pour le thermocouple : on utilise la fonction mémoire du multimètre de précision. **Demander une clé USB.** Pour faire une acquisition commencer par effacer la mémoire interne du multimètre dans MEMORY -> MANAGE MEMORY -> ERASE MEMORY. Puis aller dans MEMORY -> STORE READINGS -> Sélectionner INTERNAL MEMORY et dans SAMPLES choisir le nb de points (500 par ex). Appuyer sur START et quand l'acquisition est terminée, MEMORY -> MANAGE MEMORY -> INT MEAS TO USB. Après faut traiter avec un code Python parce que c dégueu. Au début et à la fin du fichier il ya les temps de début et de fin d'acquisition, on s'en sert pour avoir la période d'échantillonnage.

C'est pas terrible comme temps de réponse pour des applications pratiques comme un suivi de T...

On va maintenant voir un capteur de température actif. Le thermomètre à résistance de platine permet l'étalonnage d'autres thermomètres d'usage courant : thermistances, thermocouples, etc.



3 Le thermocouple

Inversion de la relation $R(T)$:

$$\Delta = \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 4\left(\frac{1}{b} - \frac{R}{bR_0}\right) \quad (1)$$

et

$$T(R) = \frac{1}{2} \left(-\frac{a}{b} - \sqrt{\Delta(R)}\right) \quad (2)$$

On arrête l'agitation quand on prend la mesure pour minimiser les fluctuations.

Effet Seebeck Il est possible de générer un champ électrique si on soumet un barreau métallique uniquement à un gradient de température. Cet effet fut mis en évidence par Thomas Seebeck en 1824. La relation entre ces deux grandeurs s'écrit, sous forme locale :

$$\vec{E} = -\varepsilon \vec{\nabla} T$$

Ou encore, sous forme macroscopique :

$$dU = -\varepsilon dT$$

Le coefficient ε est appelé coefficient Seebeck ou pouvoir thermoélectrique du matériau. Il peut être positif ou négatif et est de l'ordre de quelques $\mu V/K$.

Bien que la relation ci-dessus suggère qu'il soit en principe possible d'accéder au coefficient Seebeck d'un matériau, il n'en est rien dans la pratique. En effet, pour mesurer une tension, il est nécessaire de connecter l'échantillon à des fils conducteurs et de les relier à un voltmètre (voir figure 6.4).

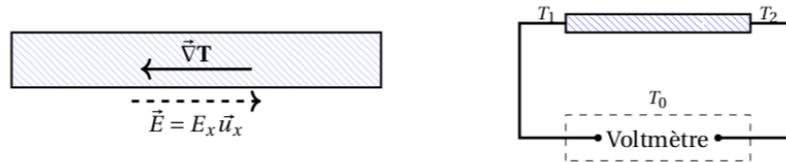


FIGURE 6.4 – À gauche, principe de l'effet Seebeck. À droite, mesure du coefficient Seebeck : la tension mesurée dépend du coefficient Seebeck du matériau mais également de celui des fils qui le relie au voltmètre.

Dans ce cas, la tension mesurée aux bornes du voltmètre est, en notant T_0 sa température :

$$\begin{aligned} U &= \varepsilon_{\text{Cu}} (T_1 - T_0) + \varepsilon (T_2 - T_1) + \varepsilon_{\text{Cu}} (T_0 - T_2) \\ &= (\varepsilon_{\text{Cu}} - \varepsilon_x) (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

La différence de potentiel effectivement mesurée au voltmètre est reliée à la différence des coefficients Seebeck.

On peut mettre en évidence l'effet Seebeck en utilisant des métaux différents d'usage courant (fer, cuivre) mais l'effet obtenu est assez faible.

Constitution d'un thermocouple Le thermocouple le plus simple que l'on peut réaliser est schématisé en figure 6.5. Il reprend le principe de la mesure du coefficient Seebeck présenté en figure 6.4. On mesure la température par rapport à une référence connue, souvent le mélange eau/glace. Dans ce cas :

$$U = (\varepsilon_{\text{Cu}} - \varepsilon_1) (T - T_0)$$

La tension mesurée dépend alors de la nature des deux conducteurs et de la température des jonctions. La jonction soumise à la température inconnue est appelée **soudure chaude**, celle maintenue à la température connue (souvent 0°C) est nommée **soudure froide**.

Une fois la courbe $U(\Delta T)$ déterminée par étalonnage, la mesure de cette différence de potentiel permet de remonter à la différence de température.

La mesure se faisant au niveau d'une jonction dont les dimensions peuvent être très étroites, le thermocouple permet des mesures de température ponctuelles et du fait de sa faible capacité calorifique peut posséder un temps de réponse très faible. Un autre intérêt du thermocouple est que le signal délivré est une tension : il n'est pas nécessaire de réaliser un conditionnement d'une part, et il n'y a pas d'incertitude lié à un possible auto-échauffement du capteur comme on peut l'avoir avec une thermistance ou une sonde de platine.

Utiliser deux thermocouples de type T pour réaliser l'expérience présentée en figure 6.5. Dans ce cas, le métal 1 est du constantan (alliage de cuivre et de nickel). On utilisera le dispositif P102.12M. Mettre une des sondes dans un mélange eau-glace. Remplir d'eau un b cher, le disposer sur un agitateur chauffant P101.16. Y placer un barreau aimanté, la deuxième sonde, ainsi que le thermomètre à résistance de platine. Pour plusieurs températures mesurées au moyen de la Pt100 P102.120 (et du ohmmètre 4-fils Fluke 8846A P69.35), mesurer la tension U correspondante au multimètre.

Représenter $U = f(T)$ pour des températures entre 0°C et 60°C . En déduire la sensibilité du capteur $S = \left. \frac{1}{U(T_0)} \frac{\partial U}{\partial T} \right|_{T_0}$ et commenter sa linéarité.

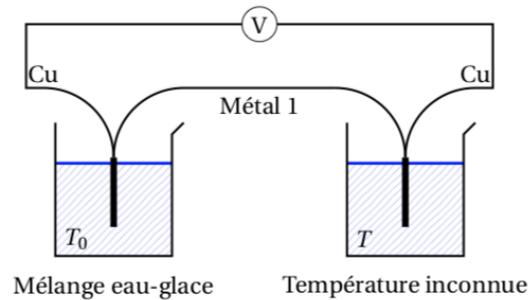


FIGURE 6.5 – Mesure d'une température inconnue T au thermocouple par rapport à une température de référence T_0 .

Étude du temps de réponse

Placer les deux soudures dans un bain eau-glace à température T_0 . Faire l'acquisition sur Latis-Pro de la tension aux bornes du thermocouple. Placer rapidement une des soudures dans un bain d'eau agité à la température T . Observer le signal aux bornes du thermocouple. Tracer cette courbe pour plusieurs valeurs de température.

L'origine du temps de réponse est le rapport entre la capacité thermique du capteur et le coefficient d'échange thermique entre le bain d'eau et le capteur. On peut supposer que l'évolution de la tension est de la forme :

$$U = U_{\infty} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

Ajuster les courbes expérimentales par ce modèle et observer que τ dépend peu de la température finale.

Comparer qualitativement le temps de réponse observé avec le temps de réponse dans un bain non agité, puis dans l'air.

REMARQUE : Vous pouvez aussi mesurer le temps de réponse avec le thermocouple P102.12D, plus massif.

Thermocouple à trois soudures On peut utiliser également des montages à trois soudures, où une des soudures est soumise à la température à mesurer et les deux autres maintenues à la température de référence : ce montage permet d'utiliser des couples de métaux n'impliquant pas le cuivre (type K entre autres) : on pourra lire [Quaranta] p.184.

Compensation électronique de soudure froide L'usage d'un bain eau-glace permet une meilleure précision mais n'est pas pratique à l'utilisation. La plupart du temps, la soudure froide est placée dans l'appareil de mesure, et est donc à température ambiante T_a . Pour compenser ce fait, un circuit électronique ajoute une tension égale à $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(T_a - T_0)$ (circuits dits de compensation de soudure froide). La mesure de T_a est usuellement effectuée au moyen d'une résistance thermométrique. Pourquoi alors utiliser un thermocouple qui nécessite une compensation de la jonction de référence? Les thermistances, sondes de platine ou circuits intégrés ont des plages de mesure limitées alors que les thermocouples ont des plages de température très étendues, peuvent prendre des formes et des tailles très diverses (pouvant donner lieu à des temps de réponse très courts par exemple), peuvent parfois être utilisés dans des atmosphères explosives ou nocives, peuvent être soudés, etc.

Le temps de réponse étant très faible, impossible de le mesurer avec une précision satisfaisante mais on voit déjà qu'il est inférieur à 10 ms, et qu'on a gagné plusieurs ordres de grandeurs par rapport à la sonde de Pt.