

# THERMOMETRIE

## I INTRODUCTION

### 1.1 Définitions

réf. (1), p. 12 ; réf. (2), ch. 20 ; réf. (3), p. 13 à 16 ; réf. (5), p. 116

La température est une grandeur intensive qui traduit l'état thermique d'un système ; c'est plus précisément la variable d'état qui traduit le degré d'agitation des particules microscopiques qui constituent le système. C'est une grandeur macroscopique non réductible aux autres paramètres macroscopiques (mécaniques, électriques ou autres) dont l'introduction est nécessaire pour décrire complètement les systèmes à l'échelle à l'échelle macroscopique. Elle est spécifique de la théorie thermodynamique, l'autre grandeur étant l'entropie.

Il y a plusieurs définitions théoriques équivalentes de la température ; il convient d'avoir à l'esprit les notions suivantes :

- la température thermodynamique est celle introduite à l'énoncé du second principe. Il en découle sa définition fondamentale liée à l'énergie interne et 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 (BFR ch. 2 § 3 ; Pérez ch. 2 § III) ; c'est une mesure de son énergie cinétique microscopique et 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 expérimentalement une échelle de température appelée la température absolue.

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

### 1.2 Echelle internationale de température

On mesure actuellement les températures en utilisant l'échelle internationale de température de 1990 (EIT 90) dont la construction est faite logiquement en 3 étapes :

- 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....).

### 1.3 Remarque

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

- agitez le liquide dont vous voulez repérer la température (agitateur en verre ou magnétique) afin d'éviter les gradients de température.
- évitez les ponts thermiques.
- utilisez de la glace pilée pour réaliser les bains à 0°C
- **il faut s'assurer que le milieu étudié est en équilibre thermique !**

## II PRINCIPE DU THERMOMETRE A GAZ

### 2.1 Montage

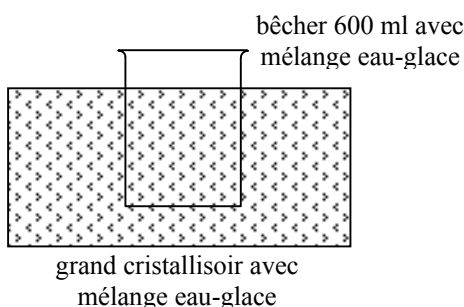
On utilise la relation de proportionnalité entre la pression de l'air et la température à volume constant. Le matériel est constitué d'un flacon en verre relié à un manomètre électronique différentiel de marque Digitron (un manomètre absolu sera présent à l'oral). Pour mesurer une température inconnue, par exemple celle de l'ébullition de l'eau on procédera en deux étapes :

- mesure de la pression du gaz dans le thermostat de référence : point de fusion de la glace à 273,15 (à défaut du point triple de l'eau).
- mesure de sa pression dans la source de température inconnue T (attention au bouchon, le ballon est alors en surpression).

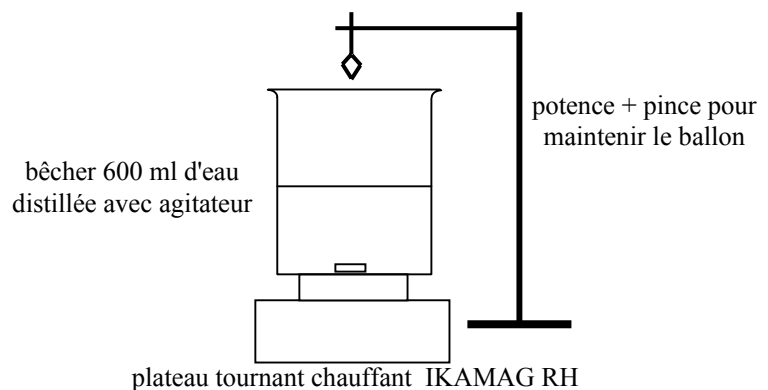
#### Réalisation des thermostats :

Contrôlez leur température avec un thermomètre de précision (prendre des thermomètres en verre adaptés à chaque température). Laissez l'équilibre thermique s'installer. Pour le mélange eau-glace, utilisez de la glace fondue comme eau pour faire durer le mélange et n'en mettez qu'une quantité suffisante.

THERMOSTAT 0 °C



THERMOSTAT 100 °C



### Préparation du ballon :

Cette expérience est très perturbée par la présence d'eau liquide car la pression de vapeur saturante varie très vite avec la température. Ainsi, une goutte d'eau dans le flacon introduit à 100°C une surpression (risquée pour le matériel et l'opérateur) de l'ordre de 1 bar ! Un peu de buée crée déjà une erreur importante.

**→ avant de fermer le flacon,**  
**séchez l'intérieur du ballon ainsi que le bouchon avec un sèche cheveux.**

### Précaution de mesure :

L'ensemble du ballon doit plonger complètement dans le thermostat (c'est la source d'erreur la plus fréquente) → plongez le ballon jusqu'au niveau du bouchon mais sans le recouvrir.

L'air dans le ballon est un isolant thermique. Il met donc un certain temps avant d'atteindre la température du thermostat → attendre suffisamment longtemps avant de noter la valeur de la pression.

## **2.2 Mesures**

$$V = \text{cte} \rightarrow \text{l'équation des gaz parfaits donne } \frac{P_{100} V}{P_0 V} = \frac{T_{100}}{T_0} = \frac{P_{100}}{P_0}$$

Le manomètre utilisé étant différentiel, il mesure  $P_x = P_{\text{atm}} + \Delta P_x$  ; on obtient donc la température par la relation suivante :

$$T_{100} = \frac{P_{\text{atm}} + \Delta P_{100}}{P_{\text{atm}} + \Delta P_0} T_0$$

La température s'exprimant évidemment en kelvin ; demandez la valeur de la pression atmosphérique au professeur.

### Remarques :

On pourra estimer l'erreur systématique due au volume résiduel qui n'est pas porté à la température de mesure (volume du tuyau de liaison). A cet égard, vous remarquerez que le tuyau n'est pas très long : ce n'est pas pratique mais on minimise ainsi l'erreur !

Si la pression atmosphérique n'est pas normale (1013 mbar), vérifiez que la correction à apporter sur la température d'ébullition de l'eau est négligeable (cf. Handbook page D-136).

L'air n'est pas rigoureusement un gaz parfait, il s'agit donc d'une expérience de principe. Il faudrait en toute rigueur réaliser les mesures avec des pressions initiales de plus en plus faibles et extrapoler le rapport des produits PV lorsque P tend vers zéro (cf. ref. (1), p. 57). Cependant dans les conditions présentes, les écarts à l'idéalité ne peuvent pas être mis en évidence car ils ne dépassent pas 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  $\frac{P_{100} V}{P_0 V}$  valant 1.36610, on obtient pour la température d'ébullition de l'eau sous atmosphère normale la valeur  $T_{100} = 273.15 \times 1.36610 = 373.15$  K soit une différence de 100 degrés entre les deux températures

comme dans l'échelle Celsius. C'est pour obtenir un tel ajustement entre les deux échelles qu'on a choisit la valeur numérique particulière de l'étalon de température.

### **III THERMOMETRES D'INTERPOLATION LEGAUX**

#### **3.1 Thermomètre à résistance de platine**

##### **3.1.1 Introduction**

C'est l'instrument légal d'interpolation entre 19 K et 937 K ; 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) que l'on utilise à Rennes, les équations d'interpolation retenues (cf. réf. (4), p. 204 - 220 ou réf. (5), p. 279) sont encore celle de l'EIPT 68 (ancienne échelle de température) à savoir :

$$R_T = R_0 (1 + A.T + B.T^2) \text{ pour } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 962^\circ\text{C}$$

$$R_T = R_0 [1 + A.T + B.T^2 + C.T^3(T - 100)] \text{ pour } -200^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$$

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

La valeur des résistances de platine utilisées pour la thermométrie industrielle sont normalisées : on les nomme en général par la valeur qu'elle prennent à 0 °C (les plus courantes sont les Pt 100 ou les Pt 1000 - respectivement 100 et 1000 Ω à 0 °C) et on indique aussi leur classe. La classe correspond au degré de précision garanti sur la valeur de la résistance. Cette précision dépend de la norme suivant laquelle la résistance a été fabriquée. Depuis 1990, les deux normes les plus courantes sont les normes européennes (IEC 751) et américaines (ASTM 1137). Les résistances dont on dispose à Rennes sont des Pt 100 de classe A suivant la norme IEC 751 soit :

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

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

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

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

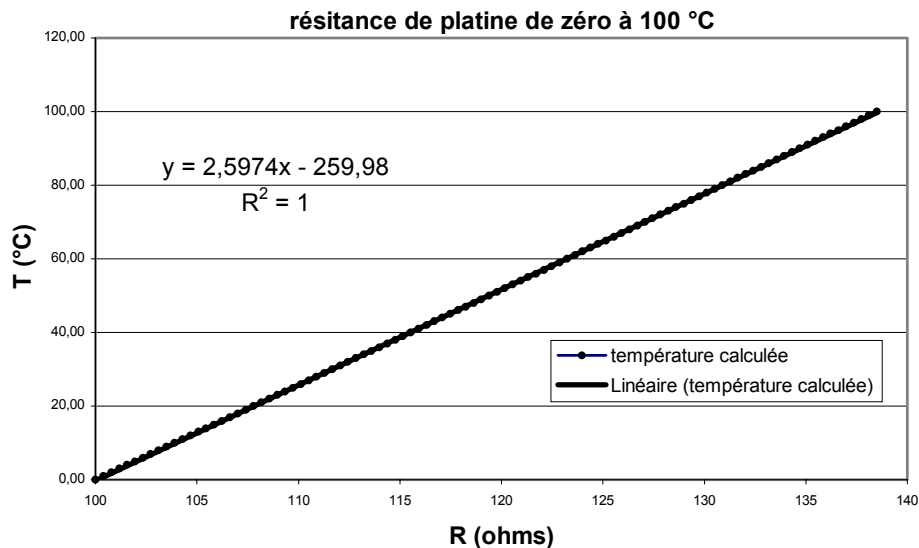
$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

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

La mesure d'une température nécessite alors la détermination de la valeur  $R_0$  de la résistance à 0°C. Il suffit ensuite de résoudre l'équation du 2<sup>nd</sup> degré :

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

Le calcul de T peut s'effectuer sous Excel par exemple. On l'a effectué entre 0 et 100 °C pour une résistance valant exactement 100 Ω à 0 °C et on a tracé la courbe  $T = f(R)$  :



On s'aperçoit alors que la résistance de platine a un comportement pratiquement linéaire dans cette gamme de température (l'écart à la linéarité ne dépasse pas 0,3 %). La sensibilité est donc pratiquement constante : elle vaut environ 2,6 degré par ohm (ou 0,4 ohm par degré). La résistance de platine est donc un capteur peu sensible → il faut un ohmmètre performant pour déterminer une température avec précision.

### 3.1.2 Manipulations possibles

On peut aborder l'étude de la résistance de platine de deux manières :

On peut montrer le principe de l'étalonnage de la résistance de platine par la méthode des points fixes (c'est en effet la mesure de la résistance en différents points qui permet la détermination des coefficients de l'équation de Callendar). Pour une mesure au dessus de 0°C, il en faut donc trois au minimum pour déterminer  $R_0$ , A et B. Deux équilibres mono variants sont facilement accessibles : le mélange eau glace (0 °C) et l'eau à ébullition (100 °C sous 1 atmosphère). Le point fixe suivant facilement accessible en montage est le point de fusion de l'étain (231,928 °C sous atmosphère normale) mais sa mise en œuvre est plus délicate : on est gêné par son oxydation à chaud et il faut que les soudures de la résistance de platine tiennent le coup (pas le cas à Rennes) → l'affaire n'est pas simple. Si on se limite à une étude entre 0 et 100 °C, une alternative consiste à réduire l'équation d'interpolation de la résistance à une loi linéaire. On n'a alors que deux coefficients à déterminer ( $R_0$  et A) → on peut le faire simplement avec un mélange eau-glace et de l'eau bouillante. Cette solution induit cependant une erreur systématique supplémentaire liée à la linéarisation et on ne dispose plus d'un d'autre point fixe pour vérifier l'étalonnage.

Une autre solution consiste à utiliser les valeurs des coefficients recommandées pour la résistance que l'on utilise. La mesure d'une température nécessite alors la détermination d'un seul paramètre (la résistance à 0°C  $R_0$ ). On peut ensuite vérifier la validité de l'équation d'interpolation utilisée en mesurant la température d'ébullition de l'eau. Une fois vérifié l'accord entre la valeur mesurée et celle trouvée par l'équation, on utilisera la résistance de platine comme thermomètre étalon. C'est la solution que l'on a choisit dans ce topo.

#### Remarques :

Le mélange eau glace et l'ébullition de l'eau ne sont pas considérés comme des points fixes dans l'EIT 90 car les transitions de phases qui ont été retenus dans cette échelle

sont des points triples (comme celui de l'eau à 0,01 °C) et des équilibres solides-liquides. Les premiers parce qu'ils sont parfaitement définis ( $P_T$ ,  $P_T$  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 concernant le mélange eau glace et l'ébullition de l'eau.

Il existe deux points fixes à des températures raisonnables : la fusion du Gallium à 29,76 °C et la congélation de l'indium à 156,6 °C mais on ne dispose pas de tels produits, leur mise en œuvre est délicate et leur prix est prohibitif ! → on ne peut présenter en montage que des expériences de principe sur des équilibres monovariants.

### 3.1.1 Mesure de $R_0$

Vous avez à votre disposition cinq Pt 100 montées en montage 4 fils : 4 sont logés dans une gaine inox et sont numérotées de 1 à 4. Une cinquième est logée dans une gaine en verre.

#### Manipulation 1 : intérêt d'un montage 4 fils :

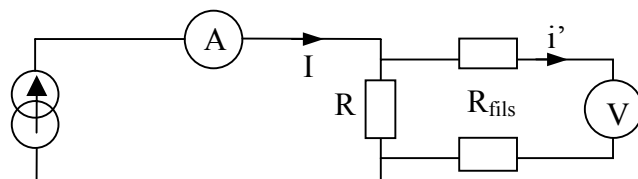
Les variations de résistance étant faibles comparées à celle d'une thermistance, il est préférable d'effectuer si possible une mesure 4 points.

Réalisez un bain de glace dans une enceinte calorifugée de marque Pierron (Dewar rose argenté). Mesurez avec le multimètre Keithley 199 ou 2000 la résistance  $R_0$  d'une de ces quatre résistances. Pour obtenir une valeur stable avec le Keithley 199, appuyez sur la touche « FILTER ». Avec le Keithley 2000, augmentez le temps de conversion via la touche « RATE » (position « SLOW »). Faire une mesure classique puis une mesure en montage 4 fils (entrées "OHMS SENSE"). On peut aussi réaliser avec le Keithley 199 une mesure en 3 fils (n'utilisez qu'une entrée "OHMS SENSE"). Comment évolue la valeur de la résistance ? Quelle est la valeur la plus juste ?

#### Explication :

Le multimètre envoie un courant connu et mesure la d.d.p. à ses bornes pour en déduire  $R$ . Le courant passant dans les fils de mesure, la mesure de  $V$  tient compte alors de la chute de tension dans les fils.

#### Avantage de la méthode 4 fils :



$$Z_{\text{voltmètre}} \approx \infty \\ \Rightarrow i' = 0 \\ \Rightarrow \text{mesure indépendante des fils de liaison}$$

#### Remarque importante :

Le montage s'appelle thermométrie. Il est donc plus important et plus parlant de donner des valeurs de température que des valeurs de résistances → convertissez l'écart entre les valeurs de  $R$  en écart de température pour montrer l'erreur systématique que l'on ferait en effectuant une mesure deux fils (la sensibilité d'une résistance de Platine à 0°C est d'environ 2,6 degré Celsius par ohm).

#### Manipulation 2 : stabilité sur la mesure :

Manip réalisable uniquement avec le Keithley 2000 (si on ne dispose pas d'un tel appareil, on peut faire à l'œil une estimation grossière).

Cet appareil permet d'effectuer des statistiques sur une série de mesure. Appuyez sur la touche « STORE », indiquez avec les touches  $\uparrow\downarrow$  et  $\square$  le nombre de mesures sur laquelle vous voulez effectuer l'étude (il faut environ une minute pour 100 mesures), puis appuyez sur la touche « ENTER » : un astérisque « \* » s'affiche signalant que l'acquisition démarre. Une fois l'acquisition terminée, l'astérisque « \* » disparaît. On accède alors aux statistiques en appuyant sur « RECALL ». Appuyez alors sur la touche  $\downarrow$  : l'écart type (« Standard déviation ») s'affiche. Consultez sa valeur à l'aide des touches  $\square$  . En appuyant ensuite sur la touche  $\downarrow$ , on accède de la même façon à la valeur moyenne puis aux valeurs minimum et maximum. La encore, convertissez les écarts en température pour que cela soit plus parlant. Il faut noter que l'on caractérise la stabilité de l'ensemble appareil-sonde-bain (équilibre thermique, milieu homogène, ...pour le bain).

### Manipulation 3 : Dispersion :

Mesurez en 4 fils la valeur de  $R_0$  des autres résistances disponibles. Chiffrez l'incertitude sur les mesures (cf. doc. de l'appareil). Comparez à la dispersion annoncée par le constructeur. Un défaut d'étalonnage du multimètre ou le vieillissement des sondes peuvent justifier un éventuel désaccord.

#### 3.1.2 Mesure à la température d'ébullition de l'eau

Plongez progressivement les sondes dans de l'eau distillée portée à ébullition depuis suffisamment longtemps et mesurez comme précédemment leur résistance  $R_{100}$  par la méthode des 4 fils. Calculez l'incertitude sur le résultat à l'aide de la doc. du multimètre et comparez à la dispersion annoncée par le constructeur. On peut la encore estimer la stabilité de la mesure. Pour chaque résistance, trouvez la température correspondante en résolvant l'équation de Callendar Van Dusen en utilisant les valeurs de  $R_0$  que vous avez trouvées précédemment. Comparez à la valeur de la température d'ébullition de l'eau (vérifiez dans le Handbook, p. D 136 si la pression atmosphérique du moment peut influencer sur cette température).

#### 3.1.3 Résultats ; conclusions

Voici à titre indicatif une série de résultats obtenus lors d'une expérience où la pression atmosphérique valait 1013 mbar. La température d'ébullition de l'eau vaut alors quasiment 100 °C. Les mesures ont été moyennées sur 200 acquisitions et on indique l'écart type sur chaque mesure.

résistance	1	2	3	4	verre
$R_0$ ( $\Omega$ )	99,495	99.998	99.805	99.990	99.709
écart type $R_0$ ( $\mu\Omega$ )	375	250	220	310	540
$R_{100}$ ( $\Omega$ )	137.620	138.512	138.234	138.532	138.442
écart type $R_{100}$ (m $\Omega$ )	70	13	10	12	13
T (°C)	99.53	100.04	100.01	100.12	99.95

### Dispersion :

Les résultats obtenus sur la température d'ébullition de l'eau avec les différentes sondes se recoupent avec des écarts assez faibles : l'écart maximum entre sondes est de 0,6 %. Il tombe à 0,17 % si l'on enlève la sonde n° 1 (il y a une raison aux mauvaises performances de la sonde n°1 ; la demander au professeur) → avec des résistances de classe A, la dispersion d'une sonde à l'autre est très faible.

### Exactitude :

Les valeurs de température obtenues avec les différentes sondes sont aussi très proches de la valeur attendue : l'écart maximum est de 0,12 % si l'on excepte la sonde n°1. Il faut bien entendu tenir compte de l'incertitude sur la mesure des résistances. Le calcul est un peu lourd puisqu'il fait intervenir la valeur de deux résistances dans une équation du second degré à résoudre. On peut en faire une estimation en ne retenant que le premier ordre dans l'équation de Callendar (on a vu qu'on avait pratiquement une droite dans la gamme de température explorée) :

$$R_T = R_0(1 + A.T) \rightarrow \text{on trouve alors } \Delta T_{100} = \frac{R_{100}/R_0}{A} \left( \frac{\Delta R_{100}}{R_{100}} + \frac{\Delta R_0}{R_0} \right)$$

AN : on a  $R_{100}/R_0 \approx 1,385 \rightarrow$  avec la valeur de A :  $\Delta T_{100} = 355 \left( \frac{\Delta R_{100}}{R_{100}} + \frac{\Delta R_0}{R_0} \right)$

Les mesures précédentes ont été réalisées avec un appareil Keithley 2000. L'incertitude absolue pour une résistance de 100  $\Omega$  vaut alors 0,014  $\Omega$  et l'incertitude pour une résistance de 138,5  $\Omega$  vaut 0,0238  $\Omega$ . On trouve alors :

$$\Delta T_{100} \approx 0,11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

On voit ainsi que les résultats compte tenu de l'incertitude recoupe la valeur théorique de T hormis pour la sonde n° 1. 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 de gros problèmes de dispersion si l'on change de capteur (à condition de garder la même classe !). De plus, le platine étant un métal noble, il vieillit assez bien (pas d'oxydation). La faible sensibilité du capteur oblige néanmoins à disposer d'un matériel performant pour obtenir une bonne précision (c'est là un inconvénient).

note : Il faudrait réécrire dans le tableau la valeur des résistances et de la température en tenant compte des incertitudes.

### Stabilité :

On note une très bonne stabilité dans la mesure (on rappelle que l'on caractérise la stabilité de l'ensemble appareil-sonde-bain). Si l'on excepte la sonde n°1, l'écart type le plus important est de l'ordre de 10 m $\Omega$  soit une fluctuation inférieure à 0,03  $^\circ\text{C}$ . On voit ici tout l'intérêt des équilibres monovariants. Si ils sont bien réalisés, on a alors un milieu dont la température est bien définie et stable.

#### 3.1.3 Mesure à un autre équilibre monovariant

Si on dispose d'azote liquide, on peut faire une mesure de sa température d'ébullition. Si vous voulez effectuer cette mesure, **prendre uniquement la résistance n°1 et plonger progressivement la sonde** dans l'azote liquide afin d'éviter un choc thermique trop important. Mesurez sa résistance par la méthode des 4 fils. Calculez l'incertitude sur le résultat à l'aide de la doc. du multimètre. Comparez à la valeur trouvée par l'équation de Callendar Van Dusen appropriée (utilisez la valeur de  $R_0$  trouvée précédemment).

On peut noter que le point fixe le plus proche à ce niveau de température retenu dans l'EIT 90 est le point triple de l'argon (-189,344  $^\circ\text{C}$ ).



### 3.1.3 Phénomène d'autoéchauffement

Ce phénomène est général à tout les capteurs de température résistif (résistance de platine, thermistance). Pour mesurer une résistance, l'ohm mètre envoie un courant dans le composant et mesure la d.d.p. à ses bornes. Il en déduit  $R$  par le rapport  $U/I$ . L'inconvénient de ce procédé est qu'il dissipe sous forme de chaleur une puissance électrique valant  $R.I^2$  qui peut fausser la mesure de la température : on doit s'attendre à voir la résistance augmenter et ce d'autant plus que le courant de mesure est fort et que le milieu dans lequel la résistance se trouve évacue mal la chaleur. Il est cependant délicat de mettre en évidence cet effet dans la pratique car le courant de mesure des multimètres est faible (de l'ordre du mA pour mesurer  $100\ \Omega$ ) → la puissance dissipée est très faible (de l'ordre de  $0,1\ \text{mW}$ ) ! → pour pouvoir observer l'autoéchauffement, il faut une sonde en équilibre thermique depuis suffisamment longtemps dans un milieu de température très stable. Ces conditions étant difficiles à réunir dans le cadre d'un montage, on ne propose pas de manipulation. Il faut cependant savoir que cet effet existe et qu'il peut être source d'erreur **sauf** aux points fixes (équilibres monovalents).

### 3.2 Pyromètre optique

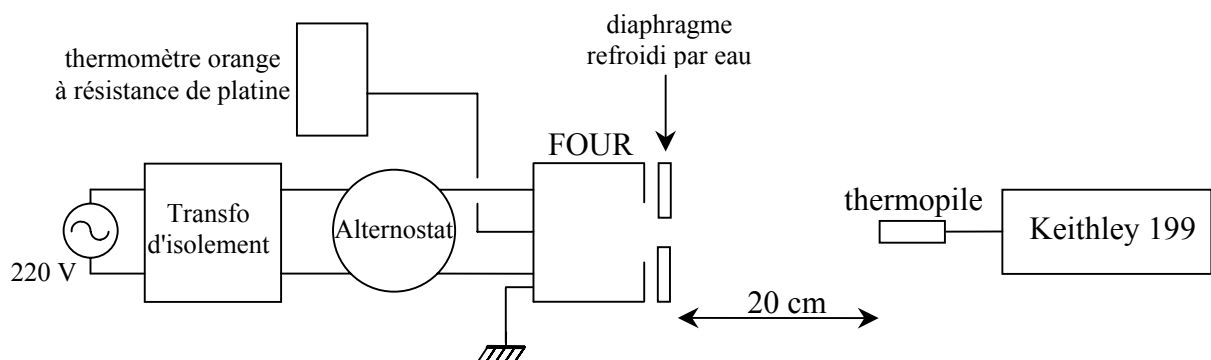
On illustre ici le principe du "pyromètre à radiation totale" :

- pyromètre : instrument qui sert à mesurer les hautes températures.
- à radiation totale : car on utilise comme détecteur la thermopile sans filtre (voir plus loin).

On propose d'effectuer une mesure relative (ce qui correspond aux techniques réelles). Le four à la température  $T$  peut être considéré comme un corps noir, son émission totale est donc proportionnelle à  $T^4$  (loi de Stéphan ; cf. montage M 13, § 1.1.2). Cette manipulation est longue et délicate → respectez les conseils qui suivent pour obtenir des résultats probants.

#### Montage :

réf. (8), p.103



Mettre la sonde du thermomètre à l'arrière du four.

#### Précautions :

Le signal de la thermopile est faible ( $\approx 100\ \mu\text{V}$ ) ⇒ prendre un multimètre précis allumé depuis suffisamment longtemps.

Posez le four sur un support stable ; le diaphragme doit être accolé au four (utilisez un double système de noix pour le maintenir). Soignez l'alignement four-diaphragme-thermopile et ne plus y toucher par la suite !

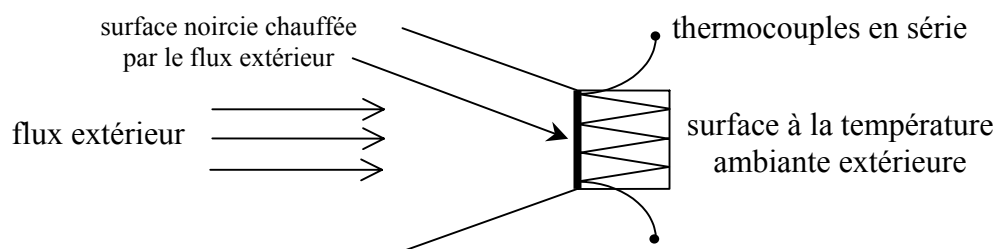
Disposez le montage de façon à minimiser les lumières parasites entrant dans la thermopile (ne pas la diriger vers les fenêtres par exemple). Pour s'en convaincre, éclairez la thermopile avec une petite lampe à 1 ou 2 m → il va sans dire que le noir le plus complet est indispensable. Pour la même raison, s'écarter du montage lors des mesures (le mieux est de se mettre derrière la thermopile). Pour s'en convaincre, regardez l'influence de la présence de personnes proches du montage sur le signal. Enfin, le débit d'eau doit être important pour que le thermostatage soit efficace (ce point est crucial).

#### Mesures :

Alimentez le four avec une tension d'environ 200 V pendant au moins 30 minutes ; notez la tension aux bornes de la thermopile. Par ailleurs, mesurez directement la température du four à l'aide du thermomètre. Laissez le four refroidir quelques minutes puis effectuez à nouveau les mesures sans changer la géométrie.

#### Exploitation :

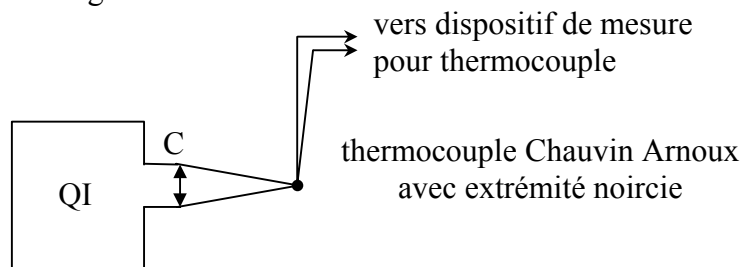
Le détecteur devant mesurer un flux énergétique total, sa réponse spectrale doit être plate d'où le choix de la thermopile malgré sa faible sensibilité. Du fait de son principe de fonctionnement (cf. ci-dessous et réf. (8), p. 78) le détecteur mesure en fait la différence entre le four à la température  $T$  et la température ambiante (vous pouvez le constater : lorsque le four est à température ambiante  $V = 0$ ).



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).

#### Remarque :

On peut illustrer expérimentalement le principe de fonctionnement de la thermopile en réalisant le montage suivant :



Pour que l'expérience soit probante, condensez au maximum la lumière (condenseur de 6 cm, tirage lampe au maximum) et placez l'extrémité du thermocouple à l'endroit précis du point de convergence pour avoir un échauffement maximum ; fixez le thermocouple sur un support stable, recherchez l'échauffement maximum. Il suffira ensuite d'allumer ou d'éteindre la lampe en montage.

## **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 ceux les plus couramment utilisés à savoir les thermistances et les thermocouples.

### **4.1 Introduction**

#### **4.1.1 La thermistance**

réf. (5), p. 279 ; réf. (5 bis), p. 466 ; réf. (3), p. 129 ; réf. (6), p. 79 ; réf. (2), p. 365 ; réf. (9), p. 111 !

Il en existe différents types de thermistances. Les plus courantes sont les thermistances à coefficient de température négatif (CTN) : le capteur est constitué d'oxydes semi-conducteurs → l'augmentation de température provoque la création de paires  $e^-$ /trou qui participent à la conduction → R diminue quand T augmente d'où le terme CTN.

Loi de variation approchée :

$$R = A.e^{\frac{B}{T}} \quad \text{pour une CTN}$$

B est l'indice de sensibilité thermique. A est une constante caractéristique du matériau, de la forme et des dimensions de la thermistance. Cette constante A peut cependant dépendre aussi de la température dans les conditions extrêmes.

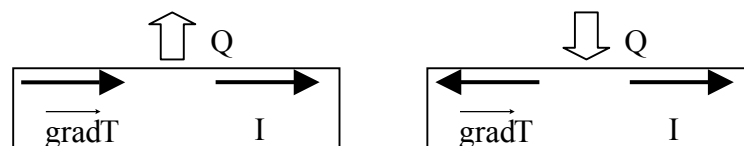
L'évolution de la résistance d'une CTN selon une loi exponentielle fait que, pour un  $\Delta T$  donné, les variations de résistances sont d'autant plus fortes que la température est basse (dans la limite du modèle) → la sensibilité sera grande aux basses températures et diminuera quand T augmente. La limite de la zone de forte sensibilité est fonction de la valeur de B : la plupart des thermistances que l'on trouve couramment dans le commerce ont un coefficient B compris entre 3000 et 4000 K qui les limite vers les hautes température autour de 125 – 200 °C mais qui leur permet d'être très sensibles pour des températures autour de l'ambiante. Cette grande sensibilité fait tout l'intérêt des thermistances. On s'en sert couramment pour faire de la régulation de température ou des thermomètres sensibles à peu de frais. Elles sont aussi utilisées dans les mesures de basses températures.

#### **4.1.2 Les thermocouples**

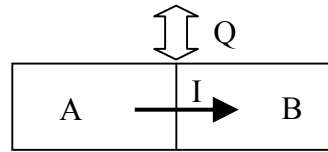
réf. (5), p. 117 et 285 ; réf. (3), p. 82-85 et 132 ; réf. (2), p.366 et chapitre 19 (pour la théorie) ; réf. (10), § 127.

Leur fonctionnement est basé sur l'effet Seebeck ; c'est l'un des trois effets thermoélectriques autre que l'effet Joule :

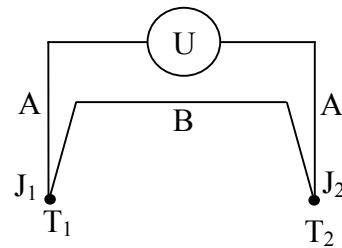
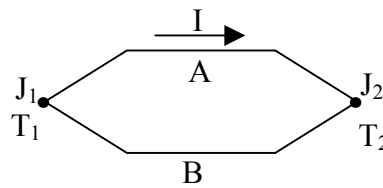
- l'effet Thomson est l'effet thermique qui accompagne le passage d'un courant électrique stationnaire dans un conducteur ohmique soumis à un gradient de température ; il y a absorption ou dégagement de chaleur suivant le sens du courant et du gradient de température.



- l'effet Peltier est l'effet thermique qui accompagne le passage d'un courant électrique à travers une jonction de deux métaux 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 dipôle constitué de deux conducteurs A et B formant deux jonctions  $J_1$  et  $J_2$  maintenues à des températures différentes. Si le circuit est fermé, un courant circule alors dans le circuit ; si on interpose un voltmètre, on mesure alors directement cette fém.



La fém est fonction des coefficients thermoélectriques  $\varepsilon$  des deux métaux et de la différence de température :

$$dE = (\varepsilon_A - \varepsilon_B) dT = Q dT$$

$Q$  correspond au pouvoir thermoélectrique du thermocouple ; il s'exprime en  $\mu V \cdot K^{-1}$  et dépend de la température ce qui fait qu'en général, la fonction  $E_S(T)$  n'est pas linéaire. Elle s'écrit sous la forme d'un polynôme pouvant aller jusqu'à l'ordre 8 mais on se limite la plupart du temps aux trois premiers termes :

$$E(\Delta T) = a \cdot \Delta T + b \cdot \Delta T^2 + c \cdot \Delta T^3$$

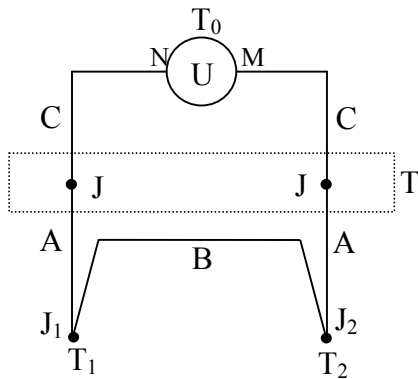
On note  $\Delta T$  car la mesure se fait par principe par rapport à un thermostat de référence qui est le plus souvent le point de fusion de la glace ( $0^\circ C$ ).

Il existe de nombreuses familles de thermocouples (fondamentalement n'importe quel métal peut convenir). Consultez la réf. (5), p. 120 pour plus de précision. Un des thermocouples le plus fréquemment rencontré est le thermocouple de type K ou chromel-alumel (borne + : alliage nickel-chrome ; borne - : alliage nickel-aluminium). C'est celui que l'on propose d'étudier. On peut l'utiliser de  $-200$  jusqu'à  $1260^\circ C$  (à condition qu'il soit prévu pour !) ; c'est un thermocouple très stable dont la loi  $E(\Delta T)$  est très proche d'une loi linéaire (pouvoir thermoélectrique d'environ  $40 \mu V \cdot K^{-1}$ ). Des tables donnent la fém en fonction de la température (cf. Handbook p. E 112 ; attention, selon la température de référence il faudra ou non ajouter un décalage à la f.e.m lue sur la table).

#### Remarques :

Il faut noter que le rajout de fils de liaison ne modifie pas la fém lue si les fils sont de même nature et à même température ; le raisonnement suivant permet de le comprendre. On a (cf. schéma ci dessous) :

$$E = \int_N^J \varepsilon_C dT + \int_J^{J_1} \varepsilon_A dT + \int_{J_1}^{J_2} \varepsilon_B dT + \int_{J_2}^J \varepsilon_A dT + \int_J^M \varepsilon_C dT$$



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

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

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

#### Remarque :

Les thermomètres électroniques à thermocouples possèdent une carte de linéarisation et un dispositif de compensation de soudure froide. Il n'y a alors plus besoin de bain de référence.

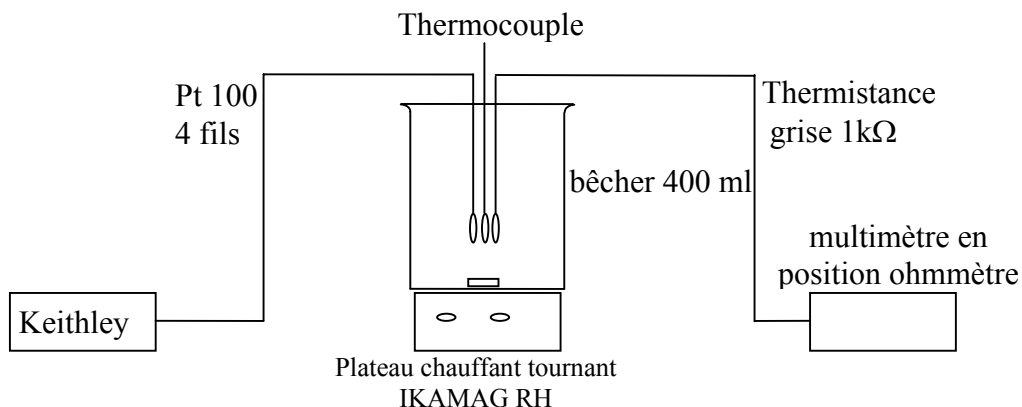
## **4.2 La thermistance**

### 4.2.1 Etalonnage

Le jury souhaite des mesures sur une gamme suffisamment élargie pour pouvoir observer le caractère exponentiel de la caractéristique. La gamme de température à explorer dépend alors du choix de la thermistance. A Rennes, on propose d'étudier une thermistance dont la résistance vaut 1 kΩ à 25 °C et possédant un indice de sensibilité thermique de 3730 K (valeurs annoncées par le constructeur avec une tolérance de 5 %) → des mesures jusqu'à 100 °C suffisent pour observer nettement l'allure exponentielle. On utilisera une résistance de platine comme thermomètre de référence.

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

Faire chauffer progressivement de l'eau avec le dispositif suivant :



Profitez de cette manipulation pour étalonner dans le même temps le thermocouple (cf. § 4.3.1 pour le montage).

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

Il peut être intéressant pour la thermistance d'effectuer quelques mesures en dessous de la température ambiante. Pour ce faire, procédez de la façon

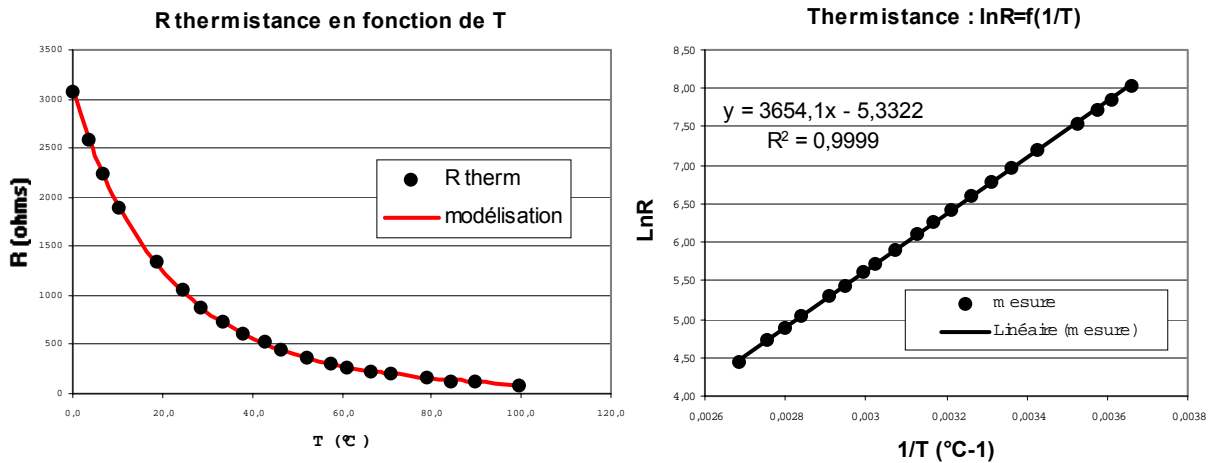
suivante : mettez de l'eau dans un vase Dewar. Placez ensuite la résistance de platine et la thermistance. Pour abaisser progressivement la température, ajoutez de la glace pillée en petites quantités. Agitez le mélange pour faire fondre la glace et avoir un milieu homogène en température puis effectuez la mesure. Ajoutez de nouveau un petit peu de glace pour abaisser encore la température, refaites alors une mesure en respectant le même protocole. Effectuez aussi une mesure à 0 °C avec un mélange eau-glace.

Remarque :

On peut utiliser de l'huile à la place de l'eau si la thermistance dont on dispose nécessite des mesures au dessus de 100 °C.

#### 4.2.2 Exploitation

Tracez sous Excel les courbes  $R = f(T)$  et  $\ln(R) = f(1/T)$  en exprimant la température en Kelvin. En déduire l'indice de sensibilité thermique B. Voici à titre indicatif une série de mesure obtenue avec la thermistance n° 2 :



L'analyse de la courbe  $R = f(T)$  permet de faire les constatations suivantes : la réponse est non linéaire et la sensibilité est plus grande à basse température. La forme exponentielle est confirmée à la vue de la courbe  $\ln R = f(1/T)$ . On trouve un indice de sensibilité thermique B qui vaut environ  $3650 \text{ K}^{-1}$  en accord avec la valeur annoncée par le constructeur (2 % d'écart).

On peut calculer la sensibilité  $S = \frac{\Delta R}{\Delta T}$  de la thermistance pour quelques températures (0 et 100 °C notamment) et la comparer à celle d'une résistance de platine.

Remarque :

La modélisation linéaire de la courbe  $\ln R = f(1/T)$  permet aussi de retrouver le coefficient A de la loi exponentielle de la thermistance : on a  $A = \exp(-5,3322)$  ici. Connaissant A et B, on a tracé sur le graphe  $R = f(T)$  la courbe  $R = A \cdot e^{B/T}$ . On constate un bon accord entre la modélisation et les mesures.

#### 4.2.3 Dispersion

Dans une même série, les caractéristiques varient plus ou moins d'une thermistance à l'autre ; pour s'en convaincre, on peut mesurer la résistance d'une même série à la même température.

Manipulation :

A Rennes, la thermistance d'étude existe en 6 exemplaires (les thermistances n° 1 et 2 n'ont pas été achetées en même temps que les n° 3, 4, 5 et 6) → mesurez à l'ohmmètre leur résistance à 0 °C (mélange eau-glace dans un calorimètre) ou à 100 °C (eau distillée à ébullition). Voici à titre indicatif une série de mesure effectuée avec le Keithley 2000 :

thermistance	1	2	3	4	5	6
$R_0$ ( $\Omega$ )	3079	3065	2934	2944	2906	2977
$R_{100}$ ( $\Omega$ )	84.29	84.19	78.58	78.62	78.44	79.65

#### Analyse :

La dispersion sur la valeur de  $R_0$  est de 5,8 % sur l'ensemble des sondes. Elle est plus faible dans une même série de fabrication (2,4 % sur les thermistances 3, 4, 5 et 6). Si l'on considère que la sensibilité à 0 °C est la même pour toutes et vaut celle de la thermistance n° 2 ( $\approx 130 \Omega$  par °C), cela conduit à un écart maximum de 1,3 °C pour l'ensemble des sondes et de 0,55 °C entre les sondes d'une même série (3, 4, 5 et 6).

La dispersion sur la valeur de  $R_{100}$  est de 7,3 % sur l'ensemble des sondes et de 1,53 % dans une même série de fabrication (3, 4, 5 et 6). Si l'on considère que la sensibilité à 100 °C est la même pour toutes et vaut celle de la thermistance n° 2 ( $\approx 1 \Omega$  par °C), cela conduit à un écart maximum de 5,8 °C pour l'ensemble des sondes et de 1,2 °C entre les sondes d'une même série (3, 4, 5 et 6).

Cette dispersion est un inconvénient puisque qu'elle pose un problème d'interchangeabilité dans un dispositif de mesure (l'étalonnage est à refaire si la sélection des composants n'est pas rigoureuse). Ces écarts sont à comparer à ceux obtenus avec la résistance de platine.

#### 4.2.4 Applications

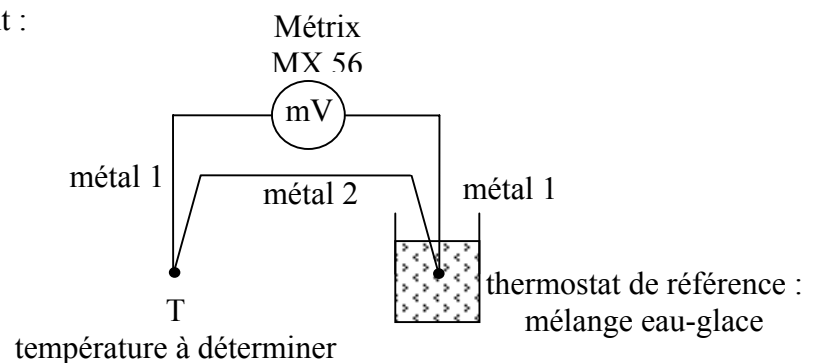
Vous pouvez illustrer le principe d'une régulation de température (cf. Quaranta III p.452). On peut aussi effectuer la mesure d'une faible variation de température. On peut par exemple réaliser un montage à transistor à émetteur commun et faire varier légèrement sa température en modifiant la valeur du courant  $I_C$  (cf. Quaranta III p. 160). Utilisez un transistor avec un radiateur rempli de graisse thermoconductrice sur le capot pour y loger la thermistance. Si la modification de température est suffisante, vous pouvez vérifier 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. Duffait p. 113 ; Pérez p. 369 ; BNM p. 185).

### 4.3 Les thermocouples

#### 4.3.1 Etalonnage

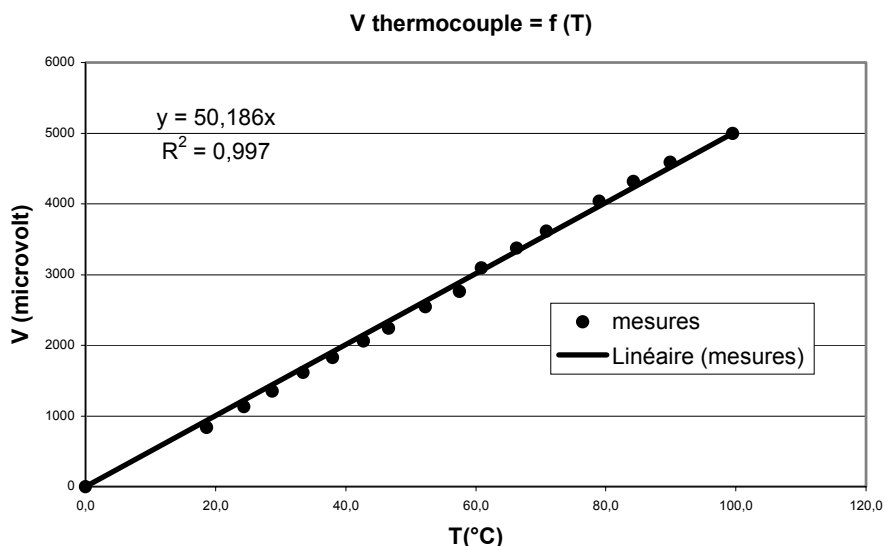
Le réaliser en même temps que la thermistance en utilisant le montage de base suivant :

attention au sens  
de branchement des thermocouples !



#### 4.3.2 Exploitation

Tracez la courbe  $R = f(T)$  ; Vous devez obtenir approximativement une droite (cf. réf. (5), p. 120 et 287). Comparez aux tables dans le Handbook p. E 112. Calculez sa sensibilité et comparez la à celle des autres capteurs. Voici à titre indicatif le résultat d'une série de mesure :



#### 4.3.3 Application

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

#### Références :

- (1) : Bertin Faroux ; Thermodynamique : chap. 2 et 3 ; clair et succinct
- (2) : Pérez ; ch I (p. 9) ; ch II ; ch 18 et ch 20
- (3) : Labether ; Mesures thermiques ; température et flux 53/54 C917/1
- (4) : Bureau national de métrologie (BNM) ; l'EIT 90 C 21121 (1<sup>er</sup> étage à la BU de Rennes)
- (5) : Quaranta ; tome II : la thermodynamique
- (5 bis) : Quaranta ; tome IV : l'électricité
- (6) : Barchiesi ; Comprendre la physique en expérimentant
- (7) : BUP n° 687
- (8) : Sextant : optique expérimentale
- (9) : Duffait ; Expériences d'électronique à l'agrégation de physique
- (10) : Bruhat : thermodynamique



Regardez le rapport du Jury 2000

**Pt 100**

**VALEUR DE LA RESISTANCE EN FONCTION DE LA  
TEMPERATURE DE 0 °C A - 220 °C**

T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)
0	100	-37	85,40	- 74	70,69	- 110	56,13	- 147	40,89	- 185	24,91
-1	99,61	38	85,00	75	70,28	111	55,72	148	40,48	186	24,49
2	99,21	39	84,61	76	69,88	112	55,31	149	40,06	187	24,06
3	98,82	40	84,21	77	69,48	113	54,90	150	39,65	188	23,63
4	98,43	41	83,81	78	69,08	114	54,49	151	39,23	189	23,21
5	98,03	42	83,42	79	68,68	115	54,08	152	38,82	190	22,78
6	97,64	43	83,02	80	68,28	116	53,68	153	38,40	191	22,35
7	97,25	44	82,63	81	67,88	117	53,27	154	37,98	192	21,93
8	96,86	45	82,23	82	67,47	118	52,86	155	37,56	193	21,50
9	96,46	46	81,83	83	67,07	119	52,45	156	37,15	194	21,08
10	96,07	47	81,44	84	66,67	120	52,04	157	36,73	195	20,65
11	95,68	48	81,04	85	66,26	121	51,63	158	36,31	196	20,23
12	95,28	49	80,65	86	65,86	122	51,22	159	35,90	197	19,80
13	94,89	50	80,25	87	65,46	123	50,81	160	35,48	198	19,38
14	94,49	51	79,85	88	65,06	124	50,40	161	35,06	199	18,95
15	94,10	52	79,46	89	64,65	125	49,98	162	34,64	200	18,53
16	93,71	53	79,06	90	64,25	126	49,57	164	33,80	201	18,11
17	93,31	54	78,66	91	63,84	127	49,16	165	33,38	202	17,70
18	92,92	55	78,26	92	63,44	128	48,75	166	32,96	203	17,28
19	92,52	56	77,87	93	63,03	129	48,34	167	32,54	204	16,86
20	92,13	57	77,47	94	62,63	130	47,93	168	32,12	205	16,44
21	91,73	58	77,07	95	62,22	131	47,52	169	31,70	206	16,03
22	91,34	59	76,68	96	61,82	132	47,10	170	31,28	207	15,61
23	90,94	60	76,28	97	61,41	133	46,69	171	30,86	208	15,19
24	90,55	61	75,88	98	61,01	134	46,28	172	30,43	209	14,78
25	90,15	62	75,48	99	60,60	135	45,86	173	30,01	210	14,36
26	89,75	64	74,68	100	60,20	136	45,45	175	29,16	212	13,57
28	88,96	65	74,28	101	59,79	138	44,63	176	28,74	213	13,17
29	88,57	66	73,89	102	59,39	139	44,21	177	28,32	214	12,78
30	88,17	67	73,49	103	58,98	140	43,80	178	27,90	215	12,38
31	87,77	68	73,09	104	58,57	141	43,38	179	27,47	216	11,99
32	87,38	69	72,69	105	58,16	142	42,97	180	27,05	217	11,59
33	86,98	70	72,29	106	57,76	143	42,55	181	26,62	218	11,20
34	86,59	71	71,89	107	57,35	144	42,14	182	26,20	219	10,80
35	86,19	72	71,49	108	56,94	145	41,72	183	25,77	-220	10,41
36	85,79	73	71,09	109	56,54	146	41,31	184	25,34		