

# Montage 5 :

# Mesure de température

## Plan

### 1. Notion d'échelle thermométrique

- 1.1. Equilibre thermique et échelles empiriques
- 1.2. Température absolue et échelle légale : le thermomètre à gaz de SF<sub>6</sub> ( Hexafluorure de soufre)
- 1.3. Echelle thermométrique EIT90

### 2. Thermométrie pratique

- 2.1. Thermocouple (-270°C à 2 720°C)
- 2.2. Thermistance ?
- 2.3. Thermomètre optique ?

## Introduction

De toutes les grandeurs physiques, la température est certainement l'une de celles dont la mesure est la plus fréquente. Cependant, affecter une valeur numérique à une température pose un problème de fond: contrairement à de nombreuses autres grandeurs physiques mesurables c'est une grandeur intensive, il est donc difficile mais indispensable de mettre en place une échelle de température universelle.

Historiquement la première échelle de température fut inventée via le vocabulaire qui permet d'exprimer un niveau de chaleur (froid, tiède, chaud,...). Cependant cette méthode manquait de sensibilité et de fidélité.

Pour pouvoir repérer la température correctement il faut :

- Que le système soit à l'équilibre avec l'instrument de repérage, d'où l'intérêt du principe zéro de la thermodynamique.
- Que l'on puisse mesurer une grandeur physique thermométrique (qui varie toujours dans le même sens que la température). Un système muni d'une grandeur thermométrique mesurable est un thermomètre.

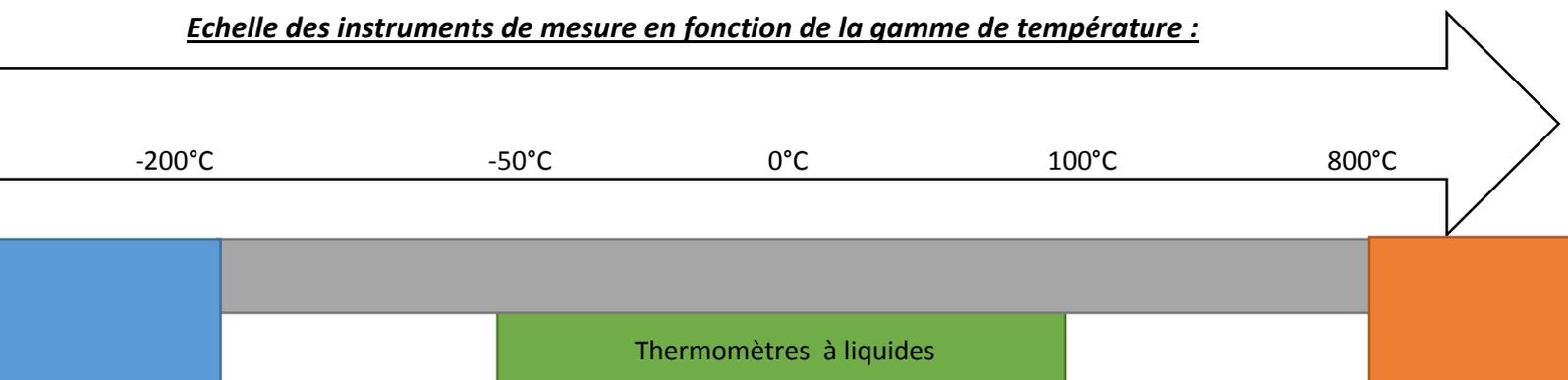
Les premiers thermoscopes (qui permettaient de mettre en évidence des changements de température) furent inventés en Grèce au III<sup>ème</sup> siècle avant JC (par Philon de Byzance).

Galilée fut le premier physicien à inventer en 1597 en Italie un thermoscope à graduation (que l'on devrait donc appeler thermomètre même si il était peu précis et que la gamme de température mesurable était étroite).

➤ **Expérience 0** : Thermomètre de Galilée

Son principe repose sur la poussée d'Archimède et le changement de masse volumique des liquides en fonction de la température. Il est enfin possible de définir une échelle de température (pour notre thermètre nous avons une précision de 2°C et l'échelle s'étend seulement de 18°C à 24°C).

**Echelle des instruments de mesure en fonction de la gamme de température :**



NB : Thermomètre magnétique repose sur la mesure de la susceptibilité magnétique qui suit une loi de Curie-Weiss (différentes gammes de températures : une où le moment magnétique électronique est dominant et un autre où le moment magnétique nucléaire l'est).

# 1. Notion d'échelle thermométrique

## 1. Equilibre thermique et échelles empiriques

Le premier thermomètre appelé en tant que tel fut le thermomètre à alcool inventé en 1654 en Italie par le Grand-Duc de Toscane. A l'époque il était étalonné de manière arbitraire, mais en théorie il permet de mesurer des températures allant de  $-130^{\circ}\text{C}$  à  $78^{\circ}\text{C}$ .

- **Expérience 1** : Etude du thermomètre à alcool dont le principe repose sur la dilatation thermique de l'ensemble verre + alcool qui est supposé linéaire sur la gamme de température étudiée :

$$V(\theta) = V_0(1 + \alpha\theta) \Leftrightarrow L(\theta) = \frac{V(\theta)}{S_{moy}(\theta)} = \frac{V_0}{S_{0moy}} \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \beta\theta}$$

Avec : -  $V(\theta)$  le volume de pentanol

-  $h(\theta)$  la hauteur de la colonne de liquide : c'est la grandeur thermométrique du système

-  $\theta$  la température du système

-  $\alpha \approx 500 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  le coefficient de dilatation du pentanol

-  $\beta \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  le coefficient de dilatation du verre

D'où après un développement limité :

$$h(\theta) \approx \frac{V_0}{S_{0moy}} (1 + \alpha\theta)(1 - \beta\theta + o(\beta\theta)) \approx h_0(1 + (\alpha - \beta)\theta)$$

Avec :  $-h_0 = \frac{V_0}{S_{0moy}}$

Grâce à cette grandeur thermométrique on crée un thermomètre que l'on étalonne en se plaçant au point de fusion de l'eau ( $h(\theta = 0^{\circ}\text{C}) = h_0$ ) et au point d'ébullition de l'eau ( $h(\theta = 100^{\circ}\text{C}) = h_{100}$ ). On vérifie la température à l'aide d'un thermomètre à sonde de platine. Pour ces deux températures on trace un trait indiquant le niveau de liquide correspondant aux températures de référence. On peut alors créer l'échelle centésimale :

$$h(\theta) = h_0 + \frac{h_{100}}{100} \theta \Leftrightarrow \theta = 100 \frac{h(\theta) - h_0}{h_{100}}$$

La variation de hauteur correspondant à  $1^{\circ}\text{C}$  vaut  $\frac{h_{100}}{100}$ , on peut alors en déduire une incertitude sur nos mesures de température.

**Remarque** : L'échelle de température créée a l'inconvénient de dépendre de la pression atmosphérique (d'où l'intérêt de reboucher le verre à l'extrémité supérieure).

## 2. Température absolue et échelle légale : le thermomètre à gaz de SF6 ( Hexafluorure de soufre)

**Définition théorique de la température thermodynamique :**  $T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_X$ , avec T la température absolue et X les autres paramètres extensifs maintenus constants.

**Expérimentalement :** La température thermodynamique (précédemment définie) peut être identifiée à la température cinétique d'un gaz parfait ( $T = \frac{m\langle v^2 \rangle}{3k_b}$ ) qui associée à la pression cinétique ( $P = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m \langle v^2 \rangle$ ) permet de montrer l'équation des gaz parfait  $PV = nRT$ .

La température présente dans la formule des gaz parfait correspond donc à la température absolue. On définit le Kelvin comme étant à la température d'un gaz parfait en équilibre avec de l'eau à son point triple divisé par 273,16 (la valeur de la constante des gaz parfait a été choisie en fonction de la définition du kelvin).

En utilisant le développement de Viriel de l'équation des gaz parfaits on a :

$$PV = nRT \left(1 + \frac{B(T)}{V} + \dots\right)$$

En mesurant P et V pour un système et en traçant le produit  $PV$  en fonction de  $\frac{1}{V}$  on obtient une droite affine dont l'extrapolation à l'origine vaut  $nRT$ , on peut donc en déduire soit la quantité de matière présente dans notre enceinte ou la température de notre système.

C'est à l'aide des thermomètres à gaz qu'il est possible de mesurer les températures absolues, la grandeur thermométrique étant parfaitement connue ces thermomètres sont dit primaires. En particulier le thermomètre à gaz de dihydrogène est le thermomètre à gaz utilisé pour mesurer les points fixes avec une incertitude de l'ordre du millikelvin (cependant la mesure est extrêmement complexe). Dans notre cas nous allons nous intéresser au thermomètre à gaz de SF6

➤ **Expérience 2 :** Le thermomètre à gaz de SF6 est composé d'une chambre de compression fermé dans laquelle est placée une certaine quantité de gaz de SF6. Un volant permet de diminuer le volume de notre chambre. Le volume de gaz se mesure à l'aide des graduations et la pression à l'aide d'un manomètre.

-Incertitudes mesure de volume  $\pm 0.025 \text{ cm}^3$

-incertitudes mesure de pression  $\pm 0.2 \cdot 10^5 \text{ hPa}$

Autour de l'enceinte de SF6 circule de l'eau thermostatée.

On trace les isothermes dans le plan  $\left(PV, \frac{1}{V}\right)$  pour  $V \in [0.9 \text{ cm}^3; 4 \text{ cm}^3]$ .

Puis on extrapole l'isotherme pour  $V \rightarrow 0$ .

⇒ Mesure 1 à  $T_1 = 98^\circ\text{C}$  (température au niveau du gaz de SF<sub>6</sub>, T=100°C dans le bain thermostaté). Ajustement déjà effectué précédemment :  $PV = a_1 + b_1T = nRT(1 + \frac{B(T)}{V})$ . On  $a_1 = 6.57 \pm 0.03 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$  et  $b_1 = -1.93 \cdot 10^{-6} \pm 0.08 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^6$

$$\text{D'où } n = \frac{a_1}{RT} \text{ et } \Delta n = \frac{1}{R} \sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{a_1 \Delta T}{T_1^2}\right)^2}$$

$$\text{AN: } n = 2.13 \cdot 10^{-3} \pm 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

⇒ Mesure 2 à  $T_2 = 40.9^\circ\text{C}$  (bain thermostaté (+5 ;50 ;50)) . On refait une mesure pour deux volumes différents et on vérifie que l'on est dans les barres d'erreur des mesures effectuées précédemment.  $a_2 = 5.47 \pm 0.04 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$  et  $b_2 = -2.51 \cdot 10^{-6} \pm 0.06 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^6$

De la même manière que précédemment grâce à l'ajustement on a :

$$T = \frac{a_2}{nR} \text{ et } \Delta T = \frac{1}{R} \sqrt{\left(\frac{\Delta a_2}{n}\right)^2 + \left(\frac{a_2 \Delta n}{n^2}\right)^2}$$

$$\text{AN: } T_{exp} = 37 \pm 2^\circ\text{C}$$

On remarque que cette méthode de mesure de température est complexe et de plus avec l'équipement dont nous disposons les mesures bien qu'absolue ne sont pas précises.

Au cours des deux dernières expériences nous avons utilisé le thermomètre à sonde de Platine en tant que thermomètre de comparaison. Nous allons maintenant montrer que pour cette gamme de température c'est le thermomètre de référence.

### 3. Echelle thermométrique EIT 90

La norme EIT est une norme d'étalonnage des matériels destinés à la mesure de la température. Cette norme énonce les points/plages fixes de références qui sont généralement :

- Des relations Pression de vapeur saturante/Température (par équation) chez des isotopes de l'hélium.
- Des points triples de certains composés dont l'eau par exemple
- Des points de solidification de certains métaux tels que l'étain, l'aluminium, le cuivre...

Ces points sont généralement mesurés à l'aide d'un thermomètre à gaz de dihydrogène dont l'utilisation est complexe, c'est pour cette raison que l'on préfère utiliser des thermomètres d'interpolation qui ne font que repérer une température mais qui sont simple d'utilisation. En fonction de la gamme de température on utilisera le thermomètre approprié que l'on calibrera avec des points fixes dans son domaine d'application :

- De 0.65K à 24.56K on peut utiliser un gaz d'hélium
- De 13,8033 K et 1 234,93 K on peut utiliser un thermomètre à résistance de platine
- Au-dessus de 1 234,93 K on utilise les points de référence et de la loi d'émission de Planck

Nos mesures étant faites à température ambiante, il était donc cohérent d'utiliser le thermomètre à résistance de platine.

## **2. Thermométrie pratique**

On ne peut pas systématiquement tracer les isothermes d'un gaz pour mesurer la température d'un objet, tout simplement pour des raisons de praticité.

Il existe donc d'autres types de thermomètres qui donnent de bons résultats à condition d'avoir été étalonnés par rapport à l'échelle légale.

### **1. Thermocouple (-270°C à 2 720°C) Chromel/Alumel**

En 1821, Seebeck observe l'existence d'une force électromotrice (fem) à la jonction formée par deux métaux différents soumis à une différence de température.

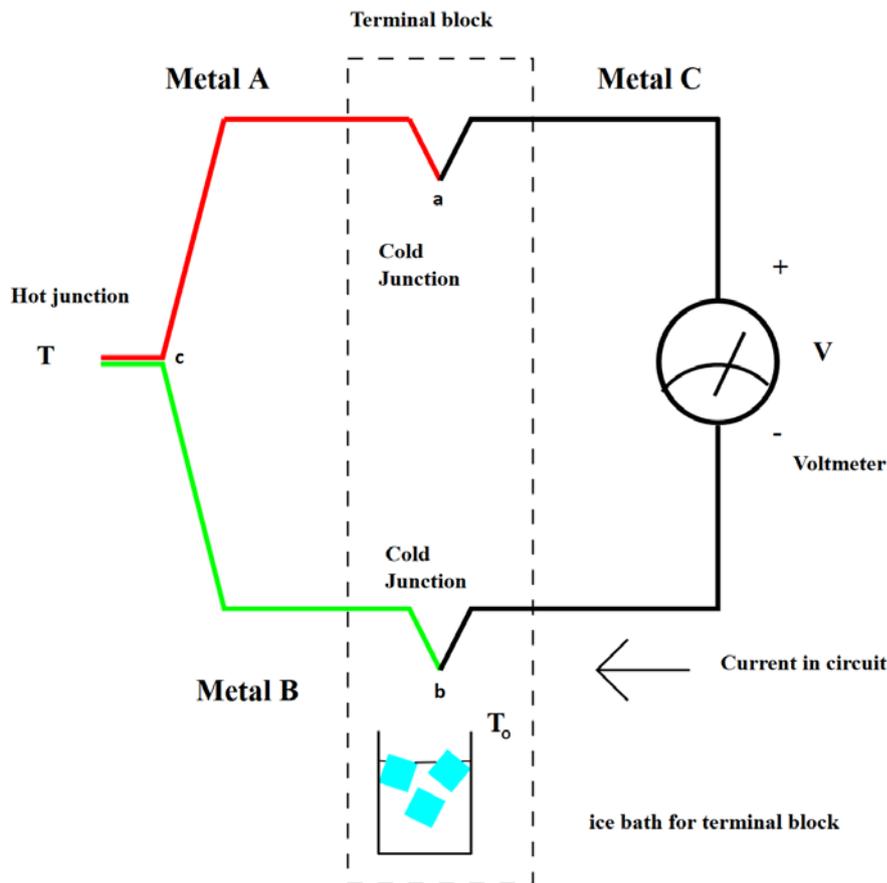
L'effet Seebeck est la combinaison des effets Thomson et Peltier :

*Effet Thomson* : existence d'une fem due au contact de deux matériaux différents à une température donnée.

*Effet Peltier* : existence d'une fem due à un gradient de température le long d'un conducteur.

Ici les alliages utilisés sont le Chromel (90% nickel, 10% chrome) et l'Alumel (90% nickel, 2% aluminium, 2% manganèse, 1% silicium).

Structure d'un thermocouple différentiel:



Un thermocouple est constitué de fils de deux alliages (ou métaux) différents présentant un grand pouvoir thermoélectrique, réunis à leurs extrémités.

L'une des soudures est plongée dans un bain de température connue : les tables  $T=f(\text{ddp})$  utilisent généralement comme référence  $0^\circ\text{C}$  (bain de glace).

On peut extraire la température  $T$  inconnue par la formule :

$$\Delta V = V_b - V_a = \int_{T_0}^T S_B \cdot dT - \int_{T_0}^T S_A \cdot dT \approx (S_B - S_A)(T - T_0) = S_{AB}(T - T_0)$$

Le coefficient de Seebeck s'exprime en  $V \cdot K^{-1}$ , William Thomson a montré que le coefficient Seebeck est lié aux coefficients Peltier et Thomson selon :

$$\begin{aligned} \Pi_{AB} &= S_{AB}T \\ \tau_A &= T \frac{dS_A}{dT} \text{ et } \tau_B = T \frac{dS_B}{dT} \end{aligned}$$

Où  $\Pi_{AB}$  est le coefficient Peltier du Couple,  $T$  la température de la jonction et  $\tau_A$  et  $\tau_B$  les coefficients Thomson des deux matériaux.

➤ **Expérience 4 :**

⇒ Mesure 1 : Relevé de la différence de tension pour différentes températures (On effectue les mesures à l'aide d'un voltmètre précis et on relève la température à

l'aide d'un thermomètre à résistance de platine = référence). On obtient une caractéristique que l'on peut comparer à la caractéristique du constructeur.  
 ⇒ Mesure 2 : Mesure de la différence de tension pour un bain d'eau à température ambiante. Vérification de la température obtenue avec la caractéristique donnée par le constructeur et celle tracé précédemment.  
 ⇒ Mesure 3 : Un thermocouple a un temps de réponse rapide dans la gamme de température que nous étudions. Il est possible de la mesurer à l'oscilloscope -> à comparer avec le temps de réponse de la sonde de Pt par exemple.

## 2. Thermomètre optique

Utiliser le rayonnement du corps noir.

La **loi de Planck** nous donne la luminance monochromatique  $L_\lambda^0$  pour une longueur d'onde donnée :  $L_\lambda^0 = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$  en  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot m^{-1}$

La **loi de Wien** nous donne le maximum du spectre d'émission du corps noir à une température donnée :  $\lambda_{max} = \frac{hc}{4.965 \cdot k_B T} \Leftrightarrow T = \frac{hc}{4.965 \cdot k_B \lambda_{max}}$

La **loi de Stefan-Boltzmann** nous donne la densité de flux d'énergie (ou émittance énergétique  $M^0(T)$  en  $W \cdot m^{-2}$  ou quantité analogue) émise par le corps noir en fonction de la température absolue :  $M^0(T) = \sigma T^4$  où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut  $5.67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$ .

### ➤ **Expérience 5 :**

Utilisation du spectroscope USB avantes avec l'interface sur ordinateur avasoft.  
 Relever le spectre du soleil et mesurer ensuite la position du maximum d'intensité.  
 On mesure  $\lambda = 505nm \pm 50nm$ .  
 En utilisant la relation de Wien on peut remonter à la température du soleil en utilisant la formule suivante :

$$T = \frac{hc}{4.965 \cdot k_B \lambda_{max}}$$

**AN :**  $T = 5\,742 \pm 100\,K$

NB : Il aurait été intéressant d'utiliser cette méthode pour mesurer la température d'une lampe à filament en fonction de la température (lié à sa tension d'alimentation) cependant notre capteur saturait trop vite et il a été impossible d'effectuer ces mesures

Autre expérience possible : utilisation prisme ou réseau pour obtenir le spectre du rayonnement de notre corps noir et ensuite chercher le maximum de ce spectre en déplaçant un capteur CCD. Via la loi de Wien on remonte à la température.

### 3. Thermistance (facultatif)

Possibilité de remonter au gap ...

## Bilan

Comparaison des différentes caractéristiques des thermomètre.

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

## Questions :

- Est-il possible de faire des mesures avec le thermomètre de Galilée ?
- A quoi correspondent les traits sur la colonne du thermomètre à alcool ? Possibilité de mesurer la température ambiante avec ce dispositif ? Pourquoi y a-t-il un bouchon en haut de la colonne d'alcool ? (réponse : pour rester à pression constante).
- Pourquoi la hauteur de la colonne d'alcool évolue-t-elle de manière linéaire avec la température ? (cf expliqué précédemment dans le compte rendu).
- Comment fonctionne le thermomètre de platine ? Pourquoi R augmente quand T augmente (explication microscopique) ?
- Pour  $PV = f\left(\frac{1}{V}\right)$  a-t-on vraiment des droites pour  $\frac{1}{V}$  grand ? (terme quadratique quand  $\frac{1}{V}$  devient grand, lié au développement de Viriel).
- D'où viennent les incertitudes ? (cf formule générale présentée dans le compte rendu. En vrai quand on a des formules linéaires il faut utiliser les incertitudes relatives  $\frac{\Delta X(a_i)}{X} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\Delta a_i}{a_i}\right)^2}$ ).
- Incertitudes sur le voltmètre, d'où elles viennent ? (En réalité il faut lire la doc et utiliser les incertitudes données en fonction du calibre choisi).
- Quel phénomène physique explique le temps de réponse du thermocouple ?
- Comment fonctionne le spectromètre ? (réseau de diffraction avec fente qui sélectionne les longueurs d'onde).
- Quelle est la durée nécessaire pour que l'eau présente dans notre bécher (initialement à la température de l'eau du robinet) atteigne la température de la pièce ? (utiliser  $mc dT = -hS(T - T_{ext})dt$ )

## Commentaires :

- On a sous-estimé beaucoup d'incertitudes. Pour les mesures de température il faut bouger la sonde du thermomètre dans le bain pour estimer l'incertitude liée à la non homogénéité de la température. Dans une mesure on a surestimé l'incertitude et c'est également déconseillé (le jury ne veut pas qu'on fasse des grandes barres d'incertitude pour que notre valeur expérimentale rentre bien dedans, il faut discuter des écarts).
- Il faut absolument un bain vraiment à 0°C (bain d'eau glacée dans lequel on plonge un bécher rempli d'eau glacée et agitation avec un barreau aimanté) et un autre vraiment à 100°C (bécher d'eau en ébullition sur une plaque chauffante, la convection suffit pour homogénéiser la température).
- Thermomètre de Galilée et thermomètre à alcool un peu trop qualitatifs.
- Le coefficient de dilatation volumique est constant uniquement sur une certaine gamme de température.
- Autre manipulation : le thermomètre à dilatation de gaz, on mesure la pression dans le ballon en fonction de la température, puis  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$ .
- Parler davantage de l'EIT 90.
- Possibilité de mesurer le point triple de l'eau.



2) Température absolue: le thermomètre à gaz de SF<sub>6</sub>

MO5: mesure

$$\begin{array}{|l} m_0, T_0 \\ \hline P, V \\ \hline T \end{array}$$

•  $T_{\text{abs}} = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_x$  et  $T_{\text{abs}} = T_{\text{cin}}$  d'un gaz

•  $PV = nRT \left(1 + \frac{\beta}{V} + \dots\right)$

Expérience: mesure de  $P$  et  $V$  à  $T$  fixe

$PV = f\left(\frac{1}{V}\right)$  et extrapolation  $V \rightarrow \infty$

\* à  $T = 98 \pm 1^\circ\text{C}$ :  $m_0 = \frac{a}{RT}$     A.N.:  $m_0 = 2,13 \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$

\* à  $T_{\text{Pt}} = 40,4 \pm 0,1^\circ\text{C}$ :  $T_{\text{exp}} = \frac{a'}{R m_0}$     A.N.:  $T_{\text{exp}} = \dots \pm 0,1^\circ\text{C}$

$a' =$

de température

3) Echelle internationale de température (EIT 90)

Norme d'étalonnage:

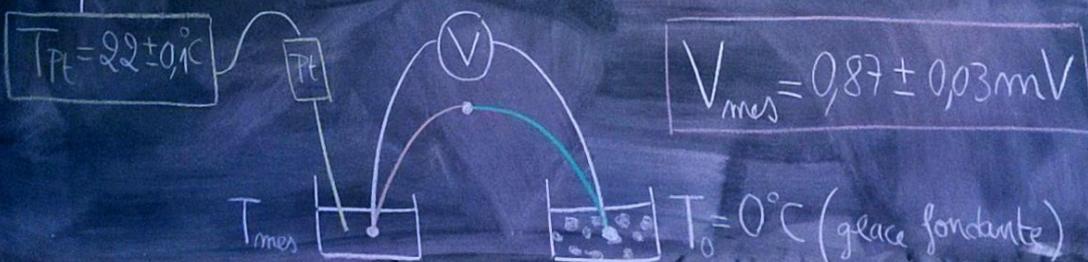
Points fixes de référence  $\rightarrow$  thermomètres de référence (en fonction des gammes de  $T$ )

II) Thermométrie pratique

1) Thermocouple

Principe: effet Seebeck (= effet Volta + effet Thompson)

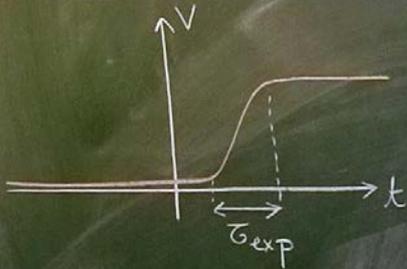
Expérience: ① mesure de la tension  $V$  en fonction de  $T$



$$\text{Or } T_{\text{mes}} = \frac{V_{\text{mes}} - a}{b} \quad \text{car } V = a + bT$$

$$\text{A.N.: } T_{\text{mes}} = 23,4 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

② mesure du temps de réponse du capteur:



$$t_{\text{exp}} = 434 \text{ ms}$$

2) Thermomètre optique

$$\text{Loi de Wien: } T = \frac{hc}{4,965 k_B \lambda_{\text{max}}}$$

$$\lambda_{\text{max}} = 503 \pm 10 \text{ nm}$$

$$\Rightarrow T = 5771 \pm 100 \text{ K}$$

