

MP4: Échelle et mesures de température.

par David & Sergueï!

2012-2013

Rapports de Jury

- 2012, 2011** Ce montage est trop souvent réduit à un catalogue de capteurs thermométriques sans hiérarchie : la notion de points fixes est trop souvent inexploitée, ou mal exploitée. En 2013, il devient *Échelle et mesures de températures*¹. Lors de l'utilisation de thermocouples, il faut connaître le principe, la température de référence, et le domaine de validité.
- 2010** Comme recommandé dans les précédents rapports, les candidats utilisent en général à bon escient les échelles secondaires de température (résistance de platine). Les mécanismes physiques mis en jeux dans les différents capteurs utilisés doivent être connus. La notion de point fixe est essentielle pour l'établissement d'une échelle thermométrique. Il est important de faire la différence entre mesure et repérage de température.
- 2009** On attend dans ce montage des manipulations plus pertinentes que l'étalonnage d'une résistance de platine par un thermomètre à mercure. La notion de point fixe doit être connue.
- 2008** Ce montage ne peut pas se résumer à une simple comparaison de capteurs. La notion d'échelle de température doit être dégagée. Le jury rappelle le statut particulier des thermomètres de référence (thermomètre à gaz et résistance de platine) et des points fixes.
- 2000** Deux types de thermistances existent, dénommées CTP lorsque la résistance augmente avec la température, et CTN dans le cas contraire. Certains candidats ont fait des confusions à ce sujet. Dans le cas des CTN à semi-conducteur, il convient d'explorer une gamme de températures suffisamment large si l'on veut vérifier la relation $R_g = R_0 \exp(-E_g/k_b T)$. Sur l'étendue 20 – 50°C, la courbe donnant $R_g(T)$ peut tout à fait s'avérer aussi proche d'une droite que la courbe donnant $\log(R_g) = f(1/T)$...

Bibliographie

- (i) M.Bertin, JP.Faroux et J.Renault, *Thermodynamique*.
On a suivi l'approche de la thermométrie faite au chapitre 2 (repérage, diagrammes d'Amagat, etc.).
- (ii) Lucien Quaranta, *Dictionnaire de physique expérimentale. II. Thermodynamique et applications*.
Le Quaranta est une très bonne référence pour ce montage, une grande partie des expériences y sont exposées. Ne pas confondre cette édition avec celle qui est simplement intitulée "*Thermodynamique*".
- (iii) Dmitri Sivoukhine, *Cours de physique générale II - Thermodynamique et physique moléculaire*.
Il n'est pas indispensable au montage, il permet de clarifier certains points.

Montages similaires

- (i) MP5 - Transitions de phase.
- (ii) MP23 - Capteurs et transducteurs.

Table des matières

	page
1 Échelle thermodynamique absolue de température	3
1.1 Les gaz parfaits comme étalons primaires	3
1.2 Détermination de la température d'ébullition de l'eau	5
2 Échelle internationale pratique de température	6
2.1 Le thermomètre à résistance de platine, un étalon secondaire	6
2.2 Comparaison de différents thermomètres	7
3 Extension de l'échelle internationale pratique de température aux hautes températures	9
3.1 Principe du pyromètre à disparition de filament	9
3.2 Vérification de la loi de Stefan	10

"En sciences physiques, une première étape essentielle dans l'apprentissage d'un sujet est de trouver comment l'appréhender en chiffres, et des méthodes pour mesurer une qualité qui lui est liée. Je dis souvent que si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et l'exprimer en chiffres, vous en savez quelque chose; mais si vous ne pouvez le mesurer, le quantifier, votre connaissance est d'une bien pauvre et insatisfaisante espèce: ce peut être le début de la connaissance, mais vous n'avez pas encore, dans vos pensées, avancé jusqu'au stade de science, quel que soit le sujet." – William Thomas Thomson, Lord Kelvin.

Introduction

La notion de température s'impose d'abord à nous par nos sens, on ressent différemment un objet *chaud*, *tiède* ou *froid*. De par leur subjectivité ces sensations ne répondent pas aux besoins scientifiques, pour la mesure de température il faut que l'on se base sur des phénomènes physiques objectifs.

La thermométrie s'appuie sur le principe *zéro* de la thermodynamique². Il permet de comparer l'*équilibre thermique* de deux corps (A et B) à l'aide d'un troisième (C) : le corps C est mis en équilibre thermique avec A puis mis en contact avec B, si l'équilibre thermique de B est rompu alors les corps A et B sont à des températures différentes.

Cette rupture d'équilibre on peut l'observer; par exemple on peut observer la dilatation du corps C. De cette manière on est capable de *repérer* la température de différents systèmes les uns par rapport aux autres: en fonction de la dilatation du corps C on saura si un système est plus froid ou plus chaud qu'un autre. On dit que C est un *thermoscope*.

Le repérage de la température de différents systèmes n'est pas suffisant: il faut que l'on puisse comparer la température des corps par rapport à un étalon, c'est à dire à *mesurer* la température. On dit alors que C est un *thermomètre*. Il faut que la mesure soit reproductible et qu'elle dépende le moins possible du système étudié, par exemple les gaz permettent de réaliser cette tâche comme nous allons maintenant le voir.

²Le second principe est aussi nécessaire, c'est lui qui permet la définition de l'échelle de température thermodynamique absolue. Cette échelle s'appuie sur le rendement du cycle de Carnot qui ne dépend d'aucun autre paramètre sauf des températures.

1 Échelle thermodynamique absolue de température

1.1 Les gaz parfaits comme étalons primaires

Expérience. Nous allons nous intéresser aux propriétés thermoélastiques de deux gaz – SF_6 et l'air – on ne s'intéresse donc qu'aux paramètres *pression* (P), *volume* (V) et *température* (T). Ces gaz sont enfermés dans des enceintes,

- (i) le gaz SF_6 est dans une colonne étanche elle-même située au sein d'un thermostat,
- (ii) l'air est contenu dans une seringue reliée de façon étanche à un pressiomètre à l'aide d'un tube de plastique, après s'être assuré que la seringue et le tube sont bien connectés on la plonge dans un bain thermostaté.

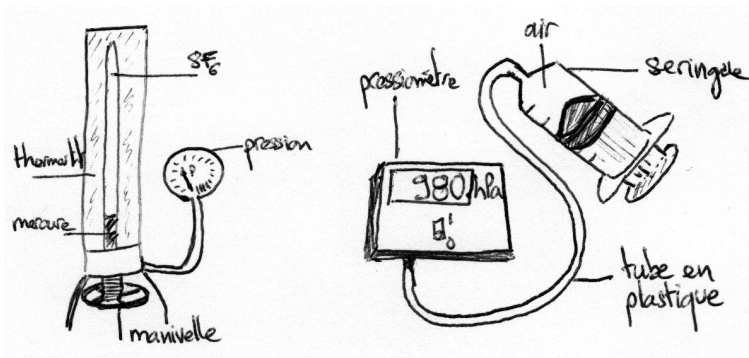


Figure 1: Schéma des deux enceintes.

On trace les isothermes du diagramme d'Amagat de ces deux gaz à 30°C et 60°C . Pour cela on fixe la température des gaz à l'aide d'un thermostat (attention, l'équilibre thermique peut prendre du temps) puis on mesure la pression des gaz en fonction de leur volume. Entre chaque mesure on ne doit surtout pas perdre de gaz (N fixé). On obtient³ les courbes de la figure 2.

On observe que les deux gaz s'écartent de la loi des gaz parfaits. On peut modéliser le produit PV par le développement du Viriel en pression au premier ordre^{4,5},

$$PV = \alpha(T) + \beta(T)P$$

On observe que,

$$\frac{\alpha_{\text{SF}_6}(60^\circ\text{C})}{\alpha_{\text{SF}_6}(30^\circ\text{C})} = \lim_{P \rightarrow 0} \left(\frac{PV(60^\circ\text{C})}{PV(30^\circ\text{C})} \right)_{\text{SF}_6} = (1.06 \pm 0.02)$$

$$\frac{\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(60^\circ\text{C})}{\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(30^\circ\text{C})} = \lim_{P \rightarrow 0} \left(\frac{PV(60^\circ\text{C})}{PV(30^\circ\text{C})} \right)_{\text{air}} = (1.09 \pm 0.03)$$

Les deux produits sont proches. En principe on s'attend à ce qu'ils soient identiques (gaz parfaits) et égaux à

$$\frac{T_{60^\circ\text{C}}}{T_{30^\circ\text{C}}} = (1.098 \pm 0.002)$$

Nos observations indiquent que la grandeur thermométrique $\lim_{P \rightarrow 0} PV$ des gaz est un bon candidat pour construire une échelle des températures car la mesure est indépendante de la nature du gaz. Il s'avère que les thermomètres à gaz servent effectivement de système étalon à la construction de l'échelle légale de températures.

³ On a divisé les incertitudes sur les graduations par $\sqrt{12}$ comme convenu dans le rapport du GUM (*guide to the expression of uncertainty in measurement*)

⁴ La loi des gaz parfaits donne $\alpha(T) = Nk_b T$

⁵ On peut aussi mesurer le premier coefficient du développement du Viriel de ces gaz, on ne l'a pas fait. En particulier, pour l'air, on n'est pas certain si le premier terme du développement n'est pas lié à la pression de vapeur saturante de l'eau.

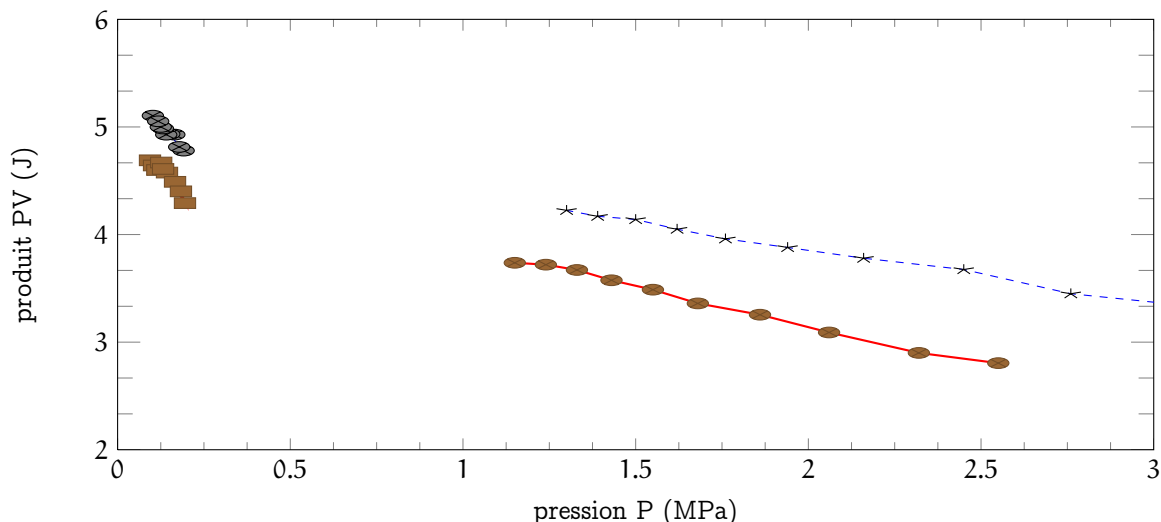


Figure 2: Diagramme d'Amagat du gaz SF_6 et de l'air à 30°C et 60°C . Les deux courbes de droite correspondent au gaz SF_6 alors que les courbes de gauche sont celles de l'air. La courbe la plus haute est systématiquement celle à 60°C et la plus basse celle à 30°C .

Remarques expérimentales

- (i) En principe l'air doit être exempt d'eau, une goutte d'eau ou un peu de buée peut entraîner une surpression de l'ordre de 1bar à 100°C . On peut s'en débarrasser à l'aide d'un sèche cheveux et en utilisant un produit anhydre. L'utilisation du produit anhydre est peut-être un mauvais choix car quoiqu'il arrive il reste du produit dans l'enceinte et on ne sait pas si l'eau qu'il contient ne risque pas de s'évaporer à son tour.
- (ii) La collection compte un ballon tricol auquel on peut fixer une sonde de température et une sonde de pression. On a eu plusieurs difficultés à l'utiliser, voici nos principaux problèmes:
 - le capteur de pression (noté n°2) semble avoir une fuite et les joints perdent en étanchéité si on déplace l'un des capteurs ;
 - le ballon est volumineux (500mL), par conséquent il est très long de refroidir⁶ ou de réchauffer le gaz. De plus la notice indique qu'il est préférable de l'utiliser jusqu'à 60°C ;
 - on n'a que deux degrés de libertés (matière et température) contrairement au cas de la seringue où on contrôle aussi le volume, par contre dans le cas de la seringue il y a une incertitude sur le volume à cause de la dilatation⁷ de la paroi en plastique et à cause du volume du tube ;
- (iii) Si vous faites l'expérience avec la seringue choisissez bien la position du piston avant le début de l'expérience, de sorte à ce que le volume d'air soit toujours immergé dans le thermostat et de sorte à pouvoir balayer une plus grande plage de pressions (typiquement de 0.5bar à 2bar);
- (iv) On a choisi de tracer les isothermes à 30°C et 60°C ce qui nous a forcé à nous appuyer sur l'indication d'un thermomètre secondaire. Il aurait été plus cohérent de tracer ces isothermes aux températures d'ébullition et de fusion de l'eau mais le thermostat de SF_6 ne permet pas d'atteindre de telles températures.
- (v) Le refroidissement du thermostat de SF_6 est long, on vous conseille de commencer par la mesure à 30°C .

⁶Il faut attendre $\approx 20\text{min}$, pour passer de 20°C à 0°C et en le plongeant bien dans l'eau froide

⁷On n'a pas essayé de l'estimer mais on pense que c'est négligeable.

- (vi) Le bain thermostaté qui sert pour la seringue est aussi utilisé pour tracer la réponse des thermomètres secondaires, on vous conseille de vous organiser pour qu'en préparation vous fassiez ces deux mesures en parallèle.
- (vii) Pascal a collé le tube à la seringue afin d'éviter qu'il ne se décroche par dilatation mais soyez avertit qu'une fuite n'est pas impossible.

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

Les thermomètres à gaz sont généralement utilisés dans les laboratoires de métrologie⁸, ils permettent entre autre une mesure précise des températures de changement d'état des systèmes. Ces températures sont ce que l'on appelle des *points fixes*, en thermométrie on les utilise comme étalon afin de calibrer d'autres thermomètres. Par exemple si on utilise le thermomètre à gaz constitué par la seringue on peut remonter à la température d'ébullition de l'eau (voir figure 3).

On mesure⁹ $\lim_{P \rightarrow 0} PV(\text{eau bouillante}) = (3.67 \pm 0.02)\text{J}$ et $\lim_{P \rightarrow 0} PV(\text{eau glacée}) = (2.68 \pm 0.02)\text{J}$ à $P = (9.80 \pm 0.01) \cdot 10^4 \text{Pa}$. Si on admet qu'à cette pression on a $T_{\text{eau glacée}} = 273.15\text{K}$ alors,

$$T_{\text{eau bouillante}} = (389 \pm 5)\text{K}$$

On s'attendait à 373.15K, nous n'avons pas réussi à mieux estimer l'incertitude.

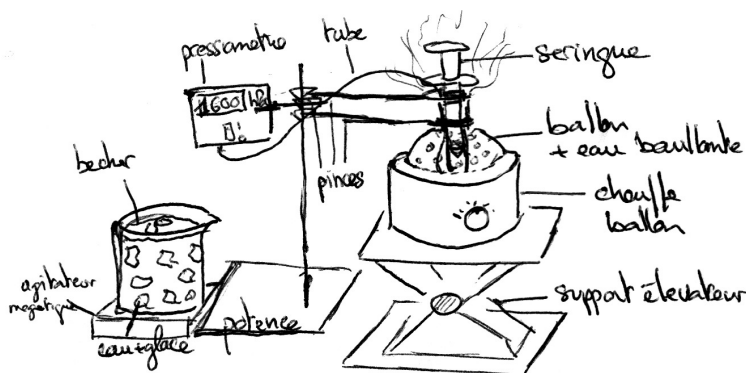


Figure 3: On place la seringue dans de l'eau en ébullition et on trace l'isotherme du diagramme d'Amagat. On fait la même chose pour la seringue plongée dans de l'eau glacée. L'interpolation de ces deux isothermes permet alors de remonter à $\lim_{P \rightarrow 0} PV$ (voir partie précédente).

Les thermomètres à gaz ne sont pas utilisés en pratique car en plus d'être longs à se mettre en équilibre, leur capacité calorifique est assez grande pour perturber le système mesuré. On les utilisent généralement pour étalonner d'autres thermomètres, appelés étalons *secondaires*.

Ces thermomètres doivent être reproductibles. Dans les gammes de températures usuelles on préfère utiliser les thermomètres à base de métaux car on sait en obtenir certains avec une grande pureté. C'est justement le cas des thermomètres à résistance de platine et des thermocouples.

⁸Le gaz utilisé est généralement de l'hydrogène car c'est celui dont le produit PV dépend le moins de la pression. De plus les mesures se font à volume de gaz fixé, pour changer P on modifie la quantité gaz.

⁹En principe on doit estimer le volume des tubes. On les a estimés grossièrement à 10 – 15mL. On n'a pas observé de différence notable dans les résultats à l'aide cette correction.

2 Échelle internationale pratique de température

2.1 Le thermomètre à résistance de platine, un étalon secondaire

Étalonnage Une norme internationale indique que la mesure de température entre -200°C et 800°C doit être réalisée à l'aide du thermomètre à résistance de platine. Cet intervalle de températures est lui même subdivisé en cinq intervalles plus petits à l'intérieur desquels on utilise des formules d'interpolation différentes pour un même thermomètre de platine. Par exemple entre 0°C et 850°C la formule est,

$$R(T) = R_0(1 + a.T + b.T^2)$$

où $a = 3.90802 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ et $b = -5.80195 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$.

On se propose de retrouver les coefficients de cette relation pour une PT100¹⁰. Pour cela on trempe la sonde dans de l'eau glacée, de l'eau bouillante et de l'étain fondant. Dans le cas de l'étain on procède de la façon suivante: on observe le refroidissement de l'étain liquide, lors de sa solidification la température reste constante et donc la résistance de la PT100 aussi¹¹. On note la résistance pour laquelle la PT100 atteint ce palier et on l'associe à la température 232°C . Toutes ces mesures sont réalisées à l'aide d'un montage à 4 fils¹².

On mesure $R(0^{\circ}\text{C}) = (100.06 \pm 0.07)\Omega$, $R(100^{\circ}\text{C}) = (137.6 \pm 0.1)\Omega$ et $R(232^{\circ}\text{C}) = (185.1 \pm 0.1)\Omega$. Par interpolation on obtient les coefficients,

$$\begin{aligned} R_0 &= (100 \pm 0.1)\Omega \\ a &= (3.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \\ b &= -(6 \pm 1) \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2} \end{aligned}$$

On observe qu'aux températures auxquelles on se placera par la suite on a $aT \approx 1.26 \gg bT^2 \approx 0.06$. La PT100 a donc une réponse bien linéaire sur la gamme de températures qu'on étudie. Par la suite on utilisera la PT100 comme la référence de température.

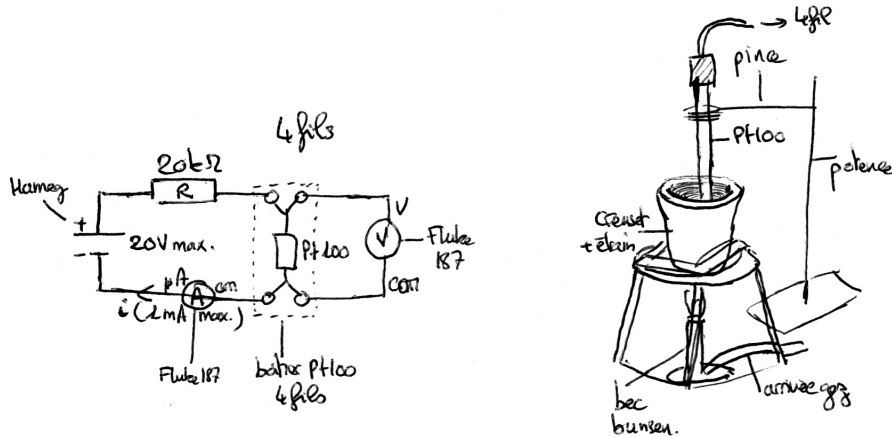


Figure 4: Schéma du montage à 4 fils et du la mesure de la température de fusion de l'étain.

Remarque. Si on utilise l'azote pour étalonner la PT100, alors on doit interpoler les valeurs de la résistance par un polynôme d'ordre 3 si on veut être cohérent avec l'EIP¹³. On a mesuré $R(-195.8^{\circ}\text{C}) = (20.24 \pm 0.01)\Omega$ ce qui est du même ordre de grandeur que ce que prévoit la formule d'interpolation de 0°C à 850°C soit $R^{\text{interp}}(0^{\circ}\text{C}) = 21.58\Omega$.

¹⁰Résistance de platine pour laquelle $R_0 = 100\Omega$ à 0°C .

¹¹On peut s'aider d'un oscilloscope en mode ROLL, avec une échelle de temps grande, au plus petit calibre et en moyennant le signal; afin de voir le palier.

¹²Il y a un voltmètre qui permet de réaliser cette mesure automatiquement, on a préféré réaliser le montage afin de pouvoir illustrer la notion d'auto-échauffement.

¹³Échelle internationale pratique de température

Effet d'auto-échauffement On remplace la résistance du montage à 4 fils par une résistance $2k\Omega$ de sorte à observer un courant jusqu'à $10mA$. Pour un courant de $10mA$ on mesure alors que la résistance de la PT100 dans l'eau glacée est $R(\text{eau glacée}) = (100.32 \pm 0.07)\Omega$. La résistance a augmenté, la température mesurée est donc¹⁴ $T = (0.972 \pm 0.001)^\circ C$ au lieu de $T = 0^\circ C$ comme attendu.

Cette augmentation de la température est une conséquence de la dissipation thermique par effet Joule, on appelle ceci l'auto-échauffement. Une mesure précise nécessite donc que l'on travaille avec de faibles courants.

2.2 Comparaison de différents thermomètres

Nous allons dès à présent nous intéresser aux thermomètres les plus couramment utilisés. Nous allons étudier ces thermomètres dans la gamme de température de $0^\circ C$ à $80^\circ C$ et nous utiliserons la PT100 comme référence en température.

Nous allons étudier,

1. Un thermocouple (de type K). Cette sonde s'appuie sur l'effet Seebeck: une différence de température entre deux matériaux différents crée une différence de potentiel¹⁵,

$$\Delta U = S_K(T - T_{ref})$$

On appelle S_K le pouvoir thermoélectrique de la sonde de type K ; selon les tables on a $S_K = 41\mu V/^\circ C$.

La sonde est en deux parties, l'une est plongée dans l'eau glacée et sert de référence (T_{ref}) alors que l'autre sert de sonde de mesure^{16,17}.

2. Une thermistance (CTN¹⁸). Ces résistances sont constituées d'oxydes métalliques et se comportent comme des semi-conducteurs. Leur résistance a tendance à chuter quand la température augmente.
3. Un thermomètre à alcool. Ce type de thermomètre se rencontre couramment, ils sont constitués d'un liquide en équilibre avec sa vapeur saturante. Leur encombrement empêche parfois de les plonger entièrement dans une enceinte. Certains sont étalonnés de sorte à ce qu'ils ne fonctionnent que s'ils sont partiellement immergés, jusqu'à la ligne de colonne émergente.

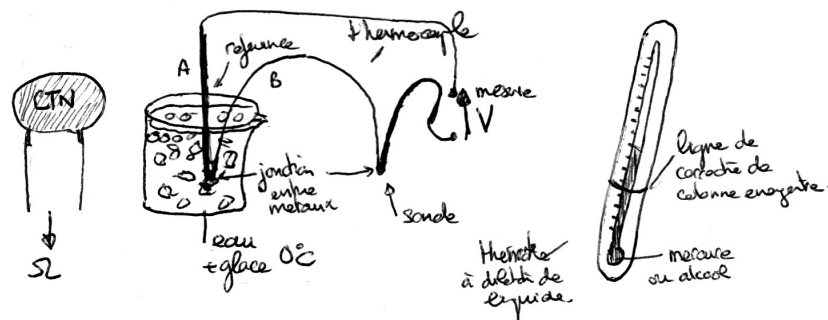


Figure 5: Schéma de trois thermomètres secondaires. Une thermistance CTN (à gauche), un thermocouple (au centre) et un thermomètre à dilatation (à droite).

¹⁴Température déterminée à l'aide de la fonction SOLVE de la Ti89.

¹⁵Cette relation n'est valable qu'à courant nul, il faut donc que l'appareil de mesure soit de haute impédance.

¹⁶Astuce: pour vérifier qu'un thermocouple fonctionne correctement plongez les deux sondes dans un même thermostat, la différence de potentiel devrait être nulle.

¹⁷Les thermomètres (tel que le Fluke 54) n'utilisent qu'une seule sonde, la référence de température est la température ambiante que le thermomètre mesure à l'aide d'une thermistance ou d'une diode.

¹⁸On n'a pas étudié de CTP car leur réponse est compliquée et n'apporte pas grand chose à la discussion. Dans ce cas la résistance croît sur une gamme de température de $0^\circ C$ à $100^\circ C$ mais décroît ailleurs.

Linéarité et sensibilité On mesure la grandeur physique associée à la température pour chaque thermomètre. Pour cela on plonge les thermomètres dans un bain thermostaté réglable. On obtient les données de la figure 6. Les réponses de ces sondes sont linéaires dans la gamme de températures balayées. On observe une légère courbure pour la réponse de la thermistance CTN, ce qui caractérise des effets non-linéaires.

Par interpolation de la mesure du thermocouple on remonte au pouvoir thermoélectrique des sondes de type K, $S_K = (40.9 \pm 0.3) \mu V/^{\circ}C$ on s'attendait à trouver $S_K^{(tables)} = 41 \mu V/^{\circ}C$.

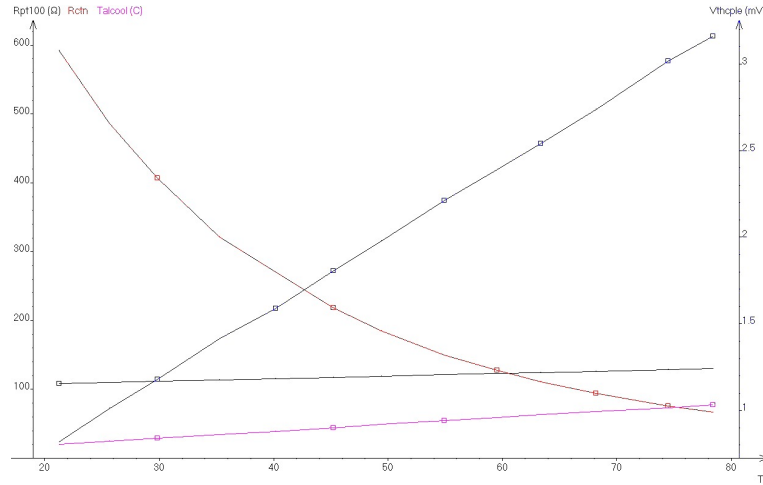


Figure 6: Réponse de différents thermomètres en fonction de la température. La température est mesurée à l'aide d'une PT100, la discussion sur la linéarité de la PT100 ayant déjà été faite. Les courbes seront surement difficiles à reconnaître sur la photocopie en noir et blanc, mais au moins vous avez une idée de l'allure que ça a.

Ces mesures nous permettent de remonter à la sensibilité de ces sondes. On définit la sensibilité selon $s = \frac{1}{X} \frac{dX}{dT}$ où X est la grandeur physique mesurée par la sonde. On calcule ainsi qu'en moyenne de $0^{\circ}C$ à $100^{\circ}C$,

Thermomètre	pt100	thermocouple	CTN	dilatation alcool
sensibilité	$4.10^{-3} ^{\circ}C^{-1}$	$0.02^{\circ}C^{-1}$	$0.03^{\circ}C^{-1}$	$0.02^{\circ}C^{-1}$

La CTN est la plus sensible, ce qui la rend avantageuse si l'on souhaite une plus grande précision. La CTN a aussi l'avantage sur le thermomètre à résistance de platine d'être plus petite pour une résistance équivalente, ce qui permet de limiter son influence sur le système (capacité thermique plus faible).

Temps de réponse On plonge les thermomètres (PT100, CTN, thermocouple et thermomètre à dilatation) dans un b cher d'eau glacée puis dans une bain à $80^{\circ}C$ et on mesure leur temps de réponse individuellement. Pour cela on profite de l'aspect électronique des thermomètres tels que la thermistance, le thermocouples et la résistance de platine : on observe le changement des signaux¹⁹ à l'oscilloscope en mode ROLL (calibre 2mV/div avec une moyenne).

Si on définit le temps de réponse, τ , comme le temps pour atteindre 90% du régime permanent on mesure:

Thermomètre	pt100	thermocouple	CTN	dilatation alcool
temps de réponse	15s	0.6s	1.5s	25s

Ces temps sont donnés à titre indicatif, ils dépendent fortement du conditionnement du thermomètre (gaine de protection, etc.).

¹⁹Pour la thermistance et la résistance de platine l'acquisition se fait à l'aide d'un montage à 4 fils comme précédemment. On observe le changement de tension aux bornes de la résistance, le courant ne doit pas varier si on a bien fait attention à placer une grosse résistance en série avec la sonde.

3 Extension de l'échelle internationale pratique de température aux hautes températures

3.1 Principe du pyromètre à disparition de filament

À haute température la matière fond ou se volatilise. Ainsi les thermomètres que l'on a décrit jusqu'à maintenant ne permettent pas d'aller au delà du point de fusion le plus élevé.

Par chance à haute température les corps commencent à rayonner de la lumière, ce qui permet de remonter à leur température. C'est le principe des pyromètres. La mesure se fait alors sans contact et ne nécessite pas qu'un équilibre thermique s'installe entre l'appareil de mesure et le système étudié. Malheureusement les mesures ne sont pas fiables pour des températures inférieures à 1000°C.

Dans les grandes lignes, le principe du pyromètre repose sur la comparaison de la luminance du corps étudié et de la luminance d'un corps noir²⁰ à une longueur d'onde donnée. Si on assimile le corps étudié à un corps noir alors l'égalité des luminances implique l'égalité des températures²¹.

Comme les corps étudiés ne se comportent généralement pas comme des corps noirs, les pyromètres nécessitent qu'on leur indique la proportion d'énergie réellement émise²², c'est le coefficient d'absorption (appelé parfois émissivité). Des tables indiquent l'ordre de grandeur des émissivités de différents corps²³. Par la suite nous étudierons la température d'un filament d'ampoule, ce filament est fait de tungstène et nous avons choisi une émissivité de 0.43.

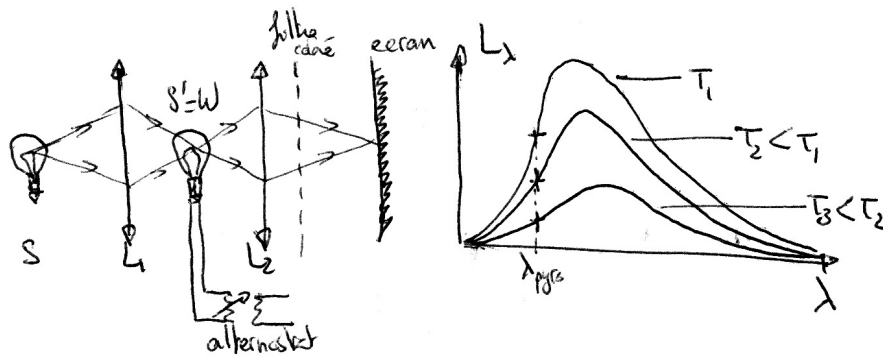


Figure 7: Schéma du montage pour l'illustration du principe du pyromètre optique. On a représenté le spectre de corps noirs à différentes températures à droite (en pratique on a plutôt $\lambda_{\text{pyrometre}}$ aux grandes longueurs d'ondes (rouge, infrarouge)).

On fait l'expérience du Quaranta qui illustre le principe du pyromètre à disparition de filament. Pour cette expérience si on trouve des luminosités égales sur l'écran mais que les ampoules ont des puissances différentes c'est probablement parce que le diaphragme d'ouverture de chaque ampoule n'est pas le même ce qui entraîne une asymétrie des luminosités. En principe si on veut être juste il faut que l'écran 'voit' les sources avec le même angle solide et donc que la lentille proche de l'écran soit le diaphragme d'ouverture des deux sources.

Remarque. En réalité il y a différentes techniques de pyrométrie optique, le pyromètre infrarouge en propose deux (les modes 1C et 2C). J'ai ici décrit la pyrométrie à une couleur (1C) mais le mode 2C permet une mesure à deux couleurs. Cette mesure compare la luminance du corps étudié à deux longueurs d'ondes, il s'avère que ce mode

²⁰À ce propos le pyromètre infrarouge nécessite 15min de chauffe de sorte à amener sa source interne à l'équilibre.

²¹On rappelle que les spectres de corps noirs à des températures différentes ne se croisent pas. Par conséquent si on sait que les deux spectres sont égaux en un même point on en déduit qu'ils ont même température.

²²C'est ce qu'on règle sur le mode S/E du pyromètre infrarouge.

²³La documentation du pyromètre infrarouge à une page entière d'émissivités.

est avantageux pour des sources ponctuelles²⁴ mais il nécessite la valeur du paramètre 'slope' qui est mal tabulé (mais il semblerait que pour le tungstène ce soit 1).

3.2 Vérification de la loi de Stefan

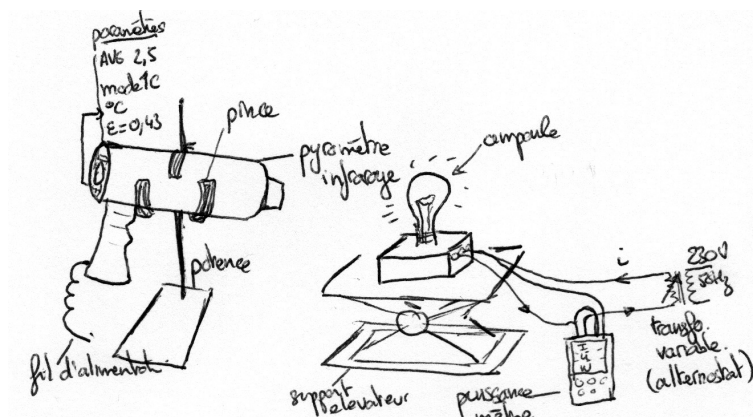


Figure 8: Schéma du montage pour la vérification de la loi de Stefan à l'aide du pyromètre infrarouge.

On utilise le pyromètre pour vérifier la loi de Stefan d'une ampoule. Le pyromètre mesure la température et on utilise un puissance-mètre pour mesurer la puissance *électrique* reçue par l'ampoule. On suppose que le rendement électrique-thermique est constant (≈ 0.95), une mesure plus juste devrait se faire à la thermopile mais comme elle est plus sensible au bruit on a préféré ne pas l'utiliser.

L'interpolation de nos données par la loi $P = \alpha T^n$ nous permet de remonter à $n = (4.2 \pm 0.1)$. On vérifie donc bien la dépendance en T^4 exprimée par la loi de Stefan.

Conclusion

Ce montage nous a permis d'exposer la construction de l'échelle légale de température thermodynamique à l'aide des gaz parfaits. Ces thermomètres ne sont utilisés que dans les laboratoires de métrologie et en pratique on utilise d'autres thermomètres, tels que le thermomètre à résistance de platine, que l'on étalonne par rapport à des points fixes.

L'échelle de température peut ensuite être extrapolée aux hautes températures à l'aide du rayonnement des corps noirs et l'introduction des pyromètres.

Questions et remarques des correcteurs

- (i) Pourquoi n'avez vous pas travaillé avec SF_6 à $0^\circ C$ et à $100^\circ C$?

→ C'est parce que le thermostat ne nous permettait pas d'accéder à ces températures avec l'eau (glace/vapeur). Autre problème pour la température de SF_6 : Au delà de $45^\circ C$ on n'a plus un équilibre liquide-vapeur mais une phase *fluide*, où l'équation d'état des gaz parfaits n'est pas valable a priori. Faire des mesures à $60^\circ C$ était donc un mauvais choix pour illustrer la grandeur thermométrique $\lim_{P \rightarrow 0} PV$, il aurait fallut choisir une température en dessous de celle du point critique.

²⁴En principe on peut aussi rapprocher la source mais la documentation indique que la distance de l'appareil à la source doit être supérieure à 60cm.

- (ii) *Quelle est la pression de la pièce ?*
 → Je n'avais pas fait la mesure pendant la présentation. J'ai donc fait la mesure après la question (la mesure donnait $(998 \pm 1)\text{hPa}$).
- (iii) *Vous avez dit avoir trempé la PT100 dans l'étain. Comment sont faites les soudures ? N'y a-t-il pas un risque ?*
 → Je me suis permis de plonger la sonde dans l'étain en me fiant à une étiquette sur la sonde. Il y avait néanmoins le risque que la PT100 en prenne un coup si ses soudures avaient été faites en étain. Ça ne semble pas être le cas car la sonde fonctionne toujours (ouf!), les fils sont probablement sertis.
- (iv) *Qu'est ce qui limite le temps de réponse ?*
 → Ce qui limite le temps de réponse c'est surtout le conditionnement du thermomètre. Ça dépend de la capacité calorifique et de la conductivité thermique de ce dernier, en gros de sa diffusivité thermique. Une autre limitation vient de la *couche limite* dans le cas de la mesure de la température d'un écoulement.
- (v) *Avez-vous vérifié la loi qui lie la résistance à la température ?*
 → Non, je ne me suis fié qu'à trois points fixes.
- (vi) *Qu'est ce qui limite la résistance des PT100 à basse température ?*
 → Aux basses températures, la résistance finit par devenir constante et proche de 20Ω . C'est à cause des impuretés du réseau cristallin.
- (vii) *Peut-on corriger l'auto-échauffement ?*
 → Il faut réduire le courant qui circule dans le circuit, on limite ainsi l'effet Joule. Le problème c'est qu'on est alors moins précis. Il faut faire un compromis.
- (viii) *Quel est l'intérêt des thermocouples ?*
 → Ils sont sensibles et rapides. Le fait que la température est mesurée par rapport à une référence est pratique car cela facilite la mesure différentielle de températures : on peut plonger les deux sondes en deux endroits d'un fluide pour mesurer la différence de températures entre ces deux points. La mesure différentielle avec, par exemple, deux PT100 intégrées dans un pont de Wheatstone (on met les deux PT100 sur deux fils d'un même côté du pont) est moins efficace car les deux sondes auront a priori des résistances légèrement différentes à la même température ce qui engendre une erreur systématique à moins d'équilibrer correctement le pont.
- (ix) *Comment définit-on l'échelle légale de température thermodynamique ?*
 → J'avais répondu que c'est ce qui s'appelle aussi l'échelle de Kelvin. Lord Kelvin l'a mise en place en s'appuyant sur le rendement du cycle de Carnot. Ce rendement est indépendant du système et dépend seulement d'un rapport de températures ($\eta = 1 - T_{\text{chaud}}/T_{\text{froid}}$). L'utilisation de la grandeur thermométrique $\lim_{P \rightarrow 0} PV$ (gaz parfaits) colle bien à cette échelle, c'est pourquoi on réalise cette échelle à l'aide des thermomètres à gaz parfaits mais d'autres thermomètres sont susceptibles d'être utilisés (par exemple avec le bruit thermique des résistances, sauf erreur).
 L'un des correcteurs n'était pas d'accord avec cette définition en terme de cycle de Carnot, il attendait de moi de dire que c'est défini par rapport au gaz parfait. J'ai deux bouquins qui vont dans le sens des machines dithermes²⁵, il faudra donc accorder la réponse en fonction de ce que le jury semble attendre le jour J.
- (x) Deux conseils de la part des correcteurs,
- (1) Pour faire la mesure de la loi de Stefan on rencontre souvent un problème si on fait la mesure de la puissance à l'aide d'une thermopile: le verre semble filtrer une partie du rayonnement, ce qui fausse la mesure. On n'obtient généralement pas la bonne loi de cette façon.

²⁵Le livre de Dmitri Sivoukhine, *Physique générale - Tome 2 - Thermodynamique et physique moléculaire* au paragraphe 31 (pages 99 à 107) ainsi que le livre de Labether, *Mesures thermiques - températures et flux* au paragraphe I.6 (pages 20-23)

Il est préférable de faire la mesure de la puissance à l'aide du puissance-mètre électrique.

Dans d'autres montages il est préférable de mesurer la température du filament de tungstène par la mesure de sa résistance (on fait $R = U/I$), il y a une relation qui relie cette résistance à la température (il me semble que le Quaranta de thermodynamique la fournit). Une mesure des paramètres internes est souvent plus fiable.

- (2) Quand on a beaucoup d'appareils chauffants branchés à la même multiprise comme ça peut arriver pour ce montage, il peut arriver que le disjoncteur saute.

- (xi) Un camarade de classe m'a reproché de ne pas avoir parlé d'échelle dans ce montage, au sens de l'échelle centésimale. Ces types d'échelles sont construites en repérant l'état d'un système à deux températures (points fixes) et en modélisant une évolution linéaire de cette grandeur (par exemple, pour un thermomètre à mercure on repèrerait la hauteur de la colonne à 0°C et à 100°C puis on graduerait le thermomètre de façon monotone pour déduire les autres températures).

Il faut prendre garde car ce genre d'échelle c'est ce qu'on appelle une échelle *thermométrique*, elle permet seulement le *repérage* d'une température²⁶. On aura un résultat qui différera fortement en fonction du système thermométrique, de la référence, etc. Ça peut être une idée d'expérience mais je pense que c'est préférable d'utiliser le gaz parfait pour cela car il illustre cette idée de repérage et comme il définit l'instrument de mesure de la température il permet aussi de construire l'échelle *thermodynamique* de température par la mesure de points fixes (ébullition de l'eau).

²⁶Le livre de Labether, *Mesures thermiques - températures et flux* (pages 16-17) mais aussi les livres cités en bibliographie discutent ce point.