

MP 05 : Mesure de température

Elio Thellier & Dihya Sadi

Session 2021

Introduction

Mesure de température primordiale : la plupart des grandeurs physiques dépendent de la température, quand on étudie un système il est donc primordial de connaître la température pour comparer à des valeurs tabulées. Cependamment affecter une valeur numérique à une température pose un pb de fond : c'est une grandeur intensive. Il faut donc mettre en place une échelle de température universelle.

Définition théorique de la température thermodynamique :

$$T = \frac{\partial U}{\partial S_X}$$

1 Thermomètre primaire : thermomètre à gaz de SF6

On mesure des températures absolues à l'aide de thermomètre à gaz. Le principe est le suivant : la température thermodynamique qu'on vient de définir peut être identifiée à la température cinétique d'un gaz parfait qui, associée à la pression cinétique, permet de montrer l'équation des GP (cf ma LP associée). Ainsi on peut considérer que la température absolue intervient dans l'équation des gaz parfaits. Or on peut montrer que tous les gaz ont un comportement qui se rapproche de celui du gaz parfait aux faibles pressions.

Un corps quelconque et un GP en équilibre thermique ont la même température (résulte des principes fondamentaux de la thermo qu'on va voir bientôt). La mesure de la pression et du volume du GP permet de déterminer une grandeur caractéristique de la température avec la loi des GP.

La température absolue T d'un corps est définie à partir de son équilibre thermique avec un GP quelconque de pression P et volume molaire V_m :

$$T = \frac{V_m P}{R}$$

Pour le schéma : principe d'un thermomètre à gaz dans le Hprépa de thermo

Matériel

- SF₆
- Thermocouple type K
- Bain thermostaté

Expliquer en direct que le dispositif est constitué de :

- Une chambre qui contient le fluide à étudier, ici l'hexafluorure de soufre, et porte des graduations qui permettent d'en mesurer le volume
- Du mercure, qui assure l'étanchéité de la chambre et permet d'en faire varier le volume et la pression à l'aide d'un volant
- Un manomètre permettant de mesurer la pression dans la chambre
- Une colonne dans laquelle circule de l'eau pour contrôler la température
- Un bain thermostaté pour assurer la circulation d'eau à une certaine température

Protocole

- On fait varier le volume à T fixé et on relève P. On peut ainsi tracer $PV = f(1/V)$ pour la température choisie.
- On trace le faisceau de courbes PV en fonction de $1/V$, d'après un développement du Viriel au premier ordre, l'ordonnée à l'origine nous donne $nRT = PV_0$
- On trace ainsi PV_0 en fonction de T, la pente est nR, on déduit nR
- Maintenant le thermomètre est fonctionnel. On vérifie en comparant
- Sensibilité : pente de la quantité à laquelle on a accès (donc PV) en fonction de la température. Plus la pente est élevée, plus le thermomètre est sensible, ie plus on pourra différentier facilement des températures proches. La sensibilité du système est donc nR. Rq : plus la quantité de matière est grande, plus le thermomètre est sensible.

Astuces importantes

- Augmenter puis diminuer P pour minimiser la courbure du ménisque : hystérèse mécanique à cause de la dissipation visqueuse du mercure sur les parois, de la tension superficielle, et des frottements méca
- Attendre un peu l'établissement de l'équilibre diphasique : augmentation puis diminution de P car au début c'est du gaz

- Partir plutôt des températures faibles
- Pour ce montage : on ne veut pas voir apparaître de liquide donc on diminue pas trop le volume

Remarque : en faisant simplement les rapports des pentes à l'origine, on s'affranchit de la connaissance de n . Il suffit donc d'avoir une valeur de référence. Qu'est ce qu'on choisit comme référence ?

2 Point triple de l'azote

La norme EIT 90 est une norme d'étalonnage des matériels destinés à la mesure de température. Elle énonce les points/plages fixes de référence. *Typiquement un point triple est idéal comme référence de température car il existe à une pression unique et une température unique. On va s'intéresser ici à celui de l'azote ! Et on va l'utiliser pour étalonner un thermocouple de type T*

Matériel

- Grosse pompe qui tire fort !!! A monter proche d'une fenêtre pour mettre le tuyau dehors
- Vase Dewar transparent pour point triple de l'azote
- Manomètre intégré
- Azote liquide
- Lecteur thermocouple de type T (adapté aux OG de températures attendues)

Protocole

- Remplir le compartiment aux 3/4 d'azote liquide. En théorie ça boue déjà
- Refermer de manière bien hermétique. Ça devrait arrêter de bouillir au bout d'un moment
- Allumer la pompe. On voit la pression mesurée à l'aide du manomètre diminuer. Bien observer ce qu'il se passe dans le compartiment : aux alentours de 125 mbars on devrait voir commencer à se former du solide. Quand on en est là on reste un petit moment à pression et température constante. On est alors au point triple (variance nulle) on relève alors les valeurs de températures et de pression.
- Comment estimer les incertitudes ? On peut faire un traitement statistique mais on obtient toujours les mêmes valeurs... La mesure est donc présente mais pas juste. Il y a donc une erreur systématique dans notre protocole ! Discuter ?
Pour estimer les incertitudes : propagation à partir des incertitudes sur le manomètre et le thermomètre, ou bien Monte Carlo, à voir

- Interprétation et exploitation :

Là j'aimerais bien si possible faire un truc du genre, utiliser ça pour étalonner un thermocouple ensuite ? A ce moment là il faut mesurer U plutôt.

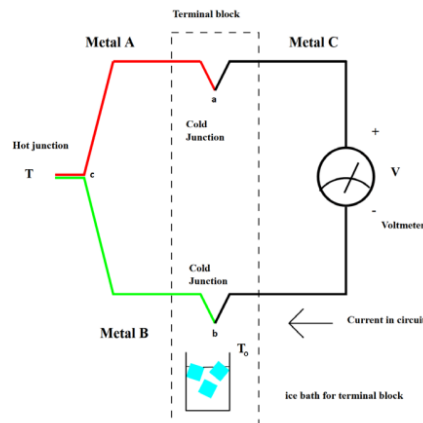
3 Comparaison du fonctionnement de différents thermomètres secondaires

Un thermomètre secondaire exploite la variation d'une de leur propriétés physiques à partir de la température, que l'on va chercher à modéliser de manière empirique et utiliser pour étalonner le capteur.

Fonctionnement des thermocouples

Fonctionnement d'un thermocouple

- Fonctionnement d'un thermocouple : en 1821, Seebeck observe l'existence d'une FEM à la jonction par deux métaux différents soumis à une différence de température. L'effet Seebeck est en fait la combinaison des effets Thomson et Peltier : existence d'une fem due au contact de deux matériaux différents à une température donnée, et existence d'une fem due à un gradient de température le long d'un conducteur. En théorie : l'une des jonctions est maintenue à température constante à l'intérieur du thermocouple (on ne sait pas trop comment, un asservissement ?) que l'on fixe en étalonnant le thermocouple avec en général le 0 degré de l'eau glacée. L'autre jonction est au bout de la tige et est plongée dans ce qu'on cherche à mesurer.



On peut extraire la température T inconnue en utilisant une formule pas fun que je peux chercher sur internet si j'ai envie... Tout ce qui compte c'est que la ddp est proportionnelle à la différence de température, et c'est ce qu'on va utiliser pour notre étalonnage.

Rq : en vérité la deuxième jonction est maintenue fixée par un autre dispositif : elle est simplement à température ambiante, et à l'intérieur du thermocouple il y a une PT100 qui mesure la température ambiante, et un asservissement qui permet donc de corriger tout cela. Un peu bizarre, à voir.

- Thermomètre à résistance de platine

Explication thermomètre à résistance de platine

Basé sur le fait que la résistance électrique des conducteurs type platine varie avec la température. Le modèle PT100 que l'on utilise indique simplement que la résistance est de 100 Ohms à 0 degrés. Modèle : linéarisation. En fait on peut ajuster plus précisément (formule de Callendar et Van Dusen). Rq : on peut aussi les utiliser. Rq : on limite au max l'auto-échauffement par passage d'un courant donc très faibles courants.

- Thermistance CTN : non linéaire et précis. Les CTN sont des thermistances dont la résistance diminue de façon relativement uniforme quand la température augmente et vice versa. Fabriqué à base d'oxydes de métaux de transition qui sont semi-conducteurs. Différence avec les thermistances type thermistance de platine ? La variation de la résistance est beaucoup plus importante, non linéaire, irrégulière ou soudaine, dans un étroit domaine de température.

	Temps de réponse	Sensibilité relative	Précision	Domaine d'utilisation
Thermistance CTN	1 s à 1 min	$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \approx 10^3 \text{ K}^{-1}$	$\Delta t \approx 1 \text{ }^\circ\text{C}$	- 100 à + 400 °C
Sonde à résistance de platine	5 à 50 s	$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \approx 4 \cdot 10^3 \text{ K}^{-1}$	Δt (au mieux) = $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ couramment : $\Delta t \approx 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$	- 200 à + 1000 °C
Thermocouple	0,5 s à 1 min	$\frac{1}{e} \cdot \frac{de}{dT} \approx 0,5 \cdot 10^3 \text{ K}^{-1}$	Δt (au mieux) = $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ couramment : $\Delta t \approx 1 \text{ }^\circ\text{C}$	- 270 °C à + 2720 °C

Matériel

- Bain thermostaté
- 3 multimètres de précision
- 2 boîtiers montage 4 fils
- Thermocouple type J
- Thermistance CTN
- Résistance de platine
- Résistance de platine PT 100 pour la référence (avec lecture de température)

Protocole

- Lancer le bain thermostaté
- Brancher le voltmètre sur le thermocouple, la PT100 et la CTN en Ohmmètre 4 fils (résistance de la CTN varie entre 1 et 8 kOhm et PT100 100 Ohm pour pour ce dernier la résistance des fils + jonction n'est pas négligeable d'où la nécessité du montage 4 fils). Pour cela utiliser les multimètres de précision Keysight et suivre à la lettre les indications du boîtier pour les branchements.
- Tous les quelques degrés mesurer la résistance de la PT100 et de la CTN ainsi que la tension aux bornes de la PT100. On attends pour la CTN des résistances de l'ordre du 10 $k\Omega$, pour le platine plutôt 110 Ω et pour le thermocouple des tensions de l'ordre du volt.
- Tracer les lois de la température en fonction du paramètre physique mesuré :
 - Pour la thermistance de platine : $R_{Pt} = R_0 + \alpha T$
 - Pour la thermistance CTN $R_{CTN} = R_0 \exp \frac{E_g}{k_B T}$
 - Thermocouple de type K : $U_K(T) = U_0 + \mu_K T$
- On détermine la sensibilité de chacun des capteurs avec la pente de la droite tracée
- On détermine l'incertitude sur une mesure unique, on peut l'estimer finalement comme étant l'ordonnée à l'origine pour 0 Kelvin.
- On détermine la résolution avec l'incertitude
- On compare tout le monde !!!

Remarque : On a des écarts entre la préparation et la mesure en direct : il y a un hystérésis. Les mesures statiques (ie à température ambiante devant le jury) ne se superposent pas à l'ajustement de courbe. Faire l'expérience en refroidissant diminuerait l'hystérésis car on se rapprocherait d'une transformation quasi-statique.

4 Mesure de température par thermopile

Quand on a un rayonnement à très haute température et à grande distance la seule chose qu'on peut utiliser sont les thermopiles !!!

Matériel

- Cube de Leslie
- Thermopile avec deux fils
- Multimètre de précision

[BIBLIO]

Manip : mesure du rayonnement thermique d'un cube de Leslie

Notice du cube de Leslie

Notice de la pile thermoélectrique

Résumé du principe

On a un cube, appelé cube de Leslie, qui est chauffé de l'intérieur par une lampe blanche. Les faces du cube sont recouvertes de matériau différents.

Le rayonnement émis par les faces est recueilli par une thermopile dont le principe est le suivant. Elle convertit la puissance reçue en tension.

Elle est composée de 17 thermocouples connectés en parallèle ou en série, reliés à une surface noire. Le rayonnement thermique incident produit sur les thermocouples une tension thermique U proportionnelle à l'intensité du rayonnement thermique. Génère une tension de sortie proportionnelle à un gradient de température.

Le coefficient permettant le passage de la tension à la puissance est donné dans la doc de la thermopile. Elle est de diamètre 15mm. En considérant que on vérifie la loi de Stefan pour un corps gris $\phi = \epsilon \sigma T^4$ où ϵ est l'émissivité du corps.

Protocole

- On chauffe le cube de Leslie à 40 degrés par exemple. Attendre quelques minutes la thermalisation. On vérifie rapidement que la tension donnée par la thermopile est relativement constante en moyenne (même si elle fluctue à cause des phases de chauffage/refroidissement lors de l'asservissement en température du cube)
- Mesurer alors la tension donnée par la thermopile pour chacune des faces.
- Refaire la même chose pour différentes températures.
- Pour chaque face la mesure de tension à 40 degrés sert de référence. On mesure pour les autres températures les écarts en puissance par rapport à cette mesure là : on trace pour chaque face $P_i - P_i(40C) = f(T^4 - T_0^4)$
-

5 Compléments sur les mesures de température

Norme EIT = norme d'étalonnage des matériels destinés à la mesure de la températures. Enonce les ponts de référence qui sont : points triples, points de solidification, relations de pression de vapeur saturante/température chez des isotopes de l'hélium. Ces points sont mesurés à l'aide d'un thermomètre à gaz de dihydrogène.

En fonction de la gamme de température on utilisera le thermomètre approprié, calibré avec des points fixe dans son domaine d'application :

- De 0.65K à 24.56K : gaz d'hélium
- De 13.8033K à 1234.93 : thermomètre à résistance de platine
- Au dessus : loi d'émission de Planck