

## REPÉRAGE DES TEMPÉRATURES - corrigé du TP

### 1. Le thermocouple

#### 1.1. Principe du thermocouple

♦ remarque : dans un solide métallique, les atomes mettent en commun leurs niveaux d'énergie pour donner des "bandes d'énergie" ; le remplissage de ces "niveaux généralisés" se fait jusqu'au "niveau de Fermi" (situé dans ce cas dans une bande permettant la conduction électrique, puisqu'elle est partagée sur l'ensemble) ; les différents métaux ayant des structures différentes, le décalage de leurs niveaux de Fermi provoque lors de la jonction un infime passage de charges pour rééquilibrer, négligeable en quantité de charges déplacées mais causant une différence de potentiel (f.e.m.) ; par ailleurs, quand la température augmente, la répartition statistique des électrons s'étale d'autant plus de part et d'autre du niveau de Fermi, or les bandes n'étant pas symétriques au dessous et au dessus, l'étalement provoque un déplacement du niveau de Fermi ; dans un métal donné cela cause l'effet Seebeck, mais cela décale aussi les f.e.m. de jonction.

• Étant donné que seules les différences des métaux interviennent dans un thermocouple, les coefficients Seebeck sont généralement indiqués par comparaison à un métal de référence ; on trouve par exemple (métal de référence non cité) :  $S_{Cu} = 1,19 \mu V.K^{-1}$  ;  $S_{Fe} = 11,6 \mu V.K^{-1}$  ;  $S_{const} = -37,6 \mu V.K^{-1}$ .

♦ remarque : pour de grandes variations, les coefficients Seebeck dépendent de  $T$  ; les indications précédentes sont au voisinage de la température de référence.

• Pour le thermocouple "fer-constantan" à la température de fusion du plomb  $T = 327 \pm 5^\circ C$  (voir ci-après) on calcule  $E_{grad} = \int_{T_0}^{T_{mes}} (S_{Fe} - S_{const}) dT = 16,1 \pm 0,4 mV$  alors qu'on mesure  $17,4 \pm 0,5 mV$ . Ceci signifie que la contribution  $E_{junc}$  est négligeable (il y a le plus souvent compensation sur l'ensemble du circuit).

• De façon générale les tests du "point  $0^\circ C$ " (eau glacée de référence) et du "point  $100^\circ C$ " (eau bouillante) indiquent pour les températures :

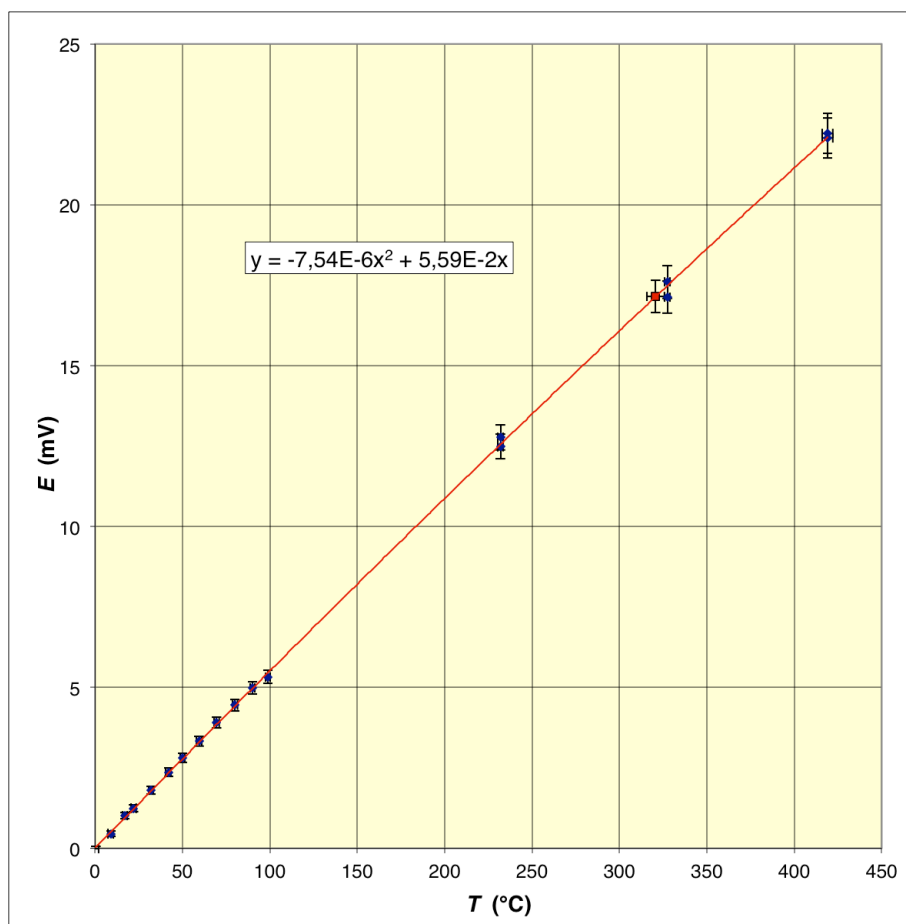
- ♦ des incertitudes de lecture (y compris la variation dans le temps)  $\approx 0,5^\circ C$  ;
- ♦ des incertitudes d'inhomogénéité du milieu  $\approx 1^\circ C$  ;

et pour les f.e.m. :

- ♦ des incertitudes de mesure  $\approx 0,5\%$  plus  $0,02 mV$  ;
- ♦ des incertitudes de référence (dont sa dérive  $\approx 3^\circ C$  pendant la manipulation)  $\approx 2\%$  plus  $0,05 mV$ .

### 1.2. Étude du couple fer-constantan

- Sur l'intervalle de températures considéré (pourtant relativement étendu), la courbe représentative de la f.e.m.  $E$  en fonction de  $T$  a une allure presque linéaire, avec un terme quadratique de l'ordre du centième.



- L'année où ces mesures ont été prises, il était demandé de déterminer ainsi la température de fusion du cadmium (depuis, l'usage du cadmium a été **abandonné**, à cause de **la toxicité des vapeurs**).

On obtient par interpolation :  $T = 321 \pm 5 \text{ °C}$ , à comparer à la valeur usuellement admise par la communauté scientifique :  $T = 320,9 \pm 0,2 \text{ °C}$ . Ce résultat semble tout à fait satisfaisant.

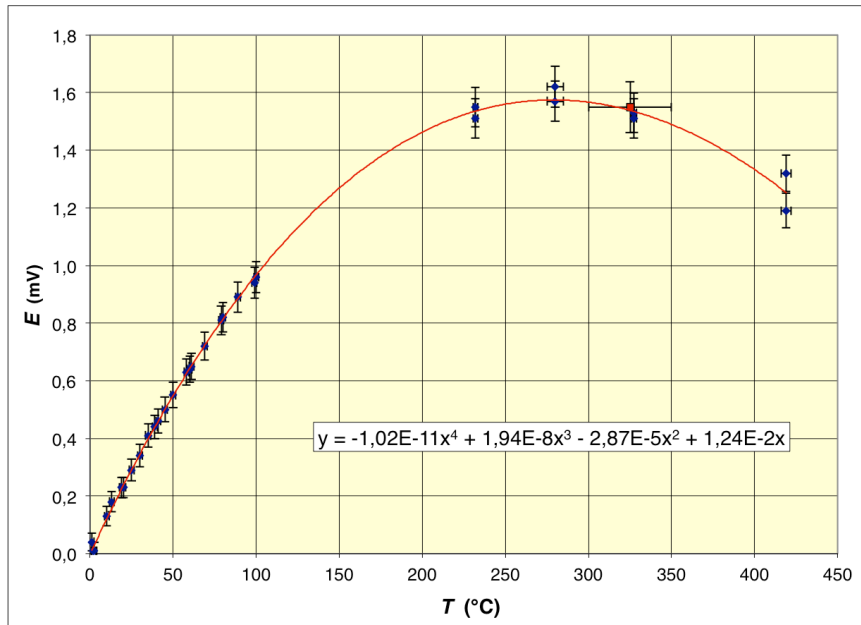
♦ remarque : trois autres métaux (étain, plomb et zinc) ont été utilisés pour l'étalonnage aux plus hautes températures.

### 1.3. Étude du couple fer-cuivre

- Non seulement la précision est nettement défavorisée car les f.e.m. mesurées sont environ dix fois plus faibles (le coefficient du cuivre est bien moins adapté), mais de plus la courbe présente un maximum rendant quasi-impossible (trop imprécis) un repérage entre 230 et 320 °C.

L'allure parabolique de la courbe peut être reproduite avec une représentation d'ordre deux, mais un polynôme d'ordre quatre est moins approximatif. On peut vérifier que la dérivée s'annule pour  $T = 280 \pm 5 \text{ °C}$ .

- Pour la fusion du cadmium, on obtient par interpolation :  $T = 325 \pm 25 \text{ °C}$  (sur la partie décroissante de la courbe), "facilement" compatible avec la valeur usuellement admise par la communauté scientifique, mais ce résultat semble bien peu satisfaisant pour ce qui concerne la précision.



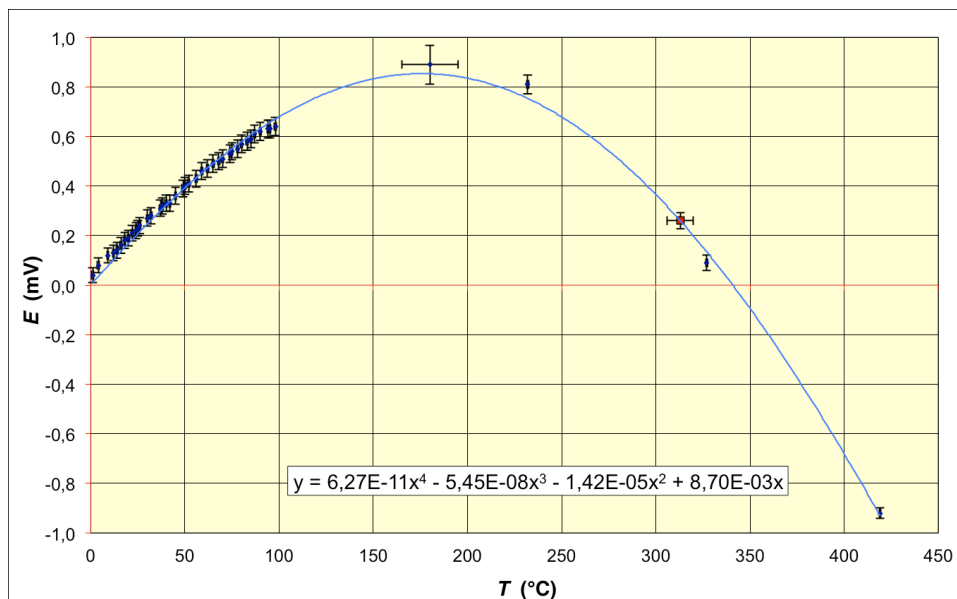
#### 1.4. Étude du couple fer-nichrome

• Manquant de thermocouples pour des classes plus chargées, nous en avons confectionné deux de plus avec un ancien reste de fil disponible au laboratoire, très probablement en alliage nickel-chrome (mais l'étiquette était illisible).

• Hélas, la précision est encore plus défavorisée car les f.e.m. mesurées sont encore deux fois plus faibles et la courbe présente aussi un maximum pour  $T = 180 \pm 25$  °C.

L'allure parabolique de la courbe peut être reproduite avec une représentation d'ordre deux, mais un polynôme d'ordre quatre est moins approximatif.

• Pour la fusion du cadmium, on obtient par interpolation :  $T = 313 \pm 7$  °C (sur la partie décroissante de la courbe), raisonnablement compatible avec la valeur usuellement admise par la communauté scientifique. Le manque de précision regrettable est ici moins dû à la proximité du maximum de la courbe qu'aux incertitudes associées à la faiblesse des f.e.m. mesurées.



## 2. Les thermomètres à résistance

• De façon générale les tests du “point 0 °C” (eau glacée de référence) et du “point 100 °C” (eau bouillante) indiquent pour les températures :

- ◊ des incertitudes de lecture (y compris la variation dans le temps)  $\approx 0,5\text{ °C}$  ;
- ◊ des incertitudes d'inhomogénéité du milieu  $\approx 1\text{ °C}$  ;

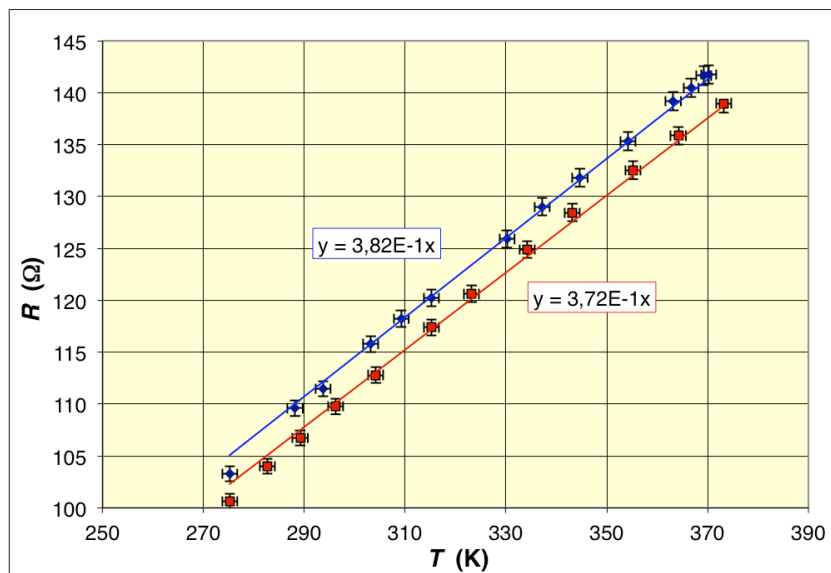
et pour les résistances :

- ◊ des incertitudes de mesure  $\approx 0,5\text{ \%}$  plus  $0,2\text{ }\Omega$  .

### 2.1. Résistance métallique

• Accélérés uniformément par une tension électrique, les porteurs de charge acquièrent une vitesse proportionnelle au temps, mais à chaque collision avec un atome fixe ils perdent ce mouvement (les chocs de l'agitation thermique sont violents). La vitesse moyenne correspondante (donc celle du courant électrique) est ainsi proportionnelle à la durée moyenne entre deux collisions ; celle-ci diminue quand la température (l'agitation thermique) augmente.

• Ne disposant d'aucun modèle physique simple pour l'effet de  $T$  sur la durée de collision, on se base sur l'allure des mesures et on propose une modélisation linéaire  $R = \beta T$  .



La comparaison de deux résistances du même modèle donne  $\beta = 0,377 \pm 0,005\text{ }\Omega \cdot \text{K}^{-1}$  (la paramétrisation semble très bonne).

• La sensibilité d'un tel détecteur peut être caractérisée par  $s = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = \frac{1}{T} \approx 3 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$  .

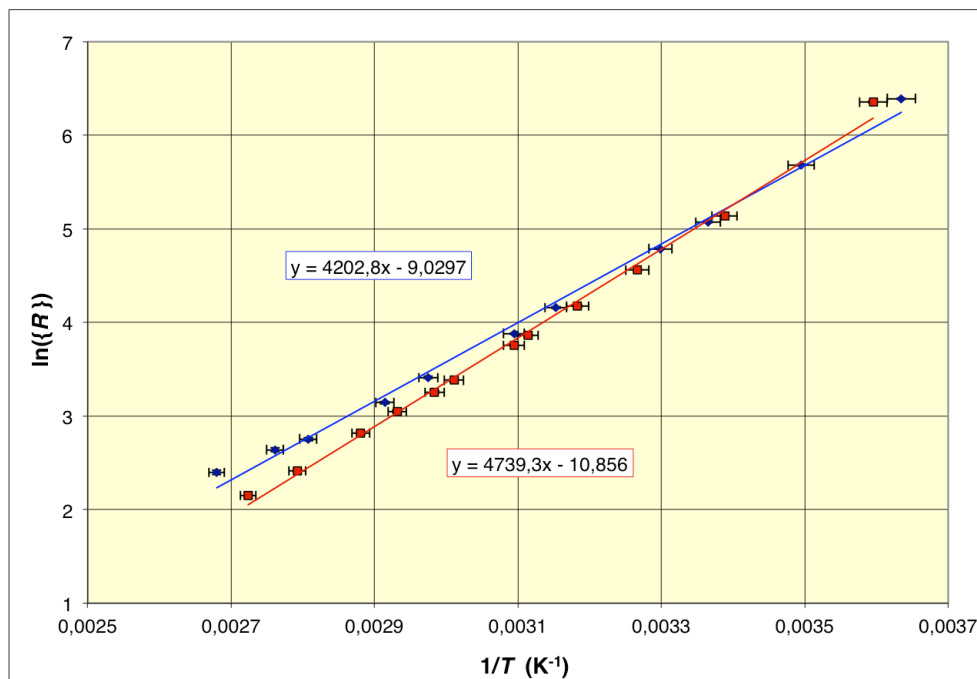
### 2.2. Thermistance

• Dans les thermistances, il y a très peu de porteurs de charge mais l'agitation thermique en “libère” et augmente ainsi la conductivité. En première (assez bonne) approximation, la gêne du déplacement des porteurs due aux chocs est négligeable en comparaison.

En notant  $E_a$  l'énergie d'activation de la réaction  $e_{\text{lié}}^- \rightarrow e_{\text{mobile}}^-$  le facteur de Boltzmann donne un nombre de porteurs proportionnel à  $e^{-E_a/k_B T}$  et donc une résistance variant comme  $e^{E_a/k_B T}$  .

Une paramétrisation par  $R = R_0 e^{E_a/k_B T}$  correspond à  $\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \frac{E_a}{k_B} \frac{1}{T}$  mais faute de connaître à l'avance  $R_0$  il est plus simple de tester les valeurs numériques :  $\ln(\{R\}) = \frac{E_a}{k_B} \frac{1}{T} + Cste$ .

♦ remarque : un modèle (peu explicite) propose de tenir compte de la gêne du déplacement proportionnellement à  $T^{3/2}$  ; cela n'a pas été exploité ici, faute de précision suffisante des données (la modélisation n'est pas meilleure).



- La comparaison de deux thermistances du même modèle donne respectivement :

$$R_0 = 120 \pm 150 \mu\Omega \text{ et } E_a = 34,9 \pm 3,5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} ;$$

$$R_0 = 20 \pm 50 \mu\Omega \text{ et } E_a = 39,4 \pm 3,9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} .$$

La paramétrisation semble relativement correcte dans les deux cas, même si un terme correctif à l'ordre suivant permettrait une amélioration. Par contre, les écarts de valeurs indiquent une grande sensibilité au dopage des semi-conducteurs lors du processus de fabrication.

La précision modeste des données permet à peine de déterminer l'ordre de grandeur de  $R_0$  ; on peut par contre estimer  $E_a = 37,1 \pm 5,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  correspondant à  $0,385 \pm 0,060 \text{ eV}$  par électron, ce qui est bien l'ordre de grandeur des différences entre les niveaux d'énergie au voisinage du niveau de valence des métaux usuels.

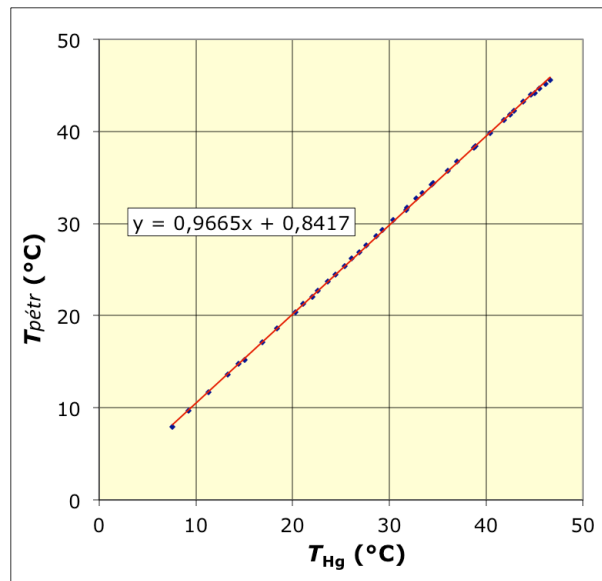
- La sensibilité d'un tel détecteur peut être caractérisée par  $s = -\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = \frac{\alpha}{T^2}$  avec  $\alpha \approx 4470 \text{ K}$  et ainsi avec  $s \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$  les thermistances sont dix fois plus sensibles que les résistances (ce qui justifie que la gêne du mouvement des porteurs n'est ici que du second ordre).

### 3. Étalonnage de thermomètres divers

#### 3.1. Thermomètre à pétrole

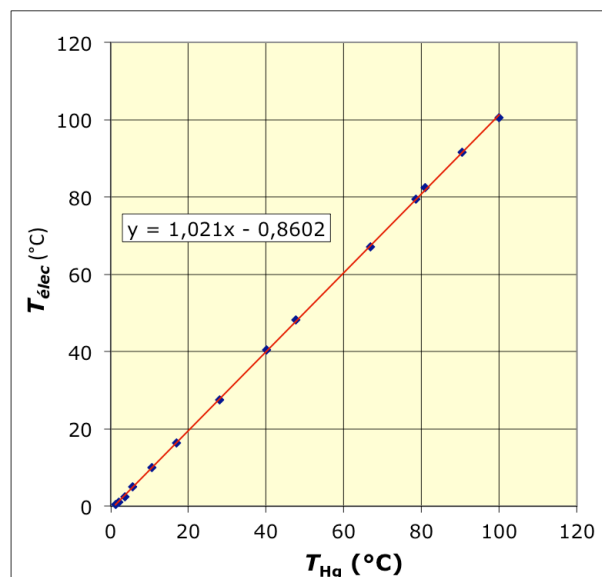
- Les thermomètres de précision étaient généralement à dilatation de mercure, mais il y a inévitablement de la casse de temps à autres (même si c'est rare) et, même en nettoyant très attentivement, il subsiste d'inévitables gouttelettes de mercure répandues dans la salle. Ce mercure s'évapore ensuite très lentement, polluant durablement l'air de vapeurs toxiques (malgré l'aération régulière) ; les règles de sécurité ont donc progressivement interdit l'usage de ces thermomètres dans le système éducatif.

On trouve dans le commerce des thermomètres à pétrole, hélas un peu moins précis ; il est intéressant de tester par comparaison, tant qu'il reste au laboratoire quelques thermomètres de précision à mercure.



- La comparaison met en évidence une précision un peu moins bonne, mais une très bonne régularité des indications ; il peut alors suffire de procéder à un étalonnage à deux températures de référence pour avoir un dispositif de mesure satisfaisant (même si cela nécessite ensuite un calcul correctif).

- Des thermomètres électroniques de précision acceptable pour des mesures en laboratoire ont commencé à être commercialisés peu après ; il est intéressant d'en tester de même le comportement.



- La comparaison met en évidence une précision comparable à celle des thermomètres à pétrole ; on peut les utiliser de même, mais il est probable qu'au fur et à mesure des progrès techniques ce sont leurs successeurs qui deviendront les meilleurs instruments de référence.