

Université Joseph Fourier, Grenoble – 2015/2016
L2 PHY236 et GEL23b – option Énergétique

Johann Collot – collot@in2p3.fr

Monique Giroud – monique.giroud@ujf-grenoble.fr

Stéphane Grenier – stephane.grenier@grenoble.cnrs.fr

Hervé Guillou – herve.guillou@ujf-grenoble.fr

Guillaume Laurent – guillaume.laurent@neel.cnrs.fr

II. Énergie : Aspects Expérimentaux

GEL23b et Phy236 – option Énergétique

C2pl : 2ème cours, page 1

Énergie : aspects expérimentaux

Généralités ;

Accès aux grandeurs thermodynamiques Q , T
par des mesures électriques

Établir un bilan chiffré précis de sa **consommation énergétique primaire** est très difficile (\rightarrow *TDI ex.4*), car une partie importante de celle-ci se cache dans les produits et les services que nous achetons. Concernant l'énergie finale consommée, il faut en plus tenir compte de la fraction qui est consommée en amont de la chaîne, c-à-d avant sa livraison au point d'utilisation...

On peut mesurer précisément différentes formes d'énergie échangées entre un système et une source par de multiples méthodes.

C2p2. Préambule :

Mesurer une quantité d'énergie peut consister à mesurer entre autres :

- une énergie **électrique** : courant et tension \rightarrow puissance $U.i$, d'où l'énergie $U.i \Delta t$
- une quantité de **chaleur** : en mesurant l'échauffement produit par Q (calorimétrie)
- une énergie **cinétique** : par mesure de vitesse
- une quantité de **travail** : force fois déplacement
- une énergie **rayonnée** : vers un matériau où le rayonnement absorbé produit un échauffement, une modification de conductivité, ou une ionisation
- une masse ou un volume de **combustibles** ou de **carburants** produisant le même effet (voire la quantité de « combustible » nucléaire équivalente...)

En pratique, on aura très souvent affaire à :

- **des mesures électriques** : on cherche à s'y ramener par commodité et pour bénéficier de tous les instruments de traitement du signal, analogiques et numériques
- **des mesures calorimétriques et de thermométrie**, car les « pertes » produisent toujours de la chaleur et donc des élévations de températures.

\Rightarrow ce sont ces 2 aspects qu'on exploitera prioritairement lors du TPI

C2p3. Énergie électrique :

Mesurer l'**énergie électrique** produite ou consommée par un circuit revient à mesurer en permanence la **tension** à ses bornes et le **courant** qui le traverse, pour évaluer ensuite entre deux instants t_0 et t_1 :

$$E(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} U(t) i(t) dt$$

De nombreux appareils peuvent :

- afficher directement la puissance $U \cdot i$ (*wattmètres*) , ou ;
- effectuer l'intégration, **numériquement**, ou par le biais de **dispositifs analogiques** (*circuit à base d'ampli op intégrateur pour les courtes durées, compteur électromécanique pour les longues durées*) pour obtenir l'énergie totale fournie.

La mesure devrait s'afficher en J, mais plus fréquemment vous trouverez des W.h ou des kW.h .

Certains se branchent directement sur des prises simples de 220 V pour mesurer la consommation de vos appareils électriques en service : très utiles si vous souhaitez faire une étude détaillée de votre consommation électrique. Il peut y avoir quelques surprises ! Exemples : congélateurs, réfrigérateurs mal isolés, chauffe-eau entartrés ...

Effet Joule dans une résistance pure R constante : **loi d'Ohm**

$U(t) = Ri(t)$ *Analogie mécanique : frottements (loi de Poiseuille ou Stokes).
 $i(t)$ joue le même rôle que la **vitesse***

Énergie dissipée: $E(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} U(t) i(t) dt = R \int_{t_0}^{t_1} i^2(t) dt$

Si : $i(t) = i = cte$ alors $E(t_0, t_1) = Ri^2(t_1 - t_0) = Ri^2 \Delta t$

Énergie magnétique stockée dans une bobine idéale pure d'**inductance** L constante :

$U(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ *Analogie mécanique : di/dt joue le rôle d'une **accélération**,
 L d'une masse \rightarrow **énergie cinétique** ; U d'une force (f.e.m)*

$$E(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} U(t) i(t) dt = L \int_{t_0}^{t_1} i(t) \frac{di(t)}{dt} dt = L \int_{i_0}^{i_1} i(t) di(t) = \frac{1}{2} L (i_1^2 - i_0^2)$$

Une bobine conductrice possède une résistance en série avec son inductance.

Si la bobine est parfaitement conductrice, cette énergie est stockée sans perte*.

Ex. : électroaimant supraconducteur d'un Imageur par Résonance Magnétique (IRM).

C2p5. Énergie électrique :

Charge d'un condensateur de **capacité C** constante :

$$C U(t) = Q(t) = \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt \Rightarrow C \frac{dU(t)}{dt} = i(t) \quad \text{Analogie mécanique : la charge } Q \text{ joue le rôle d'un déplacement}$$

Énergie électrostatique stockée dans un condensateur idéal pur :

$$E(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} U(t) i(t) dt = C \int_{t_0}^{t_1} U(t) \frac{dU(t)}{dt} dt = C \int_{U_0}^{U_1} U(t) dU(t) = \frac{1}{2} C (U_1^2 - U_0^2)$$

ou en fonction de Q :
$$E(t_0, t_1) = \frac{1}{2C} (Q_1^2 - Q_0^2)$$

*Analogie mécanique : énergie **potentielle** d'un système élastique.
1/C joue le rôle de la **constante de raideur***

Si le condensateur est parfait, sans fuite, cette énergie est stockée sans perte.

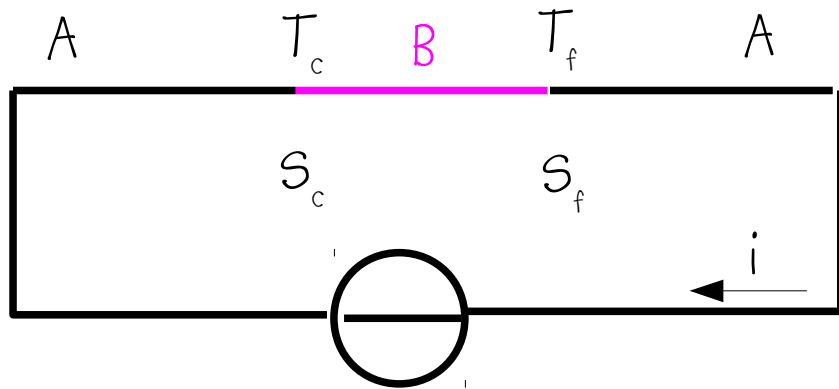
Un condensateur réel possède toujours une résistance de fuite qui est en parallèle avec lui.

C2p6. Thermoélectricité

Estimer expérimentalement les quantités de chaleur contenues ou échangées requiert de mesurer des températures. Souvent, ceci est réalisé à l'aide de **thermocouples métalliques** ou semi-conducteurs, dont le fonctionnement met en oeuvre les **effets Seebeck, Peltier et Thomson**, qui sont liés entre-eux et qui constituent le phénomène de la **thermoélectricité** dans les conducteurs.

Effet Seebeck :

Découvert par Thomas Johann Seebeck en 1821 .



Deux soudures S_c et S_f entre deux conducteurs A et B de natures différentes portées à deux températures différentes : T_c et T_f , $T_c > T_f$

La **f.é.m E** dépend de la **nature des conducteurs** et de la **différence de température entre les 2 contacts**.

$E =$ f.é.m Seebeck ou thermoélectrique :

Puissance produite par effet Seebeck

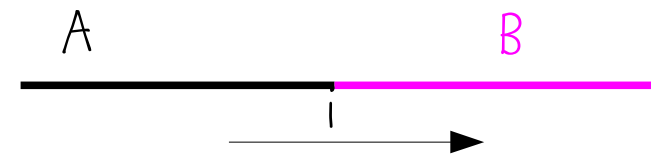
$$E(T_c, T_f) = -E(T_f, T_c)$$

$$P = E i$$

$E(T, T) = 0$ P croît comme i , et non comme i^2 ce qui serait le cas dans l'effet Joule

C2p7. Effet Peltier : découvert en 1834 par Jean-Charles Peltier

Un contact (en général soudure) entre deux conducteurs de natures différentes, traversé par un courant i , dégage (ou absorbe selon le sens du courant) une quantité de chaleur par unité de temps qui est donnée par :



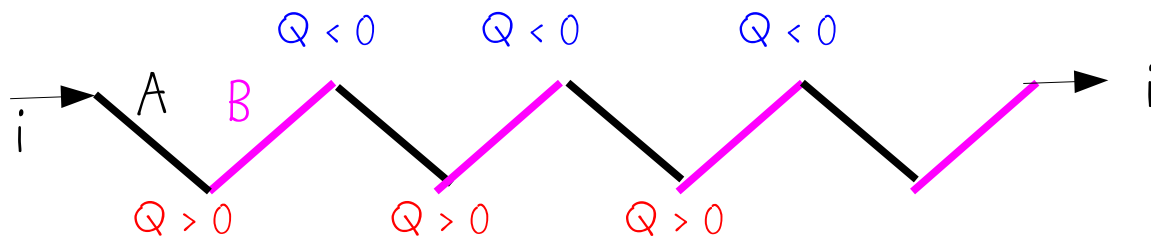
$$\frac{dQ}{dt} = V i$$

Q chaleur, pas charge !

La ddp Peltier V de la soudure dépend de la **nature des 2 matériaux**, et de la **température du contact** -> **coefficient Peltier**, souvent donné en mV/K (dV/dT)

Aux petits courants, l'effet Peltier est réversible.

On peut alors l'utiliser pour transporter de la chaleur



Pour réfrigérer ou réchauffer !



Frigo Peltier



Plaque chauffante
ou réfrigérante Peltier

C2p8. Effet Thomson : découvert par Lord Kelvin en 1851

Un conducteur soumis à un gradient de température, et parcouru par un courant, est le siège d'un dégagement (ou d'une absorption selon le sens du courant) de chaleur par unité de temps donnée par :

$$d\left(\frac{dQ}{dt}\right) = h i dT \quad \text{où } h \text{ dépend de la } \mathbf{\text{nature du conducteur}} \text{ et de sa } \mathbf{\text{température}}.$$

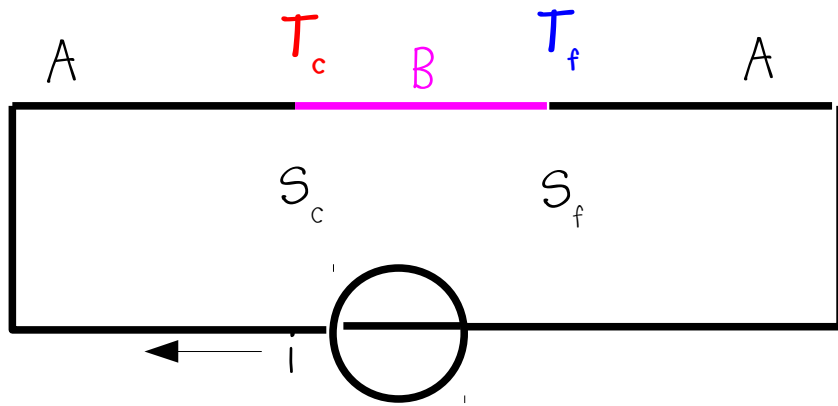
h est souvent donné en mV K^{-1} .

h est positif s'il y a dégagement de chaleur ($dQ < 0$) lorsque le courant est orienté dans le sens des températures décroissantes. Sinon h est négatif. Le signe de la chaleur échangée s'inverse lorsque le courant est inversé.

Dans cette situation, et lorsque le conducteur est soumis à une différence de températures à ses extrémités $T_c - T_f > 0$, on a :

$$\frac{dQ}{dt} = -i \int_{T_f}^{T_c} h dT \quad \text{Q chaleur, pas charge !}$$

C2p9. Liens entre les 3 effets thermoélectriques:



Les charges qui font le tour du circuit parcourent un cycle thermodynamique quasi réversible si le courant i est faible (effet Joule négligeable). Dans le cas où le circuit produit une énergie électrique (choix du sens du courant), le **premier principe** conduit - sur un intervalle de temps dt - à :

$$E = \text{f.é.m Seebeck}$$

$$P = E i$$

$$\frac{dQ_c}{dt} dt + \frac{dQ_f}{dt} dt + \frac{dQ_A}{dt} dt + \frac{dQ_B}{dt} dt - E i dt = 0$$

Effet Peltier soudure chaude (pointing to $\frac{dQ_c}{dt}$)
 Effet Peltier soudure froide (pointing to $\frac{dQ_f}{dt}$)
 Effet Thomson conducteur A (pointing to $\frac{dQ_A}{dt}$)
 Effet Thomson conducteur B (pointing to $\frac{dQ_B}{dt}$)
 Effet Seebeck (pointing to $-E i dt$)

$$V_c i dt - V_f i dt + i dt \int_{T_f}^{T_c} (h_A - h_B) dT = E i dt \quad \rightarrow \quad V_c - V_f + \int_{T_f}^{T_c} (h_A - h_B) dT = E$$

C2p10. Liens entre les 3 effets thermoélectriques:

Si l'on considère que ce cycle est réversible (petits courants, dissipation Joule négligeable) alors : $\oint \frac{dQ}{T} = 0$

Le **2ème principe** impose donc :

$$\frac{V_c i dt}{T_c} - \frac{V_f i dt}{T_f} + i dt \int_{T_f}^{T_c} \frac{(h_A - h_B)}{T} dT = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{V_c}{T_c} - \frac{V_f}{T_f} + \int_{T_f}^{T_c} \frac{(h_A - h_B)}{T} dT = 0$$

Si l'on utilise le **thermocouple** dans une situation où $T_f = T_0$ est constante (température de référence) et $T_c = T$ est variable (température à mesurer) :

$$(1) \quad V - V_0 + \int_{T_0}^T (h_A - h_B) dT = E \quad (2) \quad \frac{V}{T} - \frac{V_0}{T_0} + \int_{T_0}^T \frac{(h_A - h_B)}{T} dT = 0$$

La dérivée de (1) par rapport à T donne :

$$(3) \quad \frac{dE}{dT} = \frac{dV}{dT} + h_A - h_B$$

La dérivée de (2) par rapport à T donne :

$$(4) \quad 0 = \frac{1}{T} \frac{dV}{dT} - \frac{V}{T^2} + \frac{h_A - h_B}{T} = \frac{dV}{dT} - \frac{V}{T} + h_A - h_B$$

C2p11. Liens entre les 3 effets thermoélectriques:

$$(3)-(4) \Rightarrow V = T \frac{dE}{dT} \quad \text{d.d.p Peltier} = T \text{ fois la dérivée de la f.é.m Seebeck}$$

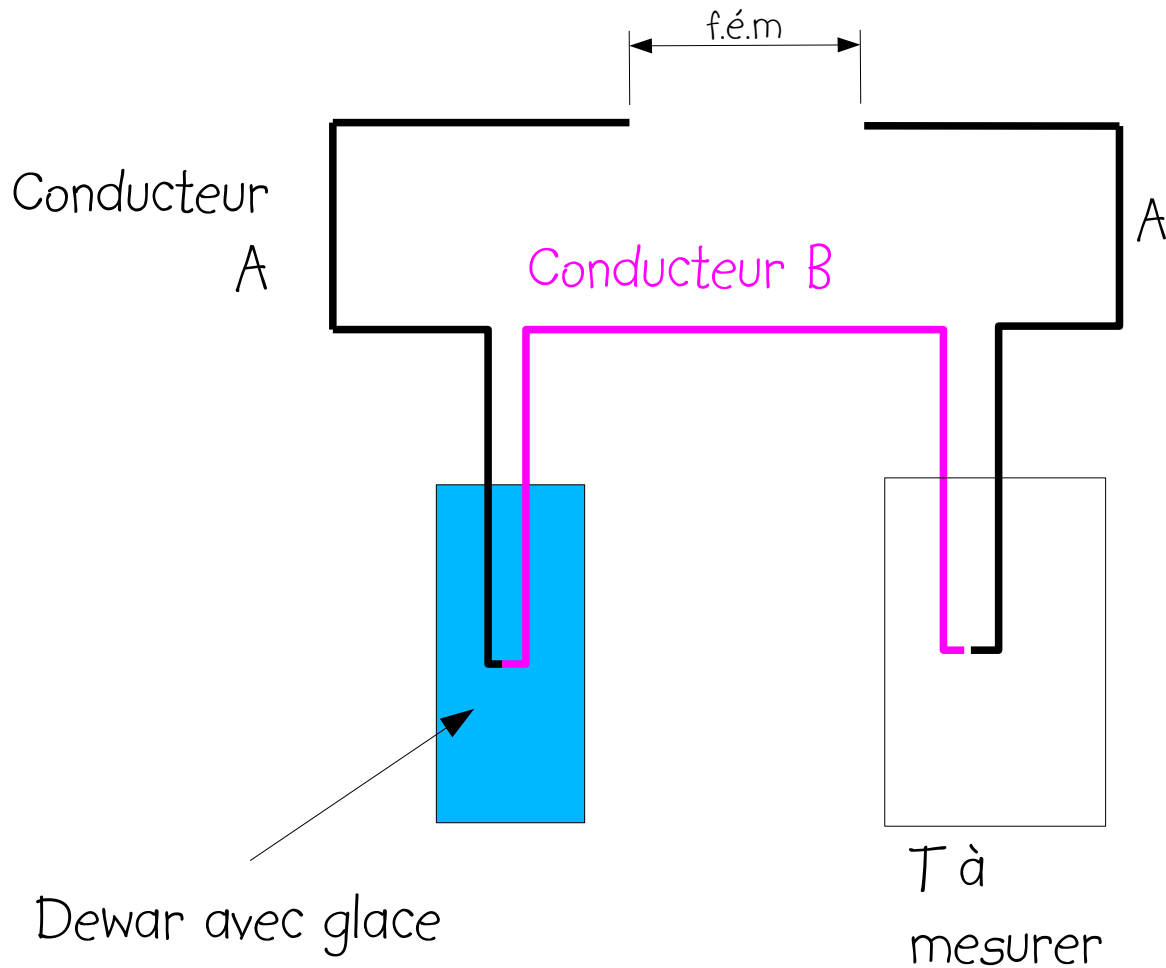
$$\text{Donc :} \quad \frac{dV}{dT} = \frac{dE}{dT} + T \frac{d^2 E}{dT^2}$$

$$\text{En substituant par cette valeur dans (3) :} \quad h_A - h_B = -T \frac{d^2 E}{dT^2}$$

La différence des coefficients Thomson est donnée par $-T$ fois la dérivée seconde de la f.é.m Seebeck.

Lors du premier TP, vous mesurerez la f.é.m Seebeck en fonction de T par rapport à une température de référence constante, 0°C de la glace fondante, pour un thermocouple.

C2p12. Mesure de température à l'aide d'un thermocouple :

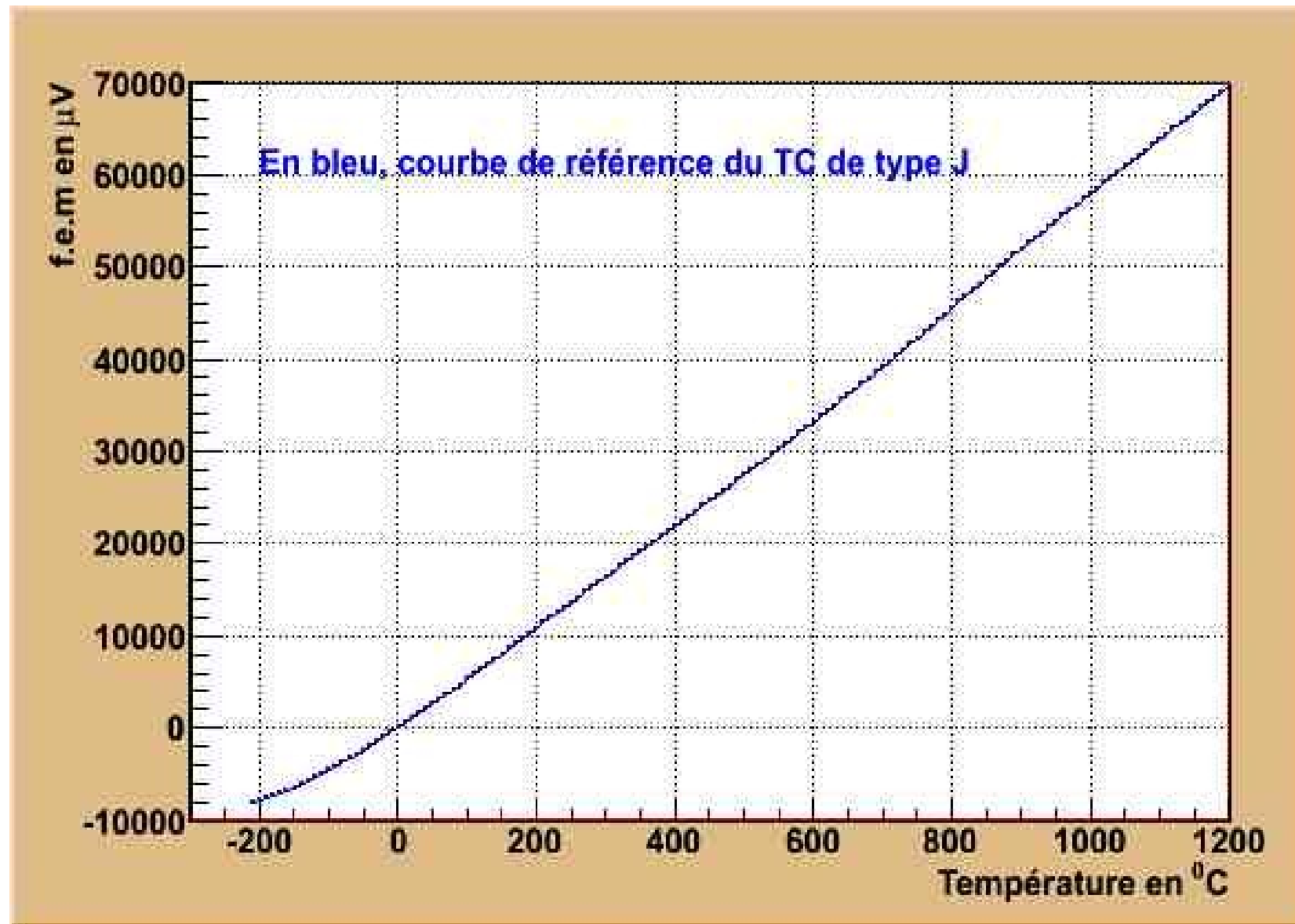


Dewar avec glace
fondante 0 °C
(ou température
d'ébullition de l'azote 77,3 K)

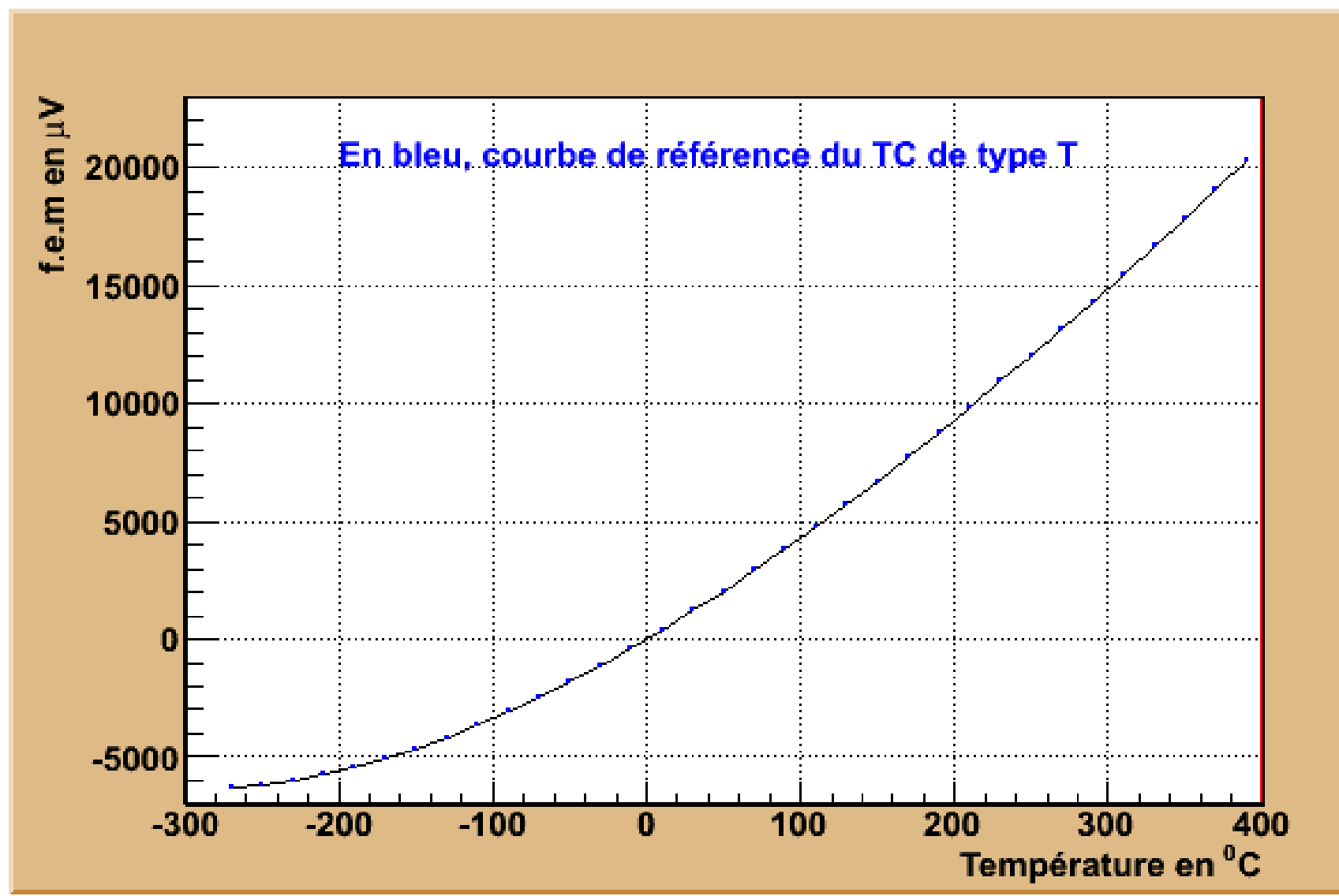
La mesure de la f.é.m
(gamme 0,1 - 10 mV) donne
la température T de la soudure
par rapport à la température
de référence.

Attention : dans un montage où une
seule soudure (celle qui se situe à T)
est utilisée comme sonde, la deuxième
soudure est localisée dans le boîtier
de mesure à une température qui
est mesurée par ailleurs à l'aide d'une
thermistance ou d'une résistance
en platine. Il faut alors respecter
le type de thermocouple pour
lequel ce boîtier est fourni.

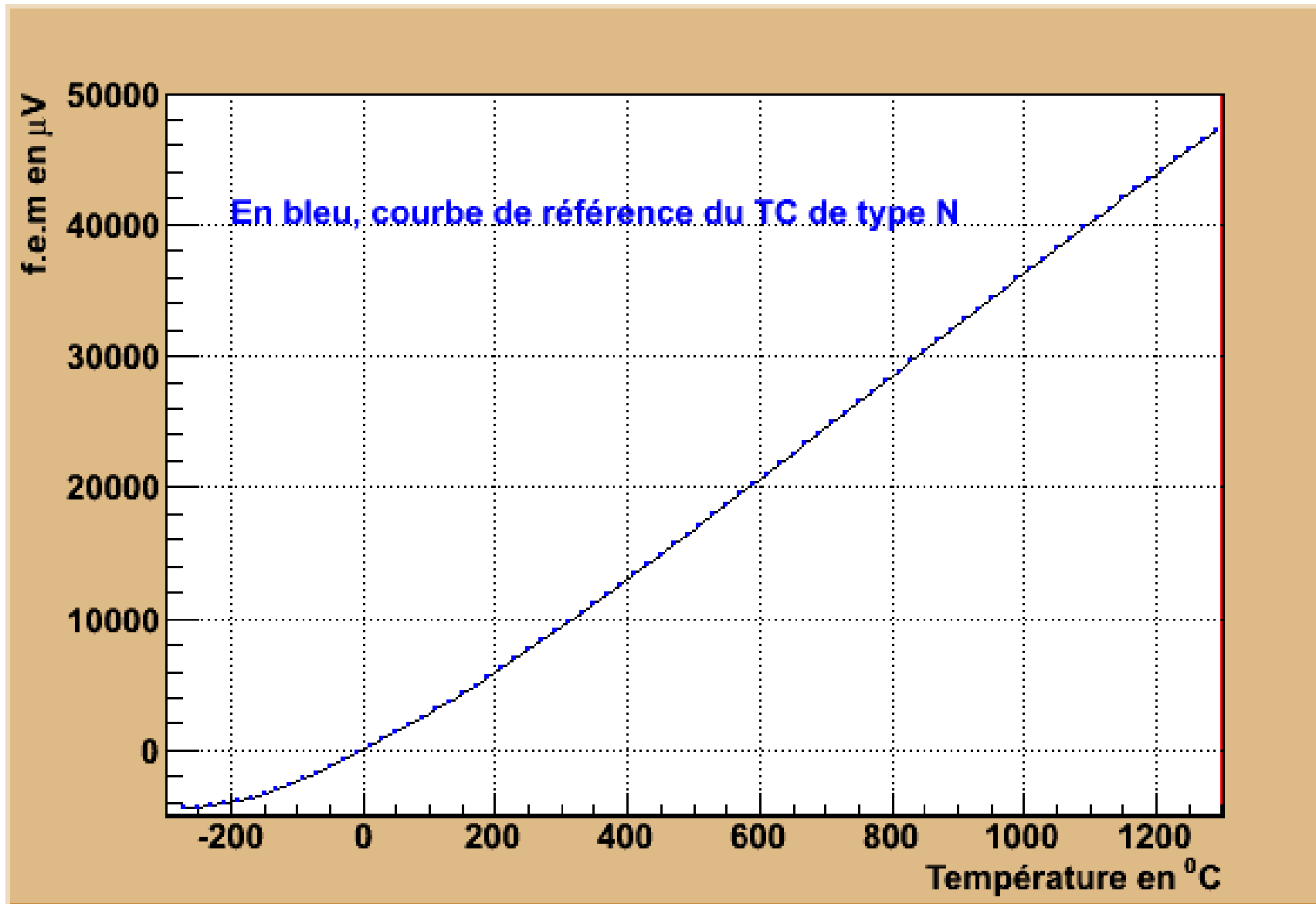
C2p13. Étalonnage d'un thermocouple dit de type J : Fer/Cuivre-Nickel



C2p14. Étalonnage d'un thermocouple dit de type T :
Cuivre /Cuivre-Nickel



C2p15. Étalonnage d'un thermocouple dit de type N :
Nickel-chrome-silicium / nickel-silicium-magnésium



C2p16. Mesure de températures à l'aide d'une résistance de platine

La résistivité des conducteurs varie avec la température. Les métaux ont un coefficient de variation en température positif $dR/dT > 0$. Les résistances de platine « Pt100 » sont préparées de telle sorte que leur résistance soit proche de 100 ohms à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, et que leur résistance varie « **presque linéairement** » avec la température :

$$R(t) = R(0\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (1 + A_{90} t + B_{90} t^2 + C_{90} t^3 (t - 100\text{ }^{\circ}\text{C}))$$

où : t est en $^{\circ}\text{C}$

$$A_{90} \approx 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B_{90} \approx -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C_{90} \approx -4,183 \cdot 10^{-13} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4} \text{ dans la gamme } t < 0^{\circ}\text{C} \text{ et négligeable au-dessus}$$

Les coefficients d'un thermomètre résistif sont déterminés par étalonnage d'après un « **thermomètre primaire** » basé sur une loi physique **indépendante des matériaux** (comme, entre autres, l'équation d'état des gaz parfaits)

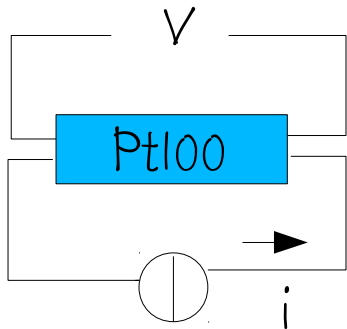
Ces capteurs peuvent être utilisés d'environ 80K à 900 K :

- à plus haute T , le circuit électrique ne survivra pas
- à basse température, la résistivité des métaux devient quasiment constante

C2p18. Mesure de températures à l'aide d'une résistance de platine

Idéalement, **votre thermomètre ne doit pas chauffer** l'objet dont vous mesurez la température, ni... le thermomètre !

=> **mesures à faible courant**

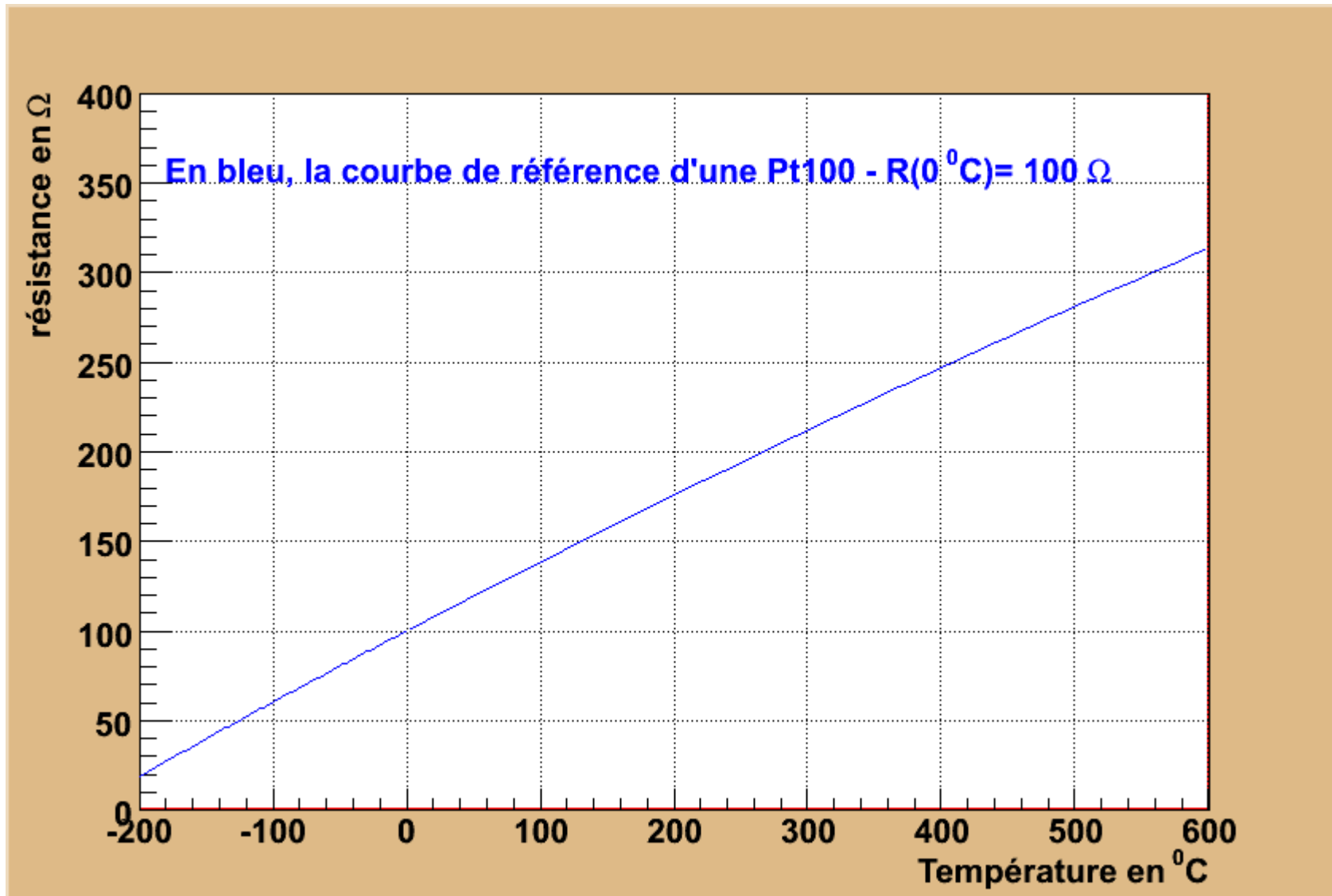


Un montage « 4 fils » permet de s'affranchir de la résistance des fils d'interconnexion et des soudures, et donc de gagner en précision. On fait passer un courant i (*constant ou, plus souvent, alternatif*) dans la boucle de courant, et on mesure V sur l'autre boucle ouverte (*impédance voltmètre \gg reste du circuit*)

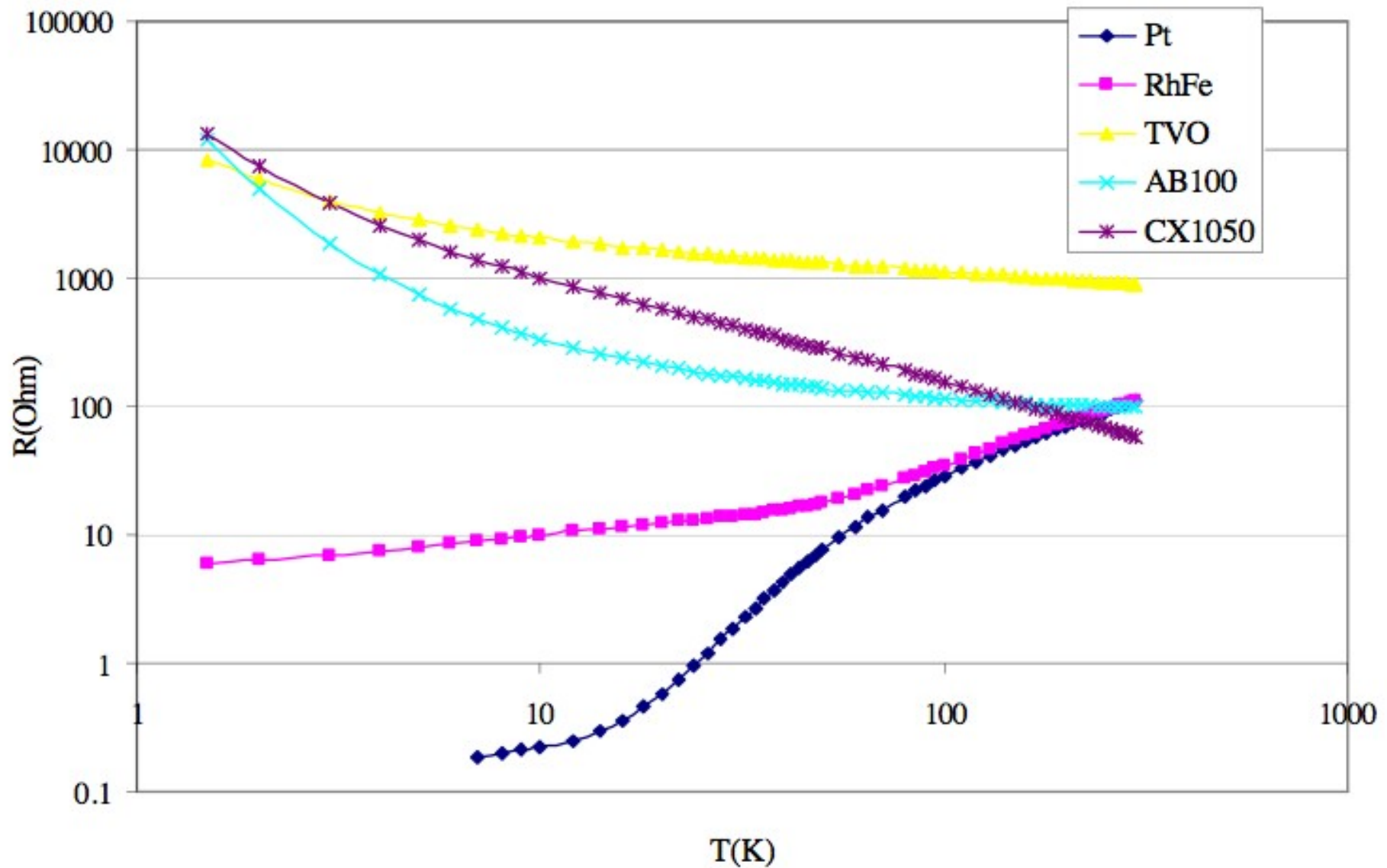
Thermomètres résistifs aux températures cryogéniques:

On utilise des **semi-conducteurs** (coefficient de température négatif $dR/dT < 0$) à la place du platine, car contrairement aux métaux, leur sensibilité $|(dR/R)/dT|$ augmente quand on refroidit.

C2p18. Étalonnage d'un thermomètre platine

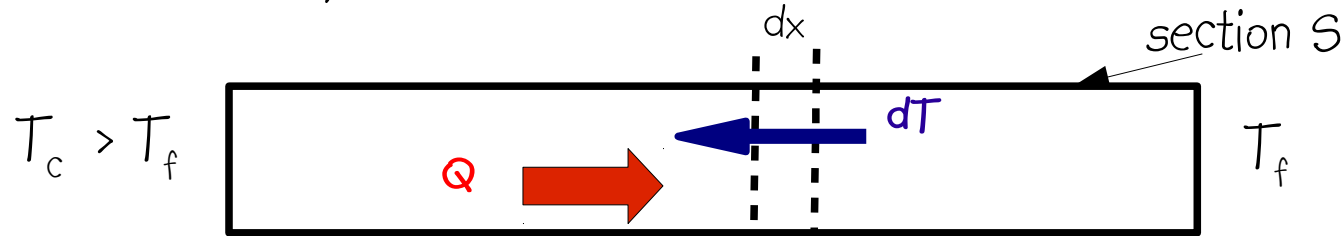


C2p19. Différents types de thermomètres résistifs
d'après M. Thermeau, INP-web - en échelle log



C2p20. Transfert de chaleur par conduction

Mécanismes physiques de transferts de chaleur : conduction, rayonnement, convection. Dans les circuits électriques, on ne peut pas éviter le transfert par **conduction**, et c'est souvent le mécanisme dominant.



Si T varie de T à $T+dT$ le long d'une tranche dx :

$$dQ/dt = -k \cdot S \cdot dT/dx$$

Si la conductivité thermique k peut être approximée par une constante, alors :

$$dQ/dt = -K \cdot \Delta T$$

où $K = k \cdot S / L$ est la **conductance thermique**

S section, L longueur, **$k = \text{conductivité thermique en } W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$**

En général, la conductivité thermique du conducteur varie avec la température, c'est la **conductivité thermique intégrale** qui va relier puissance et écart de température :

$$\lambda(T) = \int_0^T k(T') dT' \quad \rightarrow \quad dQ/dt = [\lambda(T_c) - \lambda(T_f)] \cdot S/L$$

L est la longueur du conducteur entre les points chaud et froid.

Attention : — car flux de chaleur en sens inverse du gradient thermique, mais ne préjuge pas du signe dans le bilan énergétique (apport ou perte pour le système)

Conséquences pour les mesures de T et la calorimétrie :

Le circuit de mesure peut apporter ou extraire de la chaleur, et perturber ainsi la température (et le bilan énergétique) du système étudié.

On a intérêt à utiliser :

- **des sondes** (*thermocouple, ou thermomètre résistif*) dont la **capacité calorifique est faible par rapport à celle du système**

$dQ \rightarrow$ échauffement dT tel que : $dQ = m.C.dT$,

où C = chaleur spécifique en $J.K^{-1}.kg^{-1}$, et $m.C$ = capacité calorifique

(*option : C en $J.K^{-1}.mole^{-1}$ $\rightarrow dQ = n.C.dT$ avec n = nombre de moles)*

- des matériaux de faible conductivité thermique entre le système étudié et les instruments à T ambiante

Mais... les matériaux à faible conductivité thermique ont souvent une plus forte résistivité électrique

--> on devra parfois faire un compromis entre apport de chaleur par effet Joule, et transfert (apport ou perte) par conduction

Pour en savoir plus :

- Thermodynamique, G. Bruhat, édition Masson
- Capteurs en instrumentation industrielle, George Ash, édition Dunod
- Handbook of Tables for Applied Engineering Science
- collection « Techniques de l'ingénieur »
- Énergétique – concepts et applications, Michel Feidt, édition Dunod
- Tables de référence des f-é-m thermoélectrique :
<http://srdata.nist.gov/its90/download/download.html>