

# MESURE DE TEMPERATURE

## I INTRODUCTION

### I.1 Définitions

[1], p. 12 ; [2], p. 116 ; [5], ch. 20 ; [11], p. 13 à 16.

La température est une variable d'état intensive traduisant l'état thermique d'un milieu, à savoir le degré d'agitation des particules. C'est une grandeur macroscopique non réductible aux autres paramètres (mécaniques, électriques...), dont l'introduction est nécessaire pour décrire complètement le système considéré au niveau macroscopique. Elle est spécifique de la théorie thermodynamique, l'autre grandeur étant l'entropie. Il y a plusieurs définitions équivalentes de la température :

- la température thermodynamique est celle introduite à l'énoncé du second principe.

Il en découle sa définition fondamentale liée à l'énergie interne et à l'entropie du système considéré :

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_X$$

X désignant l'ensemble des autres paramètres extensifs maintenus constants. Telle quelle, cette grandeur n'est pas facile à utiliser en pratique.

- la température cinétique est celle introduite lors de l'étude microscopique du gaz parfait ([1], ch. 2, § 3 ; [5], ch. 2, § III). C'est une mesure de son énergie cinétique microscopique, donc de son énergie interne. Elle est basée sur un modèle théorique de gaz.

- les propriétés des gaz réels aux faibles pressions permettent de définir une échelle expérimentale de température appelée température absolue.

On peut démontrer l'équivalence de l'échelle thermodynamique et de l'échelle des gaz parfait (cf. [1], ch. 8, § 2.5). L'extrapolation aux pressions nulles permettant de faire coïncider la température absolue avec la température cinétique ([1], ch. 3, § 3). On achève ainsi l'unicité de ces 3 grandeurs.

### I.2 Echelle internationale de température

Les mesures thermométriques utilisent actuellement l'échelle internationale de température de 1990 (EIT 90). Sa logique est la suivante :

- on définit l'unité de température en posant que celle du point triple de l'eau est exactement 273,16 K. Il est alors possible de définir le rapport de deux températures par celui des valeurs prises par la grandeur thermométrique PV d'un gaz parfait à ces deux températures. La température devient alors une grandeur mesurable.

- on mesure avec une très grande précision les températures de 16 points fixes de référence (qui vont du point triple de l'hydrogène vers 14 K, au point de fusion de l'or vers 1337 K) en utilisant un thermomètre à gaz entre 14K et 1235 K (point de fusion de l'argent), puis un pyromètre optique fondé sur la loi du rayonnement de Planck au-delà.

- on définit des instruments légaux d'interpolation (et d'extrapolation pour les basses et hautes températures) dont les indications donnent accès à toute température au moyen de formules de conversion. Ces instruments légaux sont le thermomètre à gaz d'hélium (3 K à 24,5561 K), le thermomètre à résistance de platine (13,8033 K à 1243,93 K) et le pyromètre optique au-delà. A partir de ces instruments légaux, on peut étalonner toutes sortes de thermomètres (à dilatation de mercure, à thermocouple, à thermistance, etc....).

Remarque :

La mesure d'une température n'est pas aussi simple qu'il y paraît. Il faut respecter les consignes suivantes :

- **s'assurer que le milieu étudié est en équilibre thermique.**
- pour les liquides, agiter le milieu afin d'éviter les gradients de température.
- éviter les ponts thermiques.
- utiliser de la glace pilée pour réaliser les bains à 0 °C.

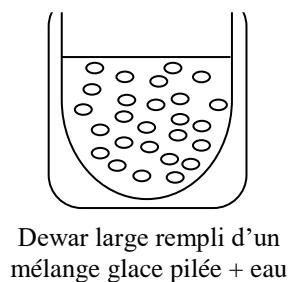
**II PRINCIPE DU THERMOMETRE A GAZ****II.1 Montage**

On utilise la relation de proportionnalité entre la pression d'un gaz parfait et la température à volume constant. Le matériel est constitué d'un flacon en verre Pyrex relié à un manomètre électronique différentiel Digitron 2083P. Pour mesurer une température inconnue (celle de l'ébullition de l'eau dans notre exemple), on procède en 2 étapes :

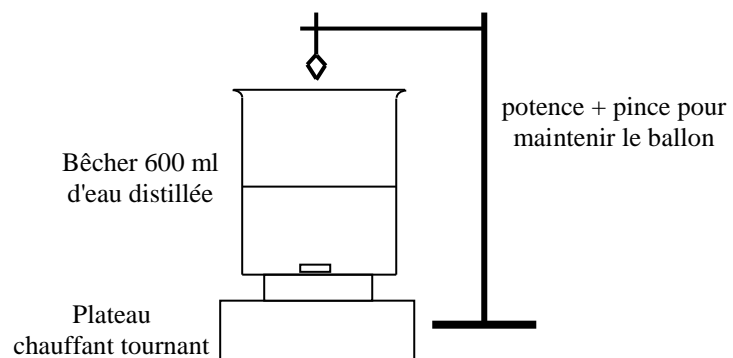
- mesure de la pression du gaz dans le thermostat de référence : point de fusion de la glace à 273,15 K (à défaut du point triple de l'eau).
- mesure de sa pression dans la source de température inconnue T.

Réalisation des thermostats :

THERMOSTAT EAU/GLACE



THERMOSTAT EAU A L'EBULLITION



Mélange eau-glace : il vaut mieux utiliser de la glace pilée pour favoriser les échanges thermiques avec la phase liquide. Comme eau, on peut prendre de la glace fondue pour faire durer le mélange (n'en mettre qu'une quantité suffisante). Laisser l'équilibre thermique s'installer.

Thermostat eau à l'ébullition : il faut une ébullition franche et établie depuis suffisamment longtemps (il y a un dégazage initial qui peut être confondu avec l'ébullition). On peut contrôler la température du bain avec un thermomètre de précision en cas de doute.

Précautions à respecter :

Cette expérience est facilement perturbée par la présence d'eau dans le ballon car sa pression de vapeur saturante varie très vite avec la température → Une simple goutte dans le flacon peut introduire une surpression très importante à 100 °C (risquée pour le matériel et l'opérateur) et un peu de buée suffit déjà à fausser les mesures. → **Il faut sécher l'intérieur du ballon ainsi que le bouchon avec un sèche-cheveux avant de fermer le flacon.**

L'ensemble du ballon doit plonger complètement dans le thermostat (c'est la source d'erreur la plus fréquente) → il faut plonger le ballon jusqu'au niveau du bouchon, mais sans le recouvrir pour éviter les entrées d'eau.

## II.2 Mesures

Si on néglige la dilatation du ballon, l'équation des gaz parfaits donne :

$$\frac{P_{eb}V}{P_{eau/glace}V} = \frac{T_{eb}}{T_{eau/glace}} = \frac{P_{eb}}{P_{eau/glace}}$$

Le manomètre utilisé étant différentiel<sup>1</sup>, il mesure  $P_x = P_{atm} + \Delta P_x$ . On obtient donc la température par la relation suivante (avec la température en Kelvin) :

$$T_{eb} = \frac{P_{atm} + \Delta P_{eb}}{P_{atm} + \Delta P_{eau/glace}} T_{eau/glace}$$

### Remarques :

Le volume du tuyau de liaison entre le ballon et le manomètre engendre une erreur systématique sur la mesure de pression car le gaz contenu à l'intérieur du tuyau n'est pas à la température de mesure → on a intérêt à utiliser un tuyau très court pour minimiser cette erreur.

Si la pression atmosphérique n'est pas normale (1013 mbar) au moment de l'expérience, il faut consulter un Handbook pour connaître la valeur de la température d'ébullition de l'eau qu'on doit obtenir dans les conditions de l'expérience.

L'air contenu dans le ballon n'est pas rigoureusement un gaz parfait. Il s'agit donc d'une expérience de principe. Il faudrait idéalement réaliser les mesures avec une pression de remplissage du ballon de plus en plus faible et extrapoler le rapport  $P_{eb}/P_{eau/glace}$  lorsque cette pression tend vers zéro<sup>2</sup> (cf. [1], p. 57). Les écarts à l'idéalité ne peuvent cependant pas être mis en évidence expérimentalement car ils sont inférieurs à la précision des mesures.

### Retour sur l'unité de température :

Elle a été définie en posant que celle du point triple de l'eau est exactement 273,16 K. La fusion de la glace sous la pression atmosphérique normale est alors 273,15 K. L'extrapolation aux pressions nulles du rapport  $P_{eb}/P_{eau/glace}$  valant 1,36610, on obtient pour la température d'ébullition de l'eau sous atmosphère normale la valeur  $T_{eb} = 273,15 \times 1,36610 = 373,15$  K, soit une différence de 100 degrés entre les deux températures comme dans l'échelle Celsius. C'est pour obtenir cet ajustement entre les deux échelles que la valeur numérique particulière de 273,16 K pour le point fixe de référence a été choisie.

## III THERMOMETRES D'INTERPOLATION LEGAUX

### III.1 Thermomètre à résistance de platine

#### III.1.1 Introduction

C'est l'instrument légal d'interpolation entre 13,8 K et 962 °C. On met à profit la variation de la résistance d'un conducteur métallique en fonction de la température. Pour les thermomètres industriels à résistance de platine (TIRP) qu'on rencontre le plus souvent, les équations d'interpolation retenues (cf. [2], p. 279 ou [12], p. 204 - 220) sont encore celles de l'EIPT 68 (ancienne échelle de température) à savoir :

<sup>1</sup> On peut trouver la valeur de la pression atmosphérique au moment de l'expérience sur le site internet de Météo France par exemple.

<sup>2</sup> Attention à ne pas confondre pression dans le ballon et pression dans l'expérience : il faudrait utiliser un ballon contenant de moins en moins de gaz ( $P_{ballon} \rightarrow 0$ ), et mesurer sa pression dans un mélange eau/glace et dans une eau portée à ébullition sous une pression qui reste égale à une atmosphère.

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad \text{Pour } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 962^\circ\text{C}$$

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)] \quad \text{Pour } -200^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$$

Attention, dans ces équations connues sous le nom de Callendar et Callendar - Van Dusen, **la température doit être exprimée en degré Celsius !**

Les résistances de platine utilisées en thermométrie industrielle sont normalisées. On les nomme en général par la valeur qu'elles prennent à  $0^\circ\text{C}$ . Les plus courantes sont les Pt 100 ou les Pt 1000 (respectivement 100 et 1000  $\Omega$  à  $0^\circ\text{C}$ ). Une classe est aussi indiquée pour informer sur le degré de précision garanti sur la valeur de la résistance. Les deux normes les plus courantes sont les normes européennes (IEC 751) et américaines (ASTM 1137). Les résistances utilisées ici sont des Pt 100 de classe A suivant la norme IEC 751. Elles doivent alors respecter les valeurs suivantes :

$$R_0 = 100 \pm 0,06 \, \Omega \text{ à } 0^\circ\text{C}$$

$$R_{100} = 138,5 \pm 0,13 \, \Omega \text{ à } 100^\circ\text{C}$$

La norme indique aussi la valeur numérique des coefficients A, B, C des équations de Callendar Van Dusen. Pour une Pt 100 de classe A, norme IEC 571, on doit prendre :

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$$

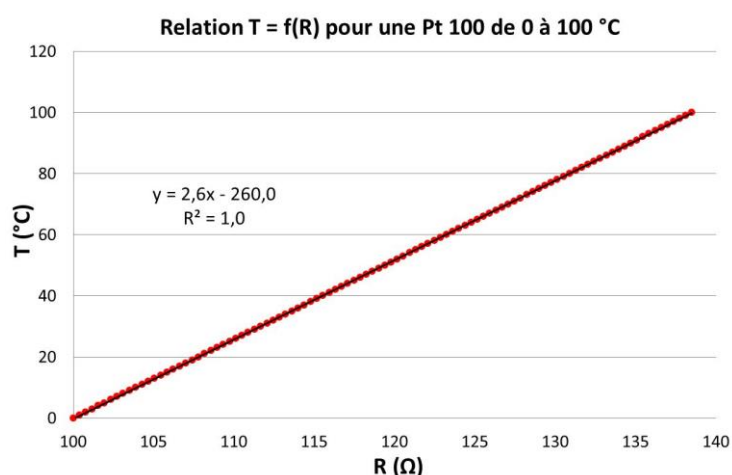
$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \, ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,274 \cdot 10^{-12} \, ^\circ\text{C}^{-4}$$

La détermination d'une température T se ramène alors à la mesure de la valeur  $R_T$ . Il suffit ensuite, pour des mesures au-dessus de  $0^\circ\text{C}$ , de résoudre l'équation du 2<sup>nd</sup> degré :

$$B \cdot T^2 + A \cdot T + \left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right) = 0 \quad \rightarrow \quad T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right)}}{2B}$$

Le calcul de T peut alors s'effectuer à l'aide d'un tableur. On l'a effectué entre 0 et  $100^\circ\text{C}$  pour une résistance valant exactement  $100 \, \Omega$  à  $0^\circ\text{C}$ . On s'aperçoit alors que la résistance de platine a un comportement pratiquement linéaire (l'écart à la linéarité ne dépasse pas 0,3 %) :



La sensibilité est donc pratiquement constante dans cette gamme de température et vaut  $\approx 2,6^\circ\text{C}/\Omega$ , soit  $\approx 0,39 \, \Omega/^\circ\text{C} \rightarrow$  la résistance de platine est un capteur peu sensible et il faut un ohmmètre performant pour déterminer une température avec précision. Il faut aussi noter que le rapport  $\Delta R/\Delta T$  n'est pas le meilleur critère pour évaluer la sensibilité thermique d'un capteur car on conçoit qu'une variation de  $0,39 \, \Omega/^\circ\text{C}$  autour de  $100 \, \Omega$  soit plus facile à mesurer précisément que la même variation autour de  $10\,000 \, \Omega$ . On préfère donc définir la sensibilité thermique relativement à la valeur de la

résistance du capteur à la température considérée :

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

Ce paramètre, appelé aussi coefficient de température du capteur, vaut par exemple  $\approx 3,6 \cdot 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$  pour une résistance de platine à 20 °C → Comme  $\Delta R/R = \alpha \cdot \Delta T$ , il faut mesurer sa résistance à  $\approx 0,4 \%$  près si on veut une température précise à 1 °C près, ou à  $\approx 0,04 \%$  près si on veut un résultat au dixième de degré près. Cela confirme qu'il faut un multimètre performant pour faire des mesures précises. Il sera intéressant de comparer la sensibilité d'une Pt100 à celle d'une thermistance.

### III.1.2 Manipulations possibles

L'étude de la résistance de platine peut s'aborder de deux façons :

- on peut montrer le principe d'étalonnage d'une résistance de platine par la méthode des points fixes. Pour une étude au-dessus de 0 °C, il faut au moins trois mesures pour déterminer  $R_0$ ,  $A$  et  $B$ . Deux équilibres mono variants sont facilement accessibles : le mélange eau/glace (0 °C) et l'ébullition de l'eau (100 °C sous 1 atm). Le point fixe suivant aisément réalisable est la fusion de l'étain (231,928 °C) mais le capteur doit supporter cette température, ce qui est rarement le cas avec les sondes courantes<sup>3</sup>. L'affaire n'est donc pas simple. Une alternative consiste à se limiter à une étude entre 0 et 100 °C, et réduire l'équation d'interpolation de la résistance à une loi linéaire. Il n'y a alors plus que deux coefficients à déterminer ( $R_0$  et  $A$ ) et on peut le faire simplement avec le mélange eau-glace et l'eau bouillante. Cette solution induit cependant une erreur systématique supplémentaire liée à la linéarisation.

- une autre solution consiste à vérifier qu'on peut obtenir une valeur de température fiable en utilisant l'équation de Callendar avec les coefficients recommandés pour la résistance. C'est facilement réalisable avec le mélange eau/glace et l'eau bouillante. Il suffit de mesurer  $R_0$  à 0 °C<sup>4</sup>, sa valeur  $R_{éb}$  à l'ébullition, calculer  $T_{éb}$  avec l'équation d'interpolation, et vérifier la cohérence du résultat obtenu avec la valeur attendue. Si l'accord est vérifié, on peut ensuite utiliser la résistance de platine comme thermomètre étalon. C'est la solution adoptée ici.

#### Remarque :

Le mélange eau/glace et l'ébullition de l'eau ne sont pas des points fixes dans l'EIT 90 car les transitions de phases retenues dans cette échelle sont des points triples ou des équilibres solides/liquides. Les premiers ont été choisis car ils sont parfaitement définis ( $P_T$ ,  $T_T$  fixés), les seconds parce qu'ils sont moins sensibles à la pression que les équilibres liquide/vapeur. Il est donc plus judicieux de parler d'équilibres monovariants pour le mélange eau/glace et l'ébullition de l'eau. A noter aussi qu'il existe deux points fixes à des températures raisonnables, la fusion du Gallium à 29,7646 °C et celle de l'Indium à 156,5985 °C, mais ces produits sont assez chers. On ne peut donc présenter que des expériences de principe sur des équilibres monovariants.

### III.1.3 Mesure de $T_{éb}$

Il suffit de reprendre les deux thermostats du § II.1 et d'y plonger les résistances de platine. Voici à titre indicatif une série de mesure effectuée sur 5 capteurs industriels Pt100 de classe A<sup>5</sup>, sous une pression de 1013 mbar, en utilisant une méthode 4 fils, avec

<sup>3</sup> Le platine n'est pas en cause ici. On est surtout limité par la tenue en température des soudures et des fils de liaison.

<sup>4</sup> Ce n'est pas nécessaire si la précision des mesures de résistances est inférieure à la classe de la sonde. Il est alors plus simple de prendre la valeur de 100  $\Omega$  avec la tolérance de 0,06  $\Omega$  pour une classe A à condition que le capteur respecte encore cette classe.

<sup>5</sup> Sondes 4 fils de marque Correge disponibles chez Radiospares sous la référence 407-1387.

le multimètre le plus performant à notre disposition<sup>6</sup>. Les mesures ont été moyennées sur 200 acquisitions pour limiter l'incidence des fluctuations, notamment à l'ébullition :

Résistance	1	2	3	4	5
$R_{\text{eau/glace}} (\Omega)$	99,49	100,00	99,80	99,99	99,71
$R_{\text{éb}} (\Omega)$	137,62	138,51	138,23	138,53	138,44
$T_{\text{éb}} (^{\circ}\text{C})$	99,53	100,04	100,01	100,12	99,95

Ces résultats amènent plusieurs commentaires.

#### Classe des capteurs :

Les sondes étant des Pt100 de classe A, on devrait avoir  $99,94 \Omega < R_{0^{\circ}\text{C}} < 100,06 \Omega$ . Si on tient compte de la précision du multimètre, on constate que certaines résistances ne respectent pas cette classification. Cela s'explique par l'âge des capteurs (le n° 1 est le plus ancien) et l'utilisation qui en est faite. Ils sont parfois plongés dans de l'azote liquide (plus ou moins brutalement suivant l'expérimentateur) alors que le constructeur garanti une plage d'utilisation entre  $-20$  et  $+200^{\circ}\text{C}$ . Les contraintes thermiques et mécaniques qui en résultent peuvent donc avoir dégradé les performances de certaines sondes et c'est pourquoi on préfère ici mesurer les valeurs à  $0^{\circ}\text{C}$  plutôt que de faire confiance à la classe annoncée.

#### Dispersion des résultats sur $T_{\text{éb}}$ :

Les températures d'ébullition obtenues avec les différentes sondes sont très proches les unes des autres si on prend les valeurs mesurées pour  $R_0$  : l'écart maximum est de 0,6 %, et il tombe à 0,2 % si l'on enlève la sonde n° 1 → la résistance de platine est un capteur facilement interchangeable (cela aura peu d'influence sur le résultat de la mesure).

#### Exactitude :

On doit obtenir une température d'ébullition de  $100^{\circ}\text{C}$  puisque la pression atmosphérique correspondait aux conditions normales dans l'expérience<sup>7</sup>. On obtient des résultats très proches de cette valeur (écart maximum de 0,12 % si on enlève la sonde n°1). Les résistances de platine permettent donc des mesures précises. Il faut le confirmer en estimant les incertitudes. Le calcul exact est assez lourd puisque la valeur de deux résistances intervient dans une équation du second degré. On peut simplifier le problème en réduisant l'équation de Callendar à l'ordre 1 puisqu'on a pratiquement une droite dans la gamme de température explorée. On a alors<sup>8</sup> :

$$T_{\text{éb}} = \frac{1}{A} \left( \frac{R_{\text{éb}}}{R_0} - 1 \right) \rightarrow \Delta T_{\text{éb}} = \frac{1}{A \cdot R_0} \sqrt{(\Delta R_{\text{éb}})^2 + \left( \frac{R_{\text{éb}}}{R_0} \Delta R_0 \right)^2}$$

L'appareil utilisé donnant les valeurs de  $R_0$  et  $R_{\text{éb}}$  à  $0,02 \Omega$  près → On obtient :  $\Delta T_{\text{éb}} \approx 0,1^{\circ}\text{C}$

Les résultats obtenus sont donc cohérents avec la valeur attendue si on exclut la sonde n° 1 (on a aussi un léger écart avec la résistance n°4 mais il se justifie si on tient compte de la dispersion des mesures ; cf. § suivant). On voit donc sur cette expérience tout l'intérêt des résistances de platine comme instrument légal d'interpolation : on peut faire des mesures précises, reproductibles et sans problèmes d'interchangeabilité si le capteur est de qualité. Le platine a été choisi car c'est un métal noble (il vieillit bien, bonne inertie chimique, pas d'oxydation), on peut l'obtenir avec une très grande pureté (99,999 % ; ce qui permet de « fixer » avec une grande précision ses caractéristiques électriques) et

<sup>6</sup> Multimètre 6 ½ Digits Keithley 2000 ; les mesures de  $R_{\text{eau/glace}}$  et  $R_{\text{éb}}$  sont alors précises à  $0,02 \Omega$  près.

<sup>7</sup> Si ce n'est pas le cas, il faut chercher la température d'ébullition attendue dans un Handbook.

<sup>8</sup> On a utilisé une combinaison quadratique des incertitudes car les mesures de  $R_0$  et  $R_{\text{éb}}$  ne sont pas faites sur le même calibre de l'appareil et il y a aussi des erreurs aléatoires dont il faudrait tenir compte (cf. § suivant).

sa température de fusion (1769 °C) autorise un emploi jusqu'à des températures élevées avec une sonde adaptée. La faible sensibilité thermique des métaux oblige par contre à disposer d'un ohmmètre performant si on veut des mesures précises.

### III.1.4 Stabilité des thermostats

Le multimètre utilisé permettant l'acquisition et le traitement de données, on peut s'en servir pour étudier la stabilité des thermostats. Il faut noter qu'on caractérise ainsi la stabilité de l'ensemble bain/sonde/appareil<sup>9</sup> et non pas celle du bain seul (on obtient donc une valeur par excès). Voici à titre indicatif les écarts types obtenus sur les acquisitions précédentes réalisées à la vitesse de mesure la plus lente (précaution importante à respecter sinon la dispersion des mesures est beaucoup plus forte) :

Résistance	1	2	3	4	5
Écart type $R_0$ ( $\mu\Omega$ )	380	250	220	310	540
Écart type $T_0$ (°C)	0,001	0,0007	0,0006	0,0008	0,0014
Écart type $R_{\text{éb}}$ (m $\Omega$ )	70	13	10	12	13
Écart type $T_{\text{éb}}$ (°C)	0,13	0,03	0,02	0,03	0,03

Les instabilités de mesure sont très faibles. Les fluctuations sur  $R_0$  sont seulement de quelques centaines de  $\mu\Omega$ , soit une variation de température<sup>10</sup> équivalente de l'ordre du 1 m°C pour le mélange eau/glace (on rappelle qu'on caractérise la stabilité de l'ensemble appareil-sonde-bain) ! Le résultat est moins bon pour l'équilibre liquide/vapeur ( $\approx 30$  m°C si on excepte la sonde n°1<sup>11</sup>), mais c'est assez logique puisque cette transition de phase est turbulente, au contraire de la transition solide/liquide. On voit donc ici tout l'intérêt des équilibres monovariants : s'ils sont bien réalisés, on a un milieu très stable en température et qui peut servir de référence. On a alors intérêt à privilégier les équilibres solides/liquides pour leur plus grande stabilité et pour leur plus grande insensibilité à la pression (problème qui disparaît totalement avec les points triples).

#### Remarque :

Il faudrait en toute rigueur reprendre le calcul d'incertitude sur  $T_{\text{éb}}$  en tenant compte de ces variations aléatoires de résistance. La correction est minime pour  $\Delta R_0$  ( $\approx 300 \mu\Omega$ , à comparer aux 0,02  $\Omega$  de l'appareil) mais c'est moins le cas pour  $\Delta R_{\text{éb}}$  (les fluctuations sont de l'ordre de grandeur de la précision du multimètre) → il faudrait recalculer  $R_{\text{éb}}$  en ajoutant en quadratique l'incertitude de l'appareil et celle liée aux fluctuations (qui se calcule par la relation  $\approx 2\sigma T_{\text{éb}}/\sqrt{N_{\text{mes}}}$ ). L'encadrement serait élargi mais l'effet est assez minime.

### III.1.5 Intérêt du montage 4 fils

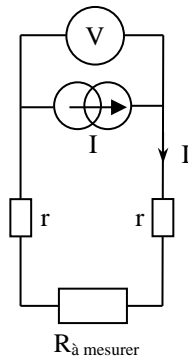
Les capteurs à résistance métallique ont des avantages mais ils ont aussi des inconvénients. On a déjà vu qu'ils étaient peu sensibles. Un autre souci est leur faible résistivité électrique. Cette caractéristique fait qu'il est difficile d'avoir une résistance forte dans un encombrement réduit → la valeur peu élevée d'une Pt 100 associée à une sensibilité limitée oblige à tenir compte de la résistance des câbles de liaison si on veut éviter une erreur systématique importante. On peut éliminer ce biais en procédant à une mesure dite en 4 fils. Le schéma de gauche sur la figure suivante représente le principe de mesure d'une résistance avec un ohmmètre :

<sup>9</sup> Equilibre thermique, milieu homogène, ... pour le bain. Stabilité, vitesse de la mesure, ... pour le multimètre.

<sup>10</sup> Ces valeurs s'obtiennent à partir de la sensibilité thermique de la résistance de platine par la relation  $\Delta T = \Delta R/(\alpha.R)$ .

<sup>11</sup> On peut raisonnablement exclure cette sonde car la dispersion sur ses mesures est beaucoup plus forte que celle des 4 autres capteurs qui ont, pour leur part, un comportement assez proche les uns des autres.

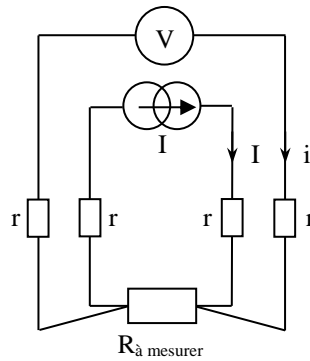
Mesure classique (2 fils)



$$V = rI + RI + rI$$

$$\rightarrow V/I = r + R + r$$

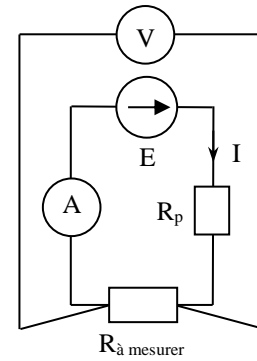
Mesure 4 fils



$$Z_{\text{voltmètre}} \approx \infty \rightarrow i \approx 0$$

$$\rightarrow V = ri + R(I + i) + ri \approx RI$$

Montage de principe



L'appareil envoie un courant  $I$  de valeur connue dans la résistance via deux bornes et mesure la tension  $V$  apparaissant sur ces mêmes bornes. Il en déduit alors  $R$  en calculant le rapport  $V/I$ . En procédant de la sorte, il surestime la tension aux bornes de  $R$  puisqu'il prend aussi en compte les chutes de tension intervenant le long des fils de liaison<sup>12</sup>  $\rightarrow$  le rapport  $V/I$  lui donne  $R + r_{\text{fils de liaison}}$  et non pas  $R$ . On peut éliminer cette erreur systématique en mesurant la tension avec des fils différents de ceux qui servent à envoyer le courant (schéma du centre). L'impédance d'un voltmètre étant idéalement infinie, on peut considérer qu'il n'y a pas de courant circulant dans ces cordons. Il n'y a par conséquent aucune chute de potentiel dans le circuit de mesure de  $V \rightarrow$  La rapport  $V/I$  donne alors une estimation plus juste de  $R$ <sup>13</sup>. Voici à titre indicatif les résultats obtenus avec les capteurs utilisés précédemment :

Résistance	1	2	3	4	5
$R_{\text{eau/glace}} (\Omega)$ en 2 fils	100,05	100,058	100,35	100,55	100,29
$R_{\text{eau/glace}} (\Omega)$ en 4 fils	99,49	100,00	99,80	99,99	99,71

On constate que la mesure en 2 fils donne systématiquement un résultat supérieur d'environ 0,5 - 0,6  $\Omega$  sur la mesure en 4 fils<sup>14</sup>. C'est un écart faible dans l'absolu mais il entraîne une erreur systématique de plus de 1  $^{\circ}\text{C}$  si on tient compte de la sensibilité de la résistance de platine ! Il faut donc corriger ce biais si on veut une mesure précise.

### Remarque :

Si on ne dispose pas de multimètre 4 points, on peut réaliser un montage de principe à l'aide d'appareils classiques. Il suffit de reproduire le schéma de droite en remplaçant le générateur de courant par un générateur de tension de quelques volts. Le plus gros souci alors est de ne pas envoyer un courant trop fort dans le capteur  $\rightarrow$  on peut rajouter une résistance de protection de l'ordre de 1000  $\Omega$  pour limiter l'intensité de mesure.

### III.1.6 Mesure à un autre équilibre monovariant

Si on dispose d'azote liquide, on peut mesurer sa température d'ébullition. Si on souhaite réaliser cette expérience, il vaut mieux prendre un « vieux » capteur qui ne risque plus grand-chose et l'introduire progressivement dans l'azote liquide afin de limiter le choc thermique et les contraintes mécaniques. On peut alors mesurer

<sup>12</sup> On a supposé que les fils de liaisons ont tous la même résistance pour simplifier les écritures.

<sup>13</sup> Mais il reste encore les résistances des contacts.

<sup>14</sup> Cette valeur dépend de la longueur des câbles de liaison et de leur section ; elle dépend donc du modèle de sonde utilisé.



sa résistance par la méthode des 4 fils, en déduire la température par l'équation de Callendar Van Dusen appropriée à cette gamme de température, et comparer à la valeur attendue ( $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  sous une pression de 1 bar). A noter que le point fixe le plus proche retenu dans l'EIT 90 est le point triple de l'argon ( $-189,344\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### III.1.7 Phénomène d'auto échauffement

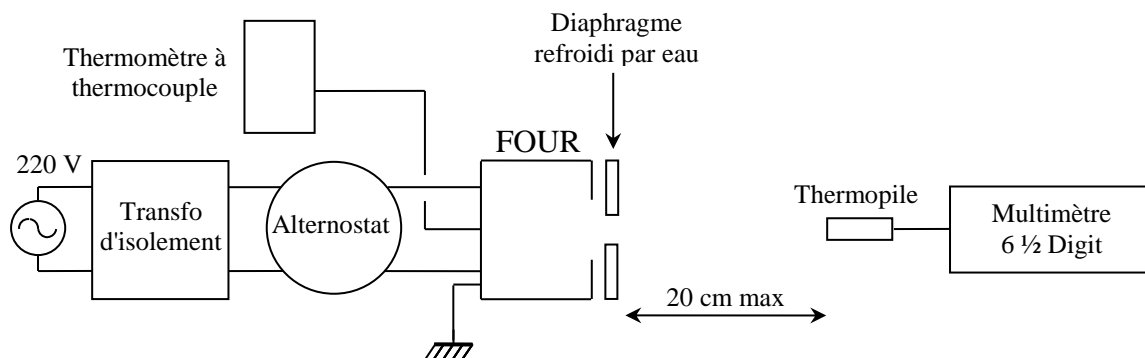
Ce phénomène, commun à tous les capteurs de température résistif (élément métallique ou thermistance), est lié à l'injection d'un courant  $I$  pour mesurer  $R$  : la circulation de  $I$  dans  $R$  s'accompagne d'une dissipation de puissance électrique  $P = R.I^2$  sous forme de chaleur dans le composant  $\rightarrow$  l'échauffement qui en résulte provoque une augmentation de sa résistance<sup>15</sup> qui fausse alors la mesure de température. Cet effet est cependant délicat à mettre en évidence car les courants utilisés par les multimètres sont faibles (de l'ordre du mA pour mesurer  $100\text{ }\Omega$ )  $\rightarrow$  la puissance dissipée est inférieure au mW et il faut une sonde en équilibre thermique depuis suffisamment longtemps, dans un milieu de température très stable pour observer sans ambiguïté l'auto échauffement qui en résulte. Ces conditions étant difficiles à réunir expérimentalement, on ne propose pas de manipulation<sup>16</sup>. Il faut cependant savoir que cet effet existe et qu'il peut être source d'erreur **sauf** aux points fixes où l'invariance/mono variance des équilibres assure une température fixe.

### III.2 Pyromètre optique

Au-delà d'une certaine température, les mesures s'effectuent par l'étude du rayonnement des corps. On illustre ici le principe du pyromètre à radiation totale. Cette expérience est déjà proposée dans le montage « Emission, Absorption »  $\rightarrow$  s'y reporter pour plus de précisions.

Montage :

[8], p.103



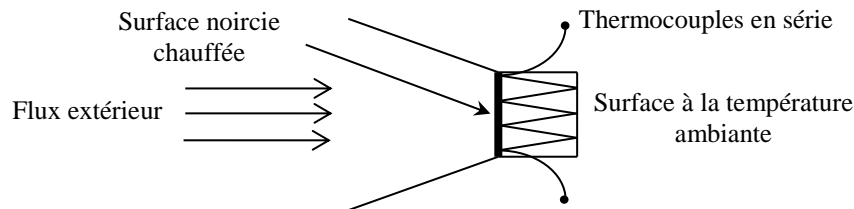
On alimente le four avec une tension comprise entre 200 et 220 V et on note la tension aux bornes de la thermopile pour des températures de four comprises entre 100 et 500  $^{\circ}\text{C}$  par palier de 50 $^{\circ}$ .

Exploitation :

Le détecteur devant mesurer un flux énergétique total, il doit avoir une réponse spectrale plate, d'où le choix de la thermopile malgré sa faible sensibilité. Ce détecteur, de par son principe de fonctionnement (cf. [8], p. 78), mesure en fait la différence entre la température  $T$  du four et celle du milieu ambiant (plus précisément la température à l'arrière de la sonde). On peut le vérifier lorsque le four est à l'ambiante : la tension aux bornes de la thermopile doit alors être nulle.

<sup>15</sup> Raisonnement valable pour un métal ; C'est l'inverse pour une thermistance CTN.

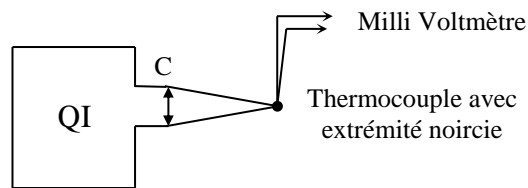
<sup>16</sup> Si on tient à faire une expérience, il vaut mieux utiliser le montage de principe, diminuer la valeur de  $R_P$  pour augmenter le courant de mesure, et faire une étude dans l'air ambiant qui est un gaz (un milieu qui évacue beaucoup moins bien la chaleur qu'un liquide). La mesure initiale de la résistance doit alors être inférieure aux mesures suivantes.



L'expérience doit donc permettre de vérifier que le signal aux bornes de la thermopile est proportionnel à  $T^4 - T_0^4$ . Le facteur de proportionnalité dépend de la sensibilité de la thermopile, de la géométrie du montage et est proportionnelle à la constante de Stéfán. Se reporter au montage « Emission, Absorption » pour un exemple de résultat.

**Remarque :**

On peut illustrer simplement le principe de fonctionnement d'une thermopile :



Pour que l'expérience soit probante, il faut condenser un maximum de lumière sur le capteur pour avoir un échauffement important → il faut utiliser un condenseur de très courte focale, ajuster le tirage de lampe au maximum et placer l'extrémité du thermocouple à l'endroit précis du point de convergence. Pour ce faire, il est préférable de fixer le thermocouple sur un support stable. On peut alors rechercher l'échauffement maximum en déplaçant progressivement le capteur tout en notant l'évolution de la tension aux bornes du thermocouple.

## IV AUTRES THERMOMETRES

Il existe de nombreux systèmes permettant de mesurer des températures ; il n'est pas question d'en faire une présentation exhaustive. On s'intéressera plus particulièrement à deux capteurs couramment employés, les thermistances et les thermocouples.

### IV.1 Les thermistances CTN

[2], p. 279 ; [5], p. 365 ; [9], p. 111 ; [11], p. 129.

#### IV.1.1 Introduction

Il existe différents types de thermistances. Les plus courantes sont celles à coefficient de température négatif (CTN). Ce sont des céramiques constituées d'un agglomérat d'oxydes métalliques semi-conducteurs poly cristallins ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{ZnTiO}_4$ ,  $\text{NiMn}_2\text{O}_4$ , ...). Les mécanismes de conduction électrique dans ce type de matériau sont assez complexes<sup>17</sup> mais si la dépendance en température de la résistivité d'un métal est due à la variation de la mobilité d'un nombre constant de porteurs de charge, c'est surtout la concentration en porteurs qui est modifiée ici. L'agitation thermique agit de manière similaire au cas des semi-conducteurs classiques<sup>18</sup> en faisant apparaître des porteurs de charges supplémentaires qui participent à la

<sup>17</sup> Différents processus activés thermiquement peuvent intervenir : la création de paires électrons/trous comme dans le silicium ou le germanium, mais aussi un phénomène de « hopping », c'est-à-dire le saut d'électrons positionnés sur des ions positifs de valence  $n$  (donneurs) vers des ions positifs de même nature mais de valence  $n + 1$  (accepteurs). Cela est rendu possible par la présence d'oxydes de métaux de transition (Mn, Co, Ni, Cu, Fe, ...) sous différents degrés d'oxydation, situés à proximité les uns des autres dans des sites d'insertion d'une structure cristalline de type spinelle.

<sup>18</sup> On peut glaner des informations sur ce point dans le montage consacré aux semi-conducteurs.

conduction électrique → La résistivité de l'élément diminue lorsque T augmente, d'où le qualificatif de capteurs CTN.

#### Loi de variation approchée :

On peut décrire la courbe  $R = f(T)$  des thermistances CTN avec une précision raisonnable dans une gamme de température restreinte par la relation suivante<sup>19</sup> :

$$R = R_N \cdot \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right] \quad \text{avec la température en Kelvin}$$

B est l'indice de sensibilité thermique. Il est spécifique au matériau mais n'est pas constant en toute rigueur → Les constructeurs donnent sa valeur calculée à partir de deux points<sup>20</sup> ( $R_1, T_1$ ) et ( $R_2, T_2$ ) de la courbe  $R(T)$  avec une formule déduite de la relation précédente :

$$B_{1/2} = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \quad \text{avec la température en Kelvin}$$

Les variations de B étant faibles entre 0 et 100 °C et on peut considérer en première approximation que B est constant dans cette gamme de température. La courbe  $R = f(1/T)$  doit donc présenter une évolution en forme d'exponentielle.

#### Coefficient de température :

On obtient son expression en dérivant la loi exponentielle par rapport à T :

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}$$

On constate que la sensibilité thermique n'est pas constante. Elle est plus forte aux basses températures et diminue quand T augmente. La zone de forte sensibilité dépend de la valeur de B. La plupart des thermistances rencontrées dans le commerce ont un coefficient B compris entre 3000 et 4000 K qui leur permet d'être typiquement 10 fois plus sensibles que les résistances métalliques aux températures proches de l'ambiante. **C'est le principal intérêt de ce type de capteur.** On s'en sert couramment pour faire de la régulation de température ou pour produire des thermomètres sensibles à peu de frais. L'interchangeabilité est par contre moins bonne si on ne procède pas à une sélection des composants car les tolérances de fabrication sont généralement de l'ordre de 10 %.

#### IV.1.2 Mesures

Il faut explorer une gamme de température suffisamment large pour observer le caractère exponentiel de la caractéristique. Un indice de sensibilité thermique B d'environ 3500 K permet une étude entre 0 et 100 °C → La manipulation a été testée avec une thermistance possédant les caractéristiques suivantes<sup>21</sup> :

$R_{25} (\Omega)$	$\Delta R_{25}/R_{25} (\%)$	$B_{25/100} (K)$	$\Delta B_{25/100}/B_{25/100} (\%)$
1 000	5	3730	3

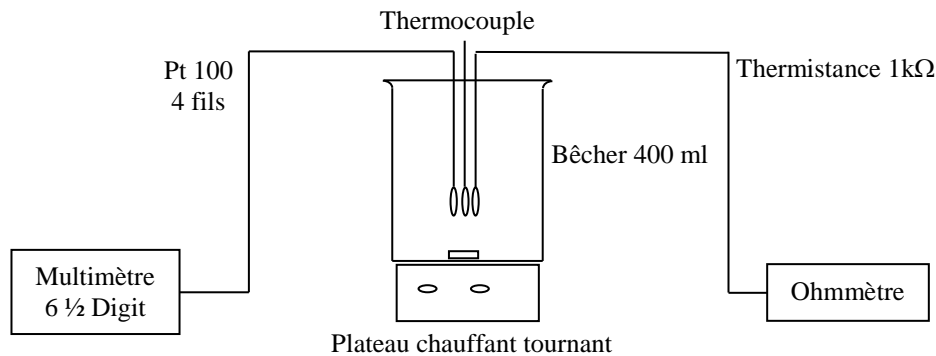
<sup>19</sup> Si on veut des mesures plus précises, il faut utiliser les courbes caractéristiques  $R(T)$  éventuellement fournies par le constructeur ou recourir à l'équation de Steinhart-Hart.

<sup>20</sup> Ils se réfèrent souvent aux températures de 25 °C et 100 °C et donnent la valeur  $B_{25/100}$  dans leur datasheet. On peut parfois trouver  $B_{0/100}$ ,  $B_{100/200}$ . Ces valeurs sont aussi calculées avec l'expression de  $B_{1/2}$ .

<sup>21</sup> Composant disponible chez Radiospares sous la référence 191-2235.

Mesure de  $T_{\text{ambiante}}$  à 100 °C :

On peut profiter de cette manipulation pour étalonner dans le même temps un thermocouple (cf. § IV.2.2 pour le montage).



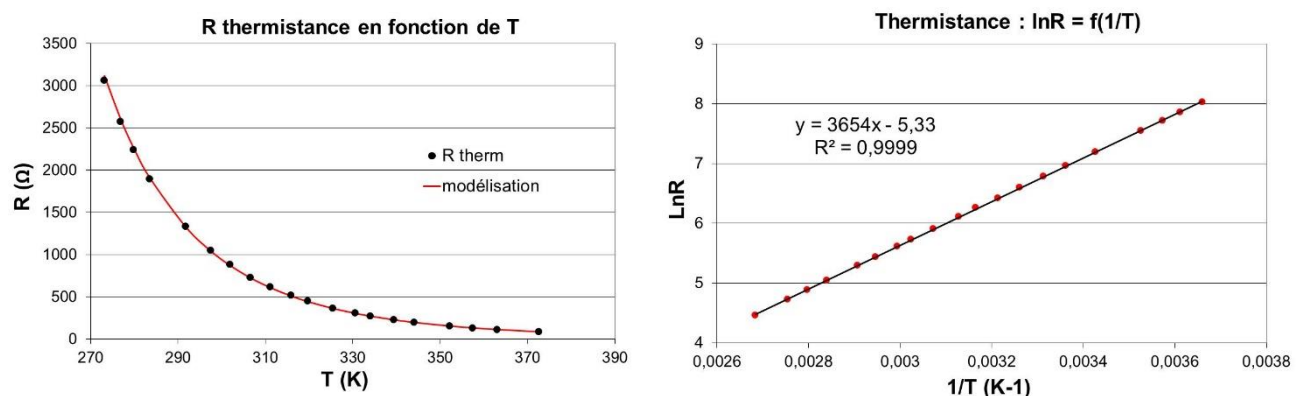
On porte de l'eau à ébullition, on arrête alors le chauffage et on prend les mesures pendant le refroidissement en agitant pour avoir un milieu homogène. La température est mesurée à l'aide d'une sonde de platine, la conversion  $R \rightarrow T$  étant faite avec l'équation de Callendar. On peut gagner du temps en filmant l'affichage des appareils avec une webcam. Une fois le refroidissement terminé, on n'a plus qu'à repasser le film pour prendre les mesures. A noter qu'on peut remplacer l'eau par de l'huile (de friture par exemple) si on souhaite faire des mesures au-dessus de 100 °C.

Mesure entre 0 °C et  $T_{\text{ambiante}}$  :

On peut descendre en dessous de la température ambiante et aller jusqu'à une température proche de 0 °C en rajoutant progressivement des petites quantités de glace pilée (cette méthode peut aussi servir à accélérer la redescente en température dans l'expérience précédente lorsqu'on s'approche de l'ambiante). Il faut maintenir l'agitation et attendre à chaque fois que la glace fonde totalement avant de prendre une mesure. On peut terminer par un mélange eau/glace pour avoir les données à 0 °C.

## IV.1.3 Résultats

Voici à titre indicatif le résultat d'une série de mesure.



L'analyse de la courbe  $R = f(T)$  permet de faire les constatations suivantes : la réponse est non linéaire et la sensibilité absolue est plus grande à basse température. La courbe  $\ln R = f(1/T)$  est une droite, ce qui valide l'hypothèse simplificatrice  $B = \text{cte}$  :

$$R = R_N \cdot \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right] \rightarrow \ln R = \ln R_N - \frac{B}{T_N} + \frac{B}{T}$$

La pente de la droite  $\ln R = f(1/T)$  permet d'obtenir l'indice de sensibilité thermique. On trouve  $B = 3650$  K avec nos mesures, une valeur qui concorde avec celle annoncée par le constructeur (2 %

d'écart<sup>22</sup>). On peut en déduire la sensibilité thermique  $\alpha$  pour quelques températures ( $\alpha_{Th} = -B/T^2$ ) et la comparer à celle d'une résistance de platine ( $\alpha_{Pt} = 0,38/R_T$ ) :

T (°C)	0	20	40	60	80	90	100
$\alpha_{Th} (K^{-1})$	-0,049	-0,042	-0,037	-0,033	-0,029	-0,028	-0,026
$\alpha_{Pt} (K^{-1})$	0,0039	0,0036	0,0033	0,0031	0,0029	0,0029	0,0028

On constate que la thermistance est environ 10 fois plus sensible que la résistance de platine → Comme  $\Delta R/R = \alpha \Delta T$ , la détermination d'une température au dixième de degré près nécessite une mesure de résistance à 0,4 % alors qu'il faut un appareil 10 fois plus précis avec le platine. On peut donc utiliser un appareil moins onéreux, en gardant une bonne précision de mesure si on connaît bien les caractéristiques de la thermistance. Cette sensibilité est aussi mise à profit dans la réalisation de régulations de température (thermostats d'ambiance par exemple).

#### IV.1.4 Dispersion

L'utilisation d'une résistance de platine respectant la classe A est un avantage en cas de changement de sonde car la dispersion tolérée dans cette classe conduit à des différences de température assez faibles<sup>23</sup> suivant le capteur. C'est moins le cas avec les thermistances car les constructeurs garantissent les caractéristiques avec une tolérance plus lâche. On peut comparer plusieurs exemplaires d'un même modèle pour s'en convaincre.

##### Manipulation :

On a 6 exemplaires de la thermistance utilisée précédemment. Le constructeur donnant des tolérances à 25 °C, il serait préférable de faire les mesures à cette température. L'absence de régulation de température nous a conduits à faire cette étude à 0 °C et 100 °C :

Thermistance	1	2	3	4	5	6
$R_0 (\Omega)$	3079	3065	2934	2944	2906	2977
$R_{100} (\Omega)$	84,3	84,2	78,6	78,6	78,4	79,6
$B_{0/100} (K)$	3667	3664	3690	3693	3682	3691
$T_{100} (°C)$	99,5	99,4	100,3	100,4	100,0	100,4

##### Analyse :

La dispersion<sup>24</sup> sur  $R_0$  et  $R_{100}$  est de l'ordre de 3 %, ce qui est cohérent avec les 5 % annoncés pour  $R_{25}$ . On s'est servi des valeurs  $R_0$  et  $R_{100}$  pour calculer l'indice de sensibilité thermique de chaque capteur avec l'expression du § IV.1.1. La dispersion sur  $B$  est alors de l'ordre de 0,3 %, une valeur assez faible comparée à celle annoncée par le constructeur (3 %). Ces écarts sont cependant suffisants pour poser des problèmes d'interchangeabilité si on veut des mesures précises. Pour le vérifier, on a calculé la température de l'eau à ébullition pour chaque thermistance en prenant leurs valeurs de  $R_0$  et  $R_{100}$ , mais avec l'indice moyen de sensibilité thermique calculé sur les 6 capteurs → On trouve une température moyenne de 100 °C cohérente avec le fait que la pression atmosphérique était alors de 1013 mbar, mais la dispersion est un peu plus forte qu'avec les Pt 100. Les résultats sont donc assez bons dans l'absolu mais ils n'atteignent pas ceux obtenus avec les Pt 100.

#### IV.1.5 Applications

On peut illustrer le principe d'une régulation de température (cf. [3], p.452) ou mesurer une très faible variation de température. On peut par exemple réaliser un montage à transistor à émetteur commun et faire varier légèrement sa température en

<sup>22</sup> Il tombe à 0,5 % si on calcule  $B_{25/100}$  à partir des valeurs  $R_{25}$  et  $R_{100}$  mesurées.

<sup>23</sup> Inférieures à 0,2 °C.

<sup>24</sup> Les dispersions ont été calculées en faisant le rapport de l'écart type à la valeur moyenne.

modifiant la valeur du courant  $I_C$  (cf. [3], p. 160). On fixe un radiateur sur le transistor qu'on remplit de graisse thermo conductrice et dans lequel on place la thermistance pour mesurer  $T$ . On doit alors observer que la tension  $V_{BE}$  varie en fonction de la température. Cette propriété est mise à profit pour réaliser des thermomètres à jonction semi-conductrice (cf. [9], p. 113 ; [5], p. 369 ; [12], p. 185).

## IV.2 Les thermocouples

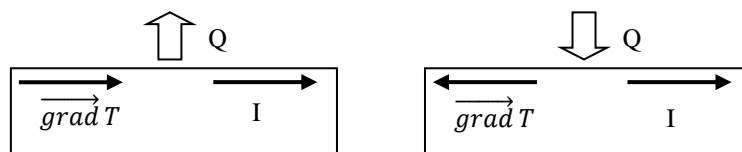
[2], p. 177 à 188 ; [11], p. 82-85 et 132 ; [5], ch. 19 et 20 ;

montage « Métaux - Semi-conducteurs »

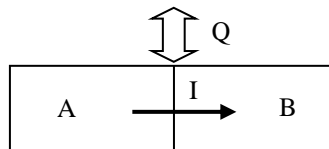
### IV.2.1 Introduction

Les thermocouples mettent à profit l'effet Seebeck, un des trois effets thermoélectriques autre que l'effet Joule :

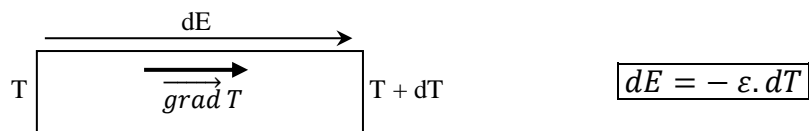
- l'effet Thomson est l'effet thermique qui accompagne le passage d'un courant électrique stationnaire dans un conducteur ohmique soumis à un gradient de température. Il y a absorption ou dégagement de chaleur suivant le sens du courant et du gradient de température.



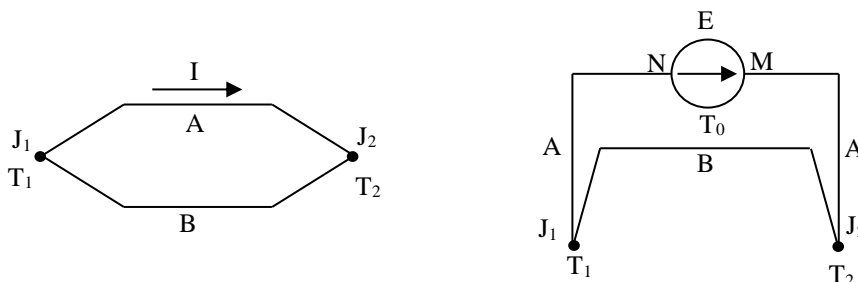
- l'effet Peltier est l'effet thermique qui accompagne le passage d'un courant électrique à travers une jonction de deux milieux conducteurs A et B à la même température. Il y a absorption ou dégagement de chaleur suivant le sens du courant et la nature des matériaux.



- l'effet Seebeck est l'apparition d'une force électromotrice aux bornes d'un échantillon conducteur soumis à un gradient de température<sup>25</sup> :



La mesure absolue de cette f.é.m. n'est pas possible avec du matériel courant car l'utilisation de cordons de liaison induit des effets thermoélectriques supplémentaires (cf. montage métaux). On doit donc considérer au minimum l'association de deux conducteurs A et B :



<sup>25</sup> Il n'y a pas d'incompatibilité entre l'expression de  $dE$  et les orientations du schéma car le sens réel de la f.é.m. dépend du signe des coefficients thermoélectriques (cf. montage métaux).

S'ils forment deux jonctions  $J_1$  et  $J_2$  maintenues à des températures différentes  $T_1$  et  $T_2$  en étant en circuit fermé, il apparaît alors un courant (expérience historique de Seebeck). Si on interpose un voltmètre, on mesure une f.é.m  $E$ . On a alors :

$$E = V_M - V_N = \int_N^{J_1} dV + \int_{J_1}^{J_2} dV + \int_{J_2}^M dV$$

$$E = \int_{T_0}^{T_1} -\varepsilon_A dT + \int_{T_1}^{T_2} -\varepsilon_B dT + \int_{T_2}^{T_0} -\varepsilon_A dT = \int_{T_2}^{T_1} -\varepsilon_A dT + \int_{T_1}^{T_2} -\varepsilon_B dT$$

Soit finalement

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (\varepsilon_A - \varepsilon_B) dT = \int_{T_1}^{T_2} Q dT$$

La f.é.m. dépend des coefficients thermoélectriques  $\varepsilon$  des deux métaux et de l'écart de température entre les deux jonctions.  $Q$  correspond au pouvoir thermoélectrique du thermocouple. La relation  $E = f(T)$  n'est en général pas linéaire car la valeur de  $Q$  peut varier en fonction de la température. Il existe de nombreux thermocouples (l'effet est présent dans n'importe quel milieu conducteur). Un des plus courant est le thermocouple de type K qui consiste en une jonction Chromel (borne + : alliage 90 % nickel, 10 % chrome) et Alumel (borne - : alliage 95% nickel, 2 % aluminium, 2 % manganèse, 1 % silicium). C'est un thermocouple très stable avec une loi  $E(T)$  pratiquement linéaire ( $Q \approx 40 \mu\text{V.K}^{-1}$ ) et qui peut s'utiliser de  $-200^\circ\text{C}$  jusqu'à  $1260^\circ\text{C}$  si la constitution de la sonde le permet. Des tables donnent aussi sa f.é.m. en fonction de la température (cf. Handbook par exemple) mais attention, il faut parfois ajouter un décalage aux valeurs qu'elles donnent selon la température de référence de la table.

#### Remarques :

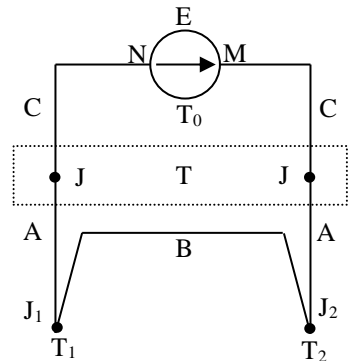
- Ajouter des fils de liaison  $C$  ne perturbe pas les mesures s'ils sont de même nature et si leurs extrémités sont à la même température car on a alors :

$$E = V_M - V_N = \int_N^J dV + \int_J^{J_1} dV + \int_{J_1}^{J_2} dV + \int_{J_2}^J dV + \int_J^M dV$$

$$E = \int_{T_0}^T -\varepsilon_C dT + \int_T^{T_1} -\varepsilon_A dT + \int_{T_1}^{T_2} -\varepsilon_B dT + \int_{T_2}^T -\varepsilon_A dT + \int_T^{T_0} -\varepsilon_C dT$$

$$E = \int_T^{T_1} -\varepsilon_A dT + \int_{T_1}^{T_2} -\varepsilon_B dT + \int_{T_2}^T -\varepsilon_A dT$$

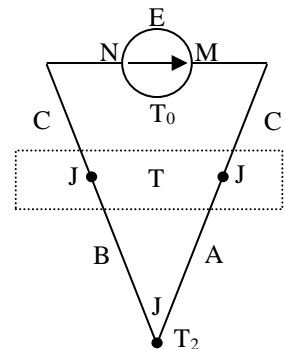
$$E = \int_{T_1}^{T_2} (\varepsilon_A - \varepsilon_B) dT = \int_{T_1}^{T_2} Q dT$$



- On peut envisager une mesure avec un seul thermocouple mais il faut dans ce cas connaître la température  $T$  à l'autre extrémité de la sonde :

$$E = \int_{T_0}^T -\varepsilon_C dT + \int_T^{T_2} -\varepsilon_B dT + \int_{T_2}^T -\varepsilon_A dT + \int_T^{T_0} -\varepsilon_C dT$$

$$E = \int_T^{T_2} (-\varepsilon_B) dT + \int_{T_2}^T (-\varepsilon_A) dT = \int_T^{T_2} (\varepsilon_A - \varepsilon_B) dT = \int_T^{T_2} Q dT$$

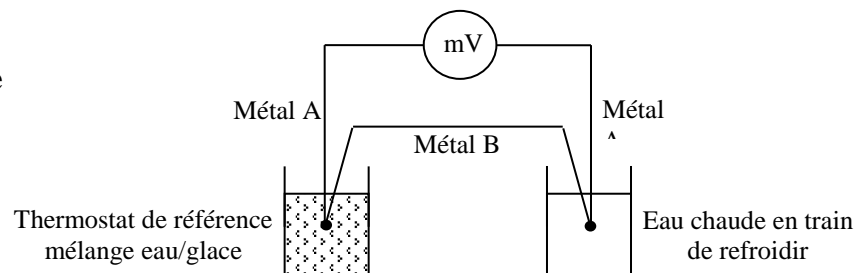


Les thermomètres électroniques à un seul thermocouple fonctionnent sur ce principe. Le capteur est alors directement connecté à l'instrument de mesure. L'absence de fils intermédiaires de liaison fait qu'il faut connaître la température  $T_0$  de l'appareil, ce qui est fait grâce à une thermistance placée à l'intérieur du boîtier. La méthode peut sembler étonnante car il faut quand même un deuxième capteur et on peut se demander pourquoi on n'utilise pas directement la thermistance. L'avantage d'un tel système est qu'on dispose d'une sonde de mesure (le thermocouple) robuste pouvant faire des mesures sur une gamme plus étendue (les thermistances ont une plage d'utilisation limitée).

#### IV.2.2 Mesures

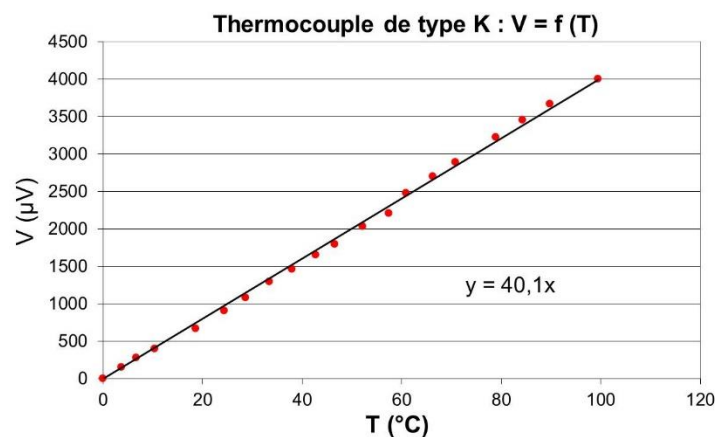
Le protocole est le même que pour la thermistance :

**Attention au sens de branchement des thermocouples !**



#### IV.2.3 Exploitation

Voici à titre indicatif le résultat d'une série de mesure effectuée avec des thermocouples de type K :



La courbe obtenue est approximativement une droite (cf. [2], p. 120 et 287) → avec cette hypothèse, la pente de la régression linéaire correspond au pouvoir thermoélectrique. On trouve ici  $Q = 40,1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , la valeur typique des thermocouples de type K.  $Q$  correspond à la sensibilité thermique du capteur<sup>26</sup>. Elle est très faible et il faut un voltmètre sensible pour effectuer les mesures. On peut terminer en remarquant que le thermocouple est, au contraire des capteurs résistifs, un capteur actif qui n'est pas soumis au phénomène d'auto échauffement.

#### IV.2.4 Application

Une fois vérifié l'accord entre les tables et l'expérience, on peut utiliser les thermocouples pour mesurer la température de fusion de l'étain (cf. montage transition de phase).

<sup>26</sup> Elle n'est donc n'est donc pas définie tout à fait de la même manière que pour les capteurs résistifs



Bibliographie :

- [1] : Bertin Faroux : Thermodynamique ; chapitres 2 et 3 (clair et succinct)
- [2] : Quaranta ; tome II : La thermodynamique (nouvelle édition)
- [3] : Quaranta III
- [5] : Pérez : Thermodynamique
- [7] : BUP n° 687
- [8] : Sextant : optique expérimentale
- [9] : Duffait : Expériences d'électronique à l'agrégation de physique
- [10] : Georges Asch : Les capteurs en instrumentation industrielle (5<sup>ème</sup> édition)
- [11] : Labether : Mesures thermiques ; température et flux
- [12] : Bureau national de métrologie (BNM) : l'EIT 90