

Mesures de température

Bibliographie

- ✎ [R2510] : M. SADLI, *L'échelle internationale de température : EIT-90*, Techniques de l'ingénieur n°R2510
- ✎ [Asch] : G. ASCH et al. *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Dunod (2010)
- ✎ [Duffait Elec] : R. DUFFAIT et J.-P. LIÈVRE, *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*, Bréal (2010)
- ✎ [Couture-Zitoun] : L. COUTURE et R. ZITOUN, *Physique statistique*, Ellipses (1992)
- ✎ [FLTCLD] : M. FRUCHART, P. LIDON, E. THIBIERGE, M. CHAMPION, A. LE DIFFON, *Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique*, De Boeck (2016)
- ✎ [Quaranta II] : L. QUARANTA, *Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II : Thermodynamique et applications*, Pierron (2002)
- ✎ [Taillet Dico] : R. TAILLET, L. VILLAIN, P. FEBVRE, *Dictionnaire de physique*, De Boeck (2013)
- ✎ [R400] : Y. PARMENTIER et F. KRATZ, *Capteurs : définition, principe de détection*, Techniques de l'ingénieur n°R400
- ✎ [K730] : P. LEBLOIS, *Thermoélectricité : des principes aux applications*, Techniques de l'ingénieur n°K730
- ✎ [E2120] : M. CANTAGREL, *Thermistances à CTN*, Techniques de l'ingénieur n°E2120
- ✎ [BUP 827] : A. DEIBER et O. KEMPF, *Lampe à incandescence, corps noir, loi de Stefan et filtre passe-bas*, BUP 827 p.1595 et suivantes, (2000)

Commencer par préparer en avance l'expérience du thermomètre à gaz.

Remplir une bassine d'eau assez haute et y fixer un thermostat P101. 14 (si le dispositif n'est pas déjà prêt). Mettre le thermostat à une température d'environ 40°C.

1 Échelles de température et capteurs thermométriques

1.1 Mesure de température

✎ [Taillet Dico] p.666, [Asch] p.235, [R2510]

La température est une des grandeurs physiques dont la mesure est la plus fréquente. Historiquement associée aux notions de chaud et de froid, la thermodynamique et la physique statistique définissent la température thermodynamique à partir de l'énergie E et de l'entropie S d'un corps ainsi :

$$T = \left. \frac{\partial S}{\partial E} \right|_V$$

Elle est égale à celle qu'aurait un gaz parfait en équilibre avec le système considéré.

La température détermine de nombreuses propriétés physiques des matériaux, les transitions de phases, etc. Cependant, il est difficile d'y affecter une valeur numérique car c'est une grandeur intensive. Contrairement à la longueur ou à la masse, on ne définit pas aisément des multiples et des sous-multiples d'un étalon de référence.

En pratique, les propriétés des matériaux dépendent de leur température et il est toujours possible, à partir des variations thermiques de celle-ci, de définir une échelle de température. Néanmoins, le choix de cette échelle est arbitraire et il est important de faire le lien entre le repérage de la température et la température thermodynamique.

1.2 L'échelle internationale de température EIT-90

✎ [R2510], [Asch] p.238

On utilise dans le système international le kelvin (K) : c'est la fraction $\frac{1}{273,16}$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Le kelvin est une mesure de température absolue : la température de 0 K correspond au zéro absolu.

La température thermodynamique (définie ci-dessus) est mesurée à l'aide de thermomètres dits primaires. On peut citer par exemple :

- le thermomètre à gaz qui repose sur la mesure de la pression d'un gaz réel à volume constant. Pour un gaz parfait, l'équation d'état est donnée par $pV = nRT$: p désigne la pression (en Pa), V le volume occupé par le gaz (en m^3), n la quantité de matière (en moles), T la température absolue (en K) et R la constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$). En tenant compte des interactions entre les molécules de gaz, on aboutit à l'équation du Viriel qui permet d'étendre la loi des gaz parfaits.

La principale incertitude provient de la nécessité de travailler à des pressions élevées (afin d'obtenir une incertitude relative sur la pression faible) ce qui est contradictoire avec la nécessité d'utiliser des densités faibles pour se rapprocher du modèle du gaz parfait.

- le thermomètre acoustique qui repose sur la mesure de la vitesse du son dans un résonateur. Cette méthode fait appel à la mesure de fréquence de résonance qui permet la détermination de la célérité du son égale, au premier ordre, à :

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

γ désigne le rapport des capacités calorifiques à pression et volume constant et M la masse molaire du gaz.

- le thermomètre à rayonnement qui utilise la mesure du rayonnement dans tout le domaine spectral. Il permet de remonter à la température grâce à la loi de Stefan reliant la puissance rayonnée P à la température :

$$P = \sigma T^4$$

σ désignant la constante de Stefan-Boltzmann. Cette méthode nécessite de disposer d'un signal relativement élevé donc est réservée aux hautes températures.

L'usage de ces thermomètres permet la mesure de la température thermodynamique mais est peu pratique : ces thermomètres sont utilisés pour **déterminer la position de points fixes** correspondant à des changements d'état (points triples et critiques de corps purs soigneusement sélectionnés).

La détermination de ces points fixes permet de constituer une **échelle de température**. L'échelle actuellement en vigueur est l'EIT-90 (ITS-90 en anglais). Entre ces points fixes, la mesure de température s'effectue au moyen de thermomètres à résistance de platine : on utilise des formules d'interpolation obtenues grâce à l'étalonnage de ce dernier avec les points fixes. Au-dessus du point de congélation de l'argent ($961,78^\circ\text{C}$), la température est déterminée par la loi du rayonnement de Planck et un point fixe de définition.

Le thermomètre à résistance de platine est d'un usage plus aisé et permet l'étalonnage de thermomètres secondaires d'usage courant et peu onéreux : thermocouples, thermistances, thermomètres à dilatation, etc.

Il faut avoir à l'esprit les principales caractéristiques importantes des capteurs : capteurs actifs et passifs, conditionnement, étalonnage, linéarité, sensibilité, rapidité, hystérésis, fidélité, justesse, précision, résolution, finesse. Les définitions de ces différents termes sont données dans le TP "Capteurs et mesures physiques" du fascicule d'électromagnétisme ou dans l'article des techniques de l'ingénieur [R400].

1.3 Précautions à prendre pour une mesure de température

🔗 [Asch] p.240-251

Justesse La température mesurée au moyen d'un thermocouple ou d'une résistance thermométrique **est celle du capteur**. Cette dernière dépend bien entendu du milieu dans lequel il est plongé mais est déterminée par les échanges dont le capteur est le siège : l'énergie échangée entre le capteur et le milieu dont on mesure la température, l'énergie échangée entre le capteur et l'environnement externe et l'énergie dissipée dans le capteur par le courant de mesure.

Il faut ainsi éviter des échanges thermiques parasites donc :

- il faut éviter les échanges thermiques entre le capteur et l'environnement extérieur au milieu étudié;
- il faut éviter que l'énergie dissipée dans le capteur soit élevée (voir 4.2);
- il faut éviter que des réactions chimiques ou des changements d'état se passent sur le capteur (évaporation d'eau, dissolution d'impuretés) : il faut utiliser un capteur propre et sec.

Rapidité Les échanges thermiques avec l'extérieur peuvent être de différents types : conductifs, convectifs, rayonnement. Entre le capteur à la température T_c et le milieu dont on veut mesurer la température T , la puissance échangée peut s'écrire de façon simplifiée¹ :

$$P = A(T_c - T)$$

1. Que ce soit pour les échanges conductifs (loi de Fourier), les échanges convectifs (loi de Newton), ou les échanges par rayonnement (loi de Stefan pouvant être linéarisée).

Or, cette puissance est égale à :

$$P = C \frac{dT_c}{dt}$$

où C désigne la capacité calorifique du capteur. On peut donc décrire schématiquement l'évolution de la température du capteur en fonction du temps par :

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{A}{C} (T_c - T_a)$$

Le coefficient $\frac{C}{A}$ détermine dans le cadre de ce modèle simple le temps de réponse du capteur. Ainsi, pour effectuer une mesure de température avec un temps de réponse réduit :

- il faut choisir un capteur de capacité calorifique la plus faible possible : un capteur trop gros ne sera pas sensible aux variations rapides de température;
- il faut essayer de maximiser le coefficient d'échange A : on mesurera préférentiellement un bain liquide, notamment pour l'étalonnage des capteurs.

2 Étude expérimentale de thermomètres primaires

2.1 Le thermomètre à gaz

Nous allons utiliser un thermomètre à gaz dans le but de :

- vérifier que l'on peut assimiler l'air à un gaz parfait dans les conditions de l'expérience;
- obtenir une température de changement d'état à partir d'un point fixe de référence.

Ceci a pour but d'illustrer comment est **établie** l'échelle internationale de température.

2.1.1 Vérification de la loi des gaz parfaits

De l'air est emprisonné dans une seringue graduée en volume, reliée de façon étanche à un pressiomètre, et plongée dans un bain thermostaté, comme représenté en figure 6.1. On fait varier, à n et T constantes, le volume V de cette seringue, on enregistre les variations de pression p correspondantes pour vérifier la validité du modèle du gaz parfait.

Remplir une seconde bassine d'un bain eau/glace.

Utiliser une seringue de 50 mL P104.29 et vérifier d'abord que la seringue est sèche et propre. Placer le piston à mi-course. La relier à un pressiomètre P96.55 (utiliser un petit tuyau flexible adapté). Assurez-vous que l'ensemble est étanche (la pression est constante lorsque le piston est sous pression). Plongez la seringue dans le bain eau/glace et mesurez p pour plusieurs valeurs de V (maintenir le piston). Entre chaque mesure, attendez la stabilisation de la valeur quelques secondes. Répétez l'opération dans le bain à 40°C (sans changer la quantité de matière contenue dans la seringue). Vous pouvez utiliser des gants de vaisselle si la température vous gêne. Il est également possible d'utiliser la sortie en tension du pressiomètre. L'incertitude est plus faible (voir notice) mais cela nécessite un étalonnage préalable.

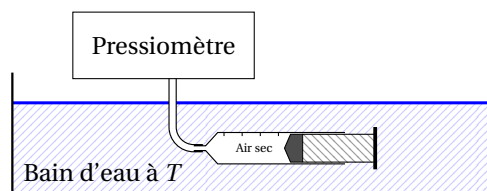


FIGURE 6.1 – Vérification de la loi des gaz parfaits.

Pour l'analyse des données, il faut remarquer que l'on ne connaît le volume de gaz qu'à une constante près. En effet, le volume du tuyau V_0 (de l'ordre de 2 ou 3 mL) s'ajoute au volume de la seringue.

🔗 [Couture-Zitoun] p.437

Par ailleurs, en tenant compte des interactions des molécules de gaz entre elles, on aboutit à l'équation du Viriel, permettant d'étendre, macroscopiquement la loi des gaz parfaits aux gaz réels. On note p la valeur de pression mesurée au manomètre, V le volume d'air contenu dans la seringue. Dans un gaz de sphères dures, le développement du Viriel peut s'écrire :

$$\frac{p(V + V_0)}{nRT} \approx 1 + 4x + 10x^2 + \dots$$

Où $x = \frac{nv_0 \mathcal{N}_A}{V}$ avec $v_0 \approx \frac{4}{3}\pi r_0^3$ désignant le volume des sphères dures. En identifiant r_0 au rayon moléculaire du diazote ou du dioxygène, on obtient :

$$x \approx v_0 \frac{p}{k_B T} \approx 2.5 \times 10^{-3}$$

Ce qui justifie que l'on limite le développement du Viriel au premier ordre. Ainsi :

$$p(V + V_0) = nRT + \underbrace{(4v_0 n \mathcal{N}_A)}_{V_v} p$$

On constate que la correction du Viriel peut être considérée comme indépendante de la température. V_v est de l'ordre de 0,3 mL. D'où :

$$pV = nRT + (V_v - V_0) p \equiv nRT + V_t p$$

On peut donc réaliser un ajustement linéaire du produit pV en fonction du volume V en imposant la même valeur de volume pour les deux températures différentes.

Rentrer les valeurs de p et V réalisées à 0°C et 50 °C dans Régressi sous les variables $\{p1, v1\}$, $\{p2, v2\}$, créer les variables $pv1=p1*v1$ et $pv2=p2*v2$ puis dans la case "Expression du modèle", réaliser la modélisation $pv1=A1-Vt*p1$ et $pv2=A2-Vt*p2$ en même temps.

Comparer le rapport A_2/A_1 à la valeur attendue T_2/T_1 .

REMARQUE : il est également possible d'étudier $pV = f(p)$ avec le dispositif SF₆ étudié au TP7. Cependant, on se situe proche d'un changement d'état, le comportement est donc assez éloigné d'un gaz parfait : les corrections du Viriel sont importantes et peuvent dépendre de la température.

2.1.2 Analyses approfondies (en seconde lecture)

Le problème avec l'utilisation de Régressi est qu'on ne sait pas comment l'ajustement est fait, et que les incertitudes sur la valeur de température sont grandement surestimées.

Approche théorique Une première approche du problème consiste à chercher pour quelle valeur de V_0 , $nRT_1 = A_1$ et $nRT_2 = A_2$ modélisent le mieux les données expérimentales. Le modèle que l'on recherche est :

$$\begin{cases} p_1 (V_1 + V_t) = A_1 \\ p_2 (V_2 + V_t) = A_2 \end{cases}$$

Pour cela, on peut chercher par le calcul les valeurs de V_0 , A_1 et A_2 qui minimisent l'écart entre les données expérimentales et le modèle, c'est-à-dire :

$$\chi^2 = \sum_i (p_{1i} (V_{1i} + V_0) - A_1)^2 + \sum_j (p_{2j} (V_{2j} + V_0) - A_2)^2$$

Pour cela, on annule les dérivées de χ^2 par rapport à V_0 , A_1 et A_2 .

Approche numérique On peut également analyser les données sur Python. On pourra utiliser la routine `thermometreagaz.py` disponible sur le portail des études.

- Pour plusieurs V_t , on calcule les moyennes des produits $m_i = p_{ij} (V_{ij} + V_t)$.
- On calcule ensuite l'écart total entre les données expérimentales et le modèle :

$$\chi^2 = \sum_i \left\{ \sum_j [m_i - p_{ij} (V_{ij} + V_t)]^2 \right\}$$

Le minimum de la fonction $\chi^2 = f(V_0)$ est la valeur de V_0 qui correspond le mieux au modèle.

- On détermine enfin les $nRT_j = \langle p_{ij} (V_{ij} + V_t) \rangle_i$.

2.1.3 Détermination de la température d'ébullition de l'eau

Avec une bouilloire P101.28, chauffer de l'eau à ébullition.

L'expérience présentée ci-dessous repose sur la mesure de la pression de l'air à volume constant. Comme la correction du Viriel au modèle du gaz parfait est faible, on va considérer ici l'air (sec) comme un gaz parfait. Ainsi on va déterminer la position d'un second point fixe de référence.

REMARQUE : En métrologie, on utilise de l'hydrogène car il se rapproche le plus d'un gaz parfait (le covolume est très faible). Contrairement à l'expérience présentée, la correction du Viriel est prise en compte.

Le principe est représenté en figure 6.2 : un ballon étanche est rempli d'air et est relié à un manomètre. On mesure d'abord la pression du gaz à la température de référence qui est le point de fusion de la glace $T_{\text{fus}} = 273,15 \text{ K}$, puis on mesure la pression du gaz à la température inconnue qui sera ici l'ébullition de l'eau.

Prendre un ballon monocol de 50 mL, le fermer par un bouchon possédant un trou et le relier avec un tuyau (court) à un pressiomètre P96.55 (suspendu par un statif). S'assurer que l'air enfermé est sec et que le tout est étanche. Plonger le ballon dans un bain eau-glace (utiliser un béccher de 500 mL) et relever après thermalisation la pression correspondante. Verser ensuite l'eau bouillante dans un béccher et y plonger le ballon : relever la pression.

REMARQUE : un ballon trop grand induit un très grand temps de réponse car la thermalisation de tout l'air du ballon est longue.

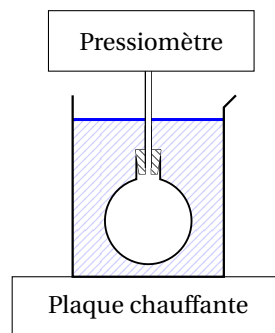


FIGURE 6.2 – Vérification de la loi des gaz parfaits.

On a, à volume et quantité de matière constantes :

$$\frac{T_{\text{eb}}}{T_{\text{fus}}} = \frac{p_{\text{eb}}}{p_{\text{fus}}}$$

D'où :

$$T_{\text{eb}} = T_{\text{fus}} \frac{p_{\text{eb}}}{p_{\text{fus}}}$$

On a alors déterminé, avec ce dispositif simple, la position d'un second point fixe à partir d'une température de référence : c'est la façon dont sont utilisés les thermomètres primaires pour déterminer les températures de changement d'état qui servent de points fixes de référence.

2.2 Le thermomètre acoustique : étude du tube de Kundt

↗ [FLTCLD] 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 réfléchié 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.

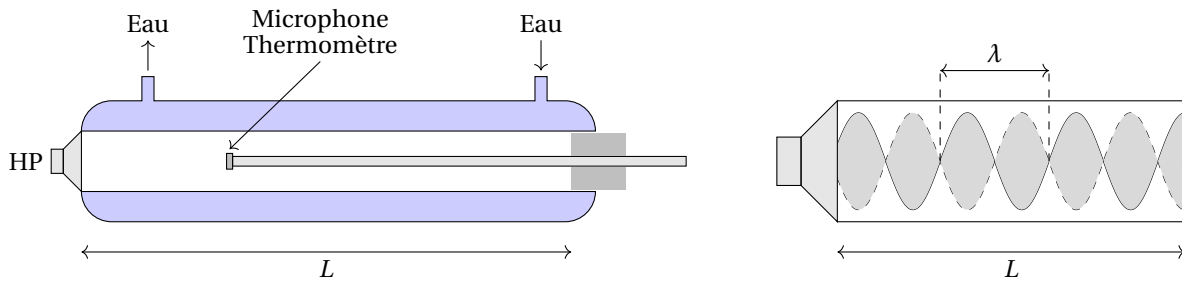


FIGURE 6.3 – À gauche, schéma du tube de Kundt. À droite, onde stationnaire de surpression dans le tube.

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 P0.86, 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. À strictement parler, la propagation des ondes sonores dans un tube de Kundt est un exemple de propagation guidée dans un guide cylindrique. Néanmoins, seul le mode fondamental est à prendre en compte et celui-ci se comporte comme une onde plane progressive harmonique. On pourra lire pour plus de détails [FLTCLD], p.539.

3 Thermomètre à résistance de Platine

☛ [Taillet Dico] p.679, [R2510] pour la théorie

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 bêcher 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.

4 Thermomètre d'usage courant

4.1 Thermocouples

☛ [K730] pour la théorie, [Duffait Élec] p.109 pour les expériences

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).

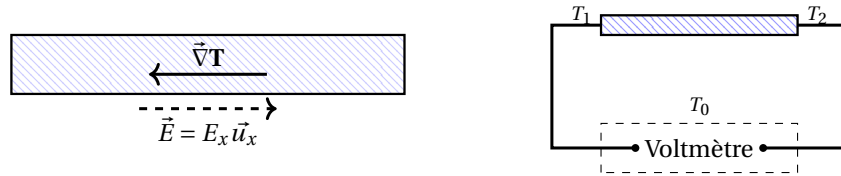


FIGURE 6.4 – À gauche, principe de l'effet Seebeck. À droite, mesure du coefficient Seebeck : la tension mesurée dépend du coefficient Seebeck du matériau mais également de celui des fils qui le relie au voltmètre.

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 bœcher, 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.

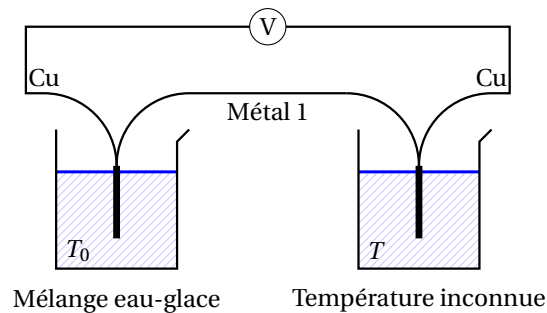


FIGURE 6.5 – Mesure d’une température inconnue T au thermocouple par rapport à une température de référence T_0 .

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.

4.2 Thermistance

↪ [Duffait Élec] p.110

Lorsqu’il n’est pas nécessaire d’avoir une grande précision, on utilise des thermomètres à thermistances qui sont constitués de mélange d’oxydes métalliques et se comportent comme des semi-conducteurs. Expérimentalement, on montre que la relation entre la résistance R et la température T est, dans un domaine limité de température³ :

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

La thermistance est un capteur non-linéaire. Cependant, on définit alors le coefficient de température $\alpha(T)$ qui exprime la variation relative de résistance :

$$\alpha(T) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

3. Des corrections peuvent être apportés à cette formule, voir [Duffait Élec], p.110 par exemple.

Le coefficient $\alpha(T_0)$ est la sensibilité relative du capteur autour de T_0 : on remarque que celle-ci est d'autant plus élevée que la température est basse. Si le coefficient B est positif, alors la résistance décroît avec la température, la thermistance est qualifiée de CTN (coefficient de température négatif). À l'inverse, si B est négatif, la thermistance est qualifiée de CTP.

Pour plus de détails sur la fabrication et la modélisation des thermistances, on pourra se reporter à l'article des techniques de l'ingénieur [E2120].

Afin d'étudier la dépendance de la résistance en fonction de la température, on utilisera un bain d'eau disposé sur un agitateur chauffant. Le thermomètre à résistance de Platine utilisé dans la partie 3 servira de référence.

Remplir d'eau un bœcher, le disposer sur un agitateur chauffant P101.16. Y placer un barreau aimanté, une thermistance (choisir une résistance assez élevée, par exemple une CTN de 470Ω P102.12H), 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 résistance de la thermistance à l'ohmmètre. Tracer R en fonction de T puis $\log R$ en fonction de $1/T$.

Sachant que $R(T) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right)$ alors :

$$\log(R(T)) = \log(R_0) + \frac{B}{T}$$

Remonter aux coefficients R_0 et B . En déduire la sensibilité $\alpha(T)$ (le coefficient de température) de la CTN étudiée et comparer avec les autres capteurs étudiés.

Auto-échauffement Pour étudier l'auto-échauffement, il est préférable de prendre une thermistance de résistance plus basse.

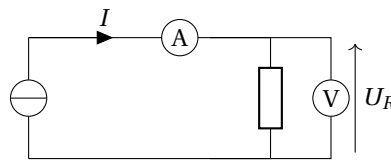


FIGURE 6.6 – Circuit pour l'étude de l'auto-échauffement de la thermistance.

Câbler le circuit 6.6. On utilisera une alimentation continue P53.20 en générateur de courant (limitation de tension réglée au maximum). Placer la thermistance (par exemple une CTP de $1,9 \Omega$ P102.13 ou une CTN de $4,7 \Omega$ P102.12F) dans un bain eau-glace agité par un barreau aimanté. Pour différents courants imposés entre 0 et 500 mA, mesurer la tension correspondante aux bornes de la thermistance. Représenter la résistance de la thermistance $R = U/I$ en fonction de la puissance injectée $P = UI$.

Parcourue par un courant d'intensité I , la thermistance dissipe par effet Joule $P = RI^2$ et il apparait alors une erreur systématique sur la mesure de la température qui est proportionnelle à la puissance injectée.

Dans l'air, les échanges thermiques sont plus lents et moins importants et l'effet d'auto-échauffement est encore accentué.

4.3 Thermomètre à dilatation

On peut étudier des thermomètres à dilatation : on les rencontre couramment du fait de leur faible prix et d'une bonne précision. Ils sont constitués d'un liquide en équilibre avec sa vapeur saturante, qui va se dilater plus ou moins en fonction de la température : des graduations sont ensuite placées pour mesurer le volume du liquide. Il faut les immerger jusqu'à la ligne de colonne émergente pour garantir le résultat.

On peut observer qualitativement la non-linéarité de ce capteur : l'écart entre les graduations (autrement dit, la sensibilité du capteur) n'est pas constant en fonction de la température.

Son temps de réponse est assez long du fait de l'inertie du liquide et surtout de la gaine en verre qui l'entoure.

En passant le thermomètre à dilatation P102.2 d'un bain eau-glace à un bain à une température T connue, chronométrer le temps nécessaire à la température pour atteindre 63% de la valeur finale. Comparer avec le temps obtenus pour d'autres capteurs.

REMARQUE : La sensibilité et la précision des thermomètres à dilatation est bonne par rapport aux autres thermomètres d'usage courant, mais la mesure n'étant pas de nature électrique, ils ne peuvent pas être utilisés dans un circuit électronique.

5 Mesures de températures à distance (en seconde lecture)

☛ [Quaranta II], à « Rayonnement thermique », [BUP 827]

Le rayonnement thermique est le rayonnement électromagnétique émis par un corps à la température T . Le rayonnement peut dépendre de la nature du corps, cependant le rayonnement de tous les corps se réfèrent à celui du corps noir, dont l'énergie rayonnée ne dépend que de la température. La luminance émise (puissance rayonnée par unité de surface entre les longueurs d'onde λ et $\lambda + d\lambda$ est :

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

La puissance totale rayonnée par unité de surface suit alors la loi de Stefan :

$$P = \sigma T^4 = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} T^4$$

Il est ainsi possible d'utiliser le rayonnement émis par un corps quelconque pour mesurer sa température. Ces expériences sont en général délicates : on indique une bibliographie pour réaliser quelques expériences courantes.

- ▷ Le pyromètre à disparition de filament est assez simple à mettre en place. Il vise à mesurer la température d'un filament inconnu en le comparant à une source dont on peut faire varier la puissance rayonnée. Le principe de l'expérience et le protocole sont détaillés dans [Quaranta II], p.390.
- ▷ Il existe dans la collection un pyromètre commercial au P102 . 26.
- ▷ Il existe dans la collection une caméra infrarouge au P102 . 29.
- ▷ On peut comparer le puissance émise par une petite ampoule en fonction de la température du filament. Si on applique à l'ampoule une tension U et qu'elle est parcourue par une intensité I , on peut calculer sa résistance $R = U/I$. On remonte à la température du filament en connaissant la courbe $R(T)$. L'expérience est détaillée dans [BUP 827].