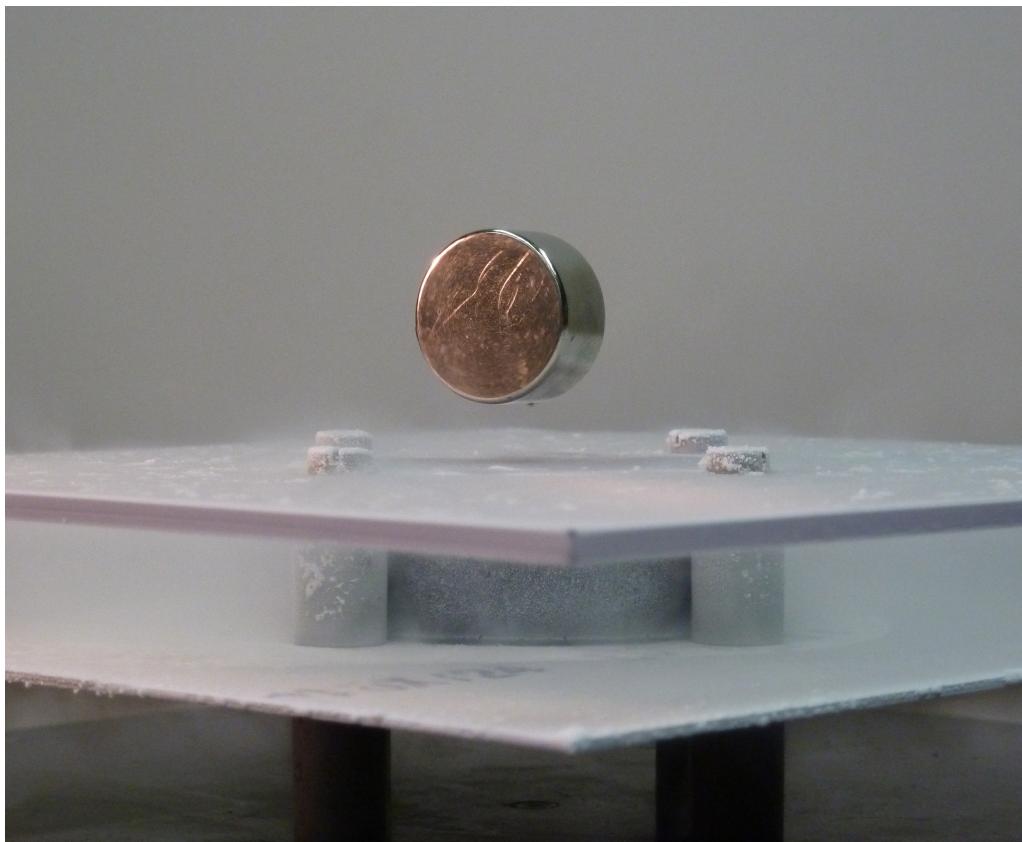


Cryogénie



Liquéfaction des gaz
Supraconductivité
Mesures de la température

Cryogénie

l'étude et la production des basses températures

0 K < températures cryogéniques < 120 K

- produire le "froid"
 - diminuer la température d'un gaz
(extraire la chaleur)
 - liquéfier
- conserver le "froid"
 - isoler par le vide (vase Dewar)

gaz	T_{liq} [K]	T_{liq} [°C]
O ₂	90.2	-183
N ₂	77.4	-195.8
H ₂	20.3	-252.9
He	4.2	-269

Cryogénie - applications

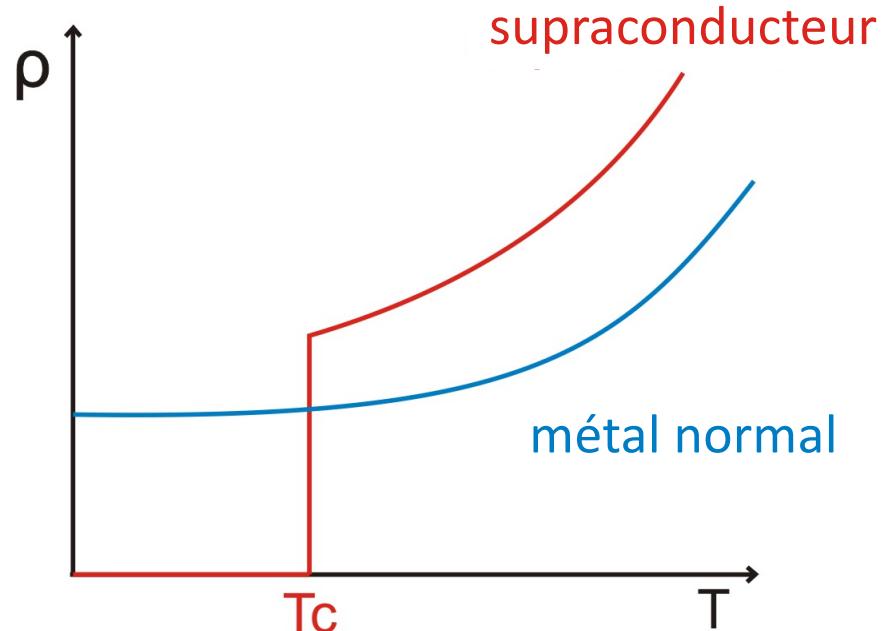
- Réduction de volume
stockage et transport de combustibles et fluides cryogéniques



- Condensation et adsorption
séparation des mélanges de gaz (hélium de l'air), cryopompage
- Arrêt des réactions chimiques
surgélation (industrie alimentaire), cryoconservation (médical)
- Réduction des bruits thermiques
sensibilité d'instruments augmenté
- Propriétés des matériaux
traitement des pièces mécaniques (résistance à l'usure)
- Supraconductivité

Supraconductivité

l'absence de résistance électrique et l'expulsion du champ magnétique (l'effet Meissner)

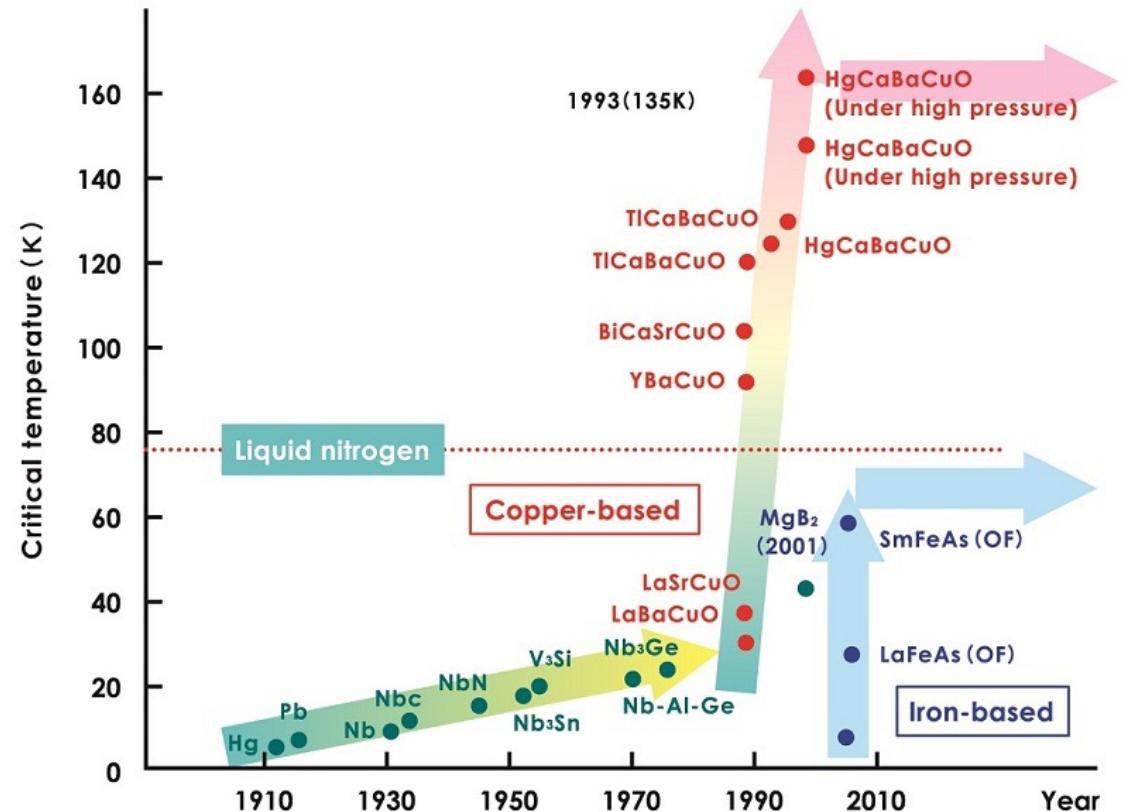


- Kamerlingh Onnes
- 1908: liquéfaction de l'hélium (4.2 K)
- 1911: découverte de la supraconductivité dans Hg ($T_c=4.2$ K), Pb (7.2 K) et Sn (3.7 K)
- 1913: Prix Nobel

Supraconductivité à haute température



K. Alex Müller et J. Georg Bednorz ont obtenu le prix Nobel de physique en 1987



CERN



IRM

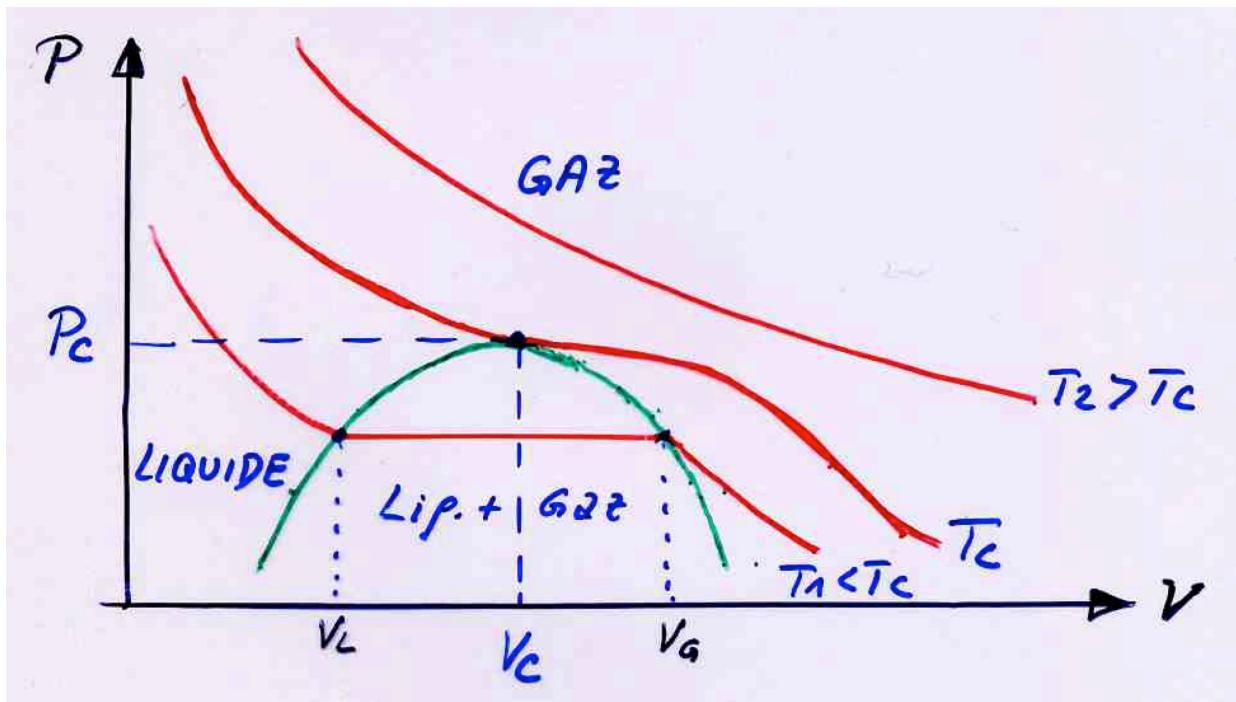


Train à lévitation magnétique (Maglev)

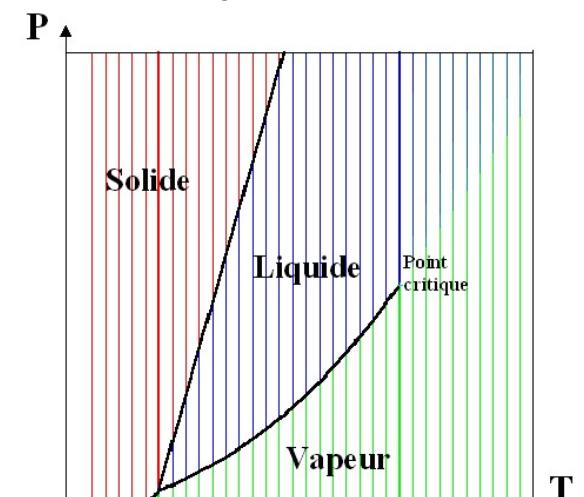
Produire du froid

extraire la chaleur d'un gaz

- à basse température, gaz = fluide réel
- diagramme de Clapeyron



liquéfaction possible
si $T < T_c$



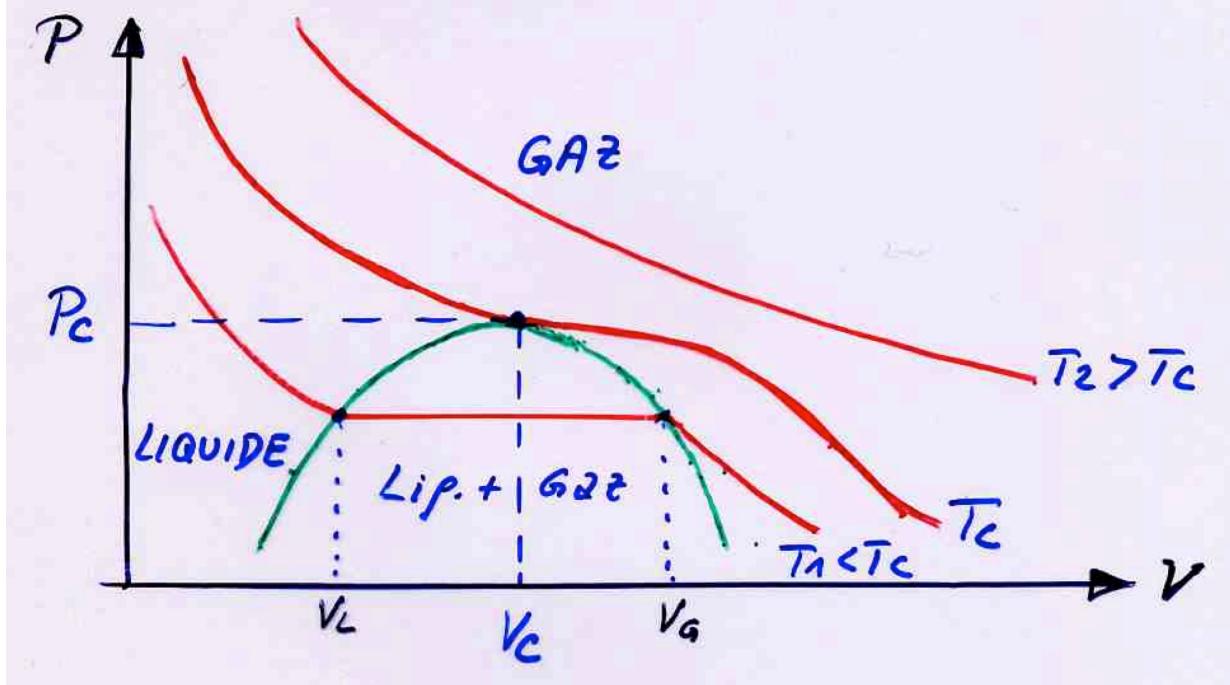
<http://alain.lerille.free.fr/>

- approximation: équation d'état du gaz de Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

$\frac{a}{V^2}$ - pression interne, interactions entre molécules
 b - volume propre des molécules

Point critique



liquéfaction possible
si $T < T_c$

gaz	T_c
CO_2	304 K
N_2	126 K
He	5.3 K

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad \rightarrow \quad P = \frac{RT}{(V - b)} - \frac{a}{V^2}$$

$$\left.\frac{\partial P}{\partial V}\right|_{T=T_c} = 0 \quad \Rightarrow \quad -\frac{RT_c}{(V_c - b)^2} + \frac{2a}{V_c^3} = 0$$

$$\left.\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right|_{T=T_c} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{2RT_c}{(V_c - b)^3} - \frac{6a}{V_c^4} = 0$$



$$T_c = \frac{8a}{27Rb}$$

$$V_c = 3b$$

$$P_c = \frac{a}{27b^2}$$

Modifier la température d'un gaz

varier pression et volume

- 1^{er} principe de la thermodynamique

dynamique

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

chaleur fournie

travail fourni

variation d'énergie interne

- énergie d'un gaz dans un volume V_1 à température T_1

$$U_1 - U_0 = \int_0^{T_1} C_v dT + \int_{\infty}^{V_1} P_i dV$$

=0 échauffement à volume const. V_1
 compression du gaz dans le volume V_1

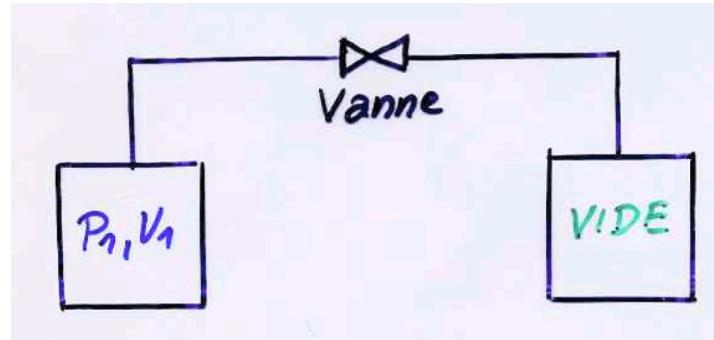
$\Rightarrow U_1 = C_v T_1 - \frac{a}{V_1}$

- enthalpie

$$H = U + PV \quad \rightarrow \quad H_1 = C_V T_1 - \frac{a}{V_1} + P_1 V_1$$

Détente de Joule

système isolé



- gaz se détend dans le vide, sans échanges avec l'extérieur

$$U_1 = U_2 = \text{const.}$$

$$C_V T_1 - \frac{a}{V_1} = C_V T_2 - \frac{a}{V_2}$$

$$T_1 - T_2 = \frac{a}{C_V} \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right)$$

- comme $V_2 > V_1 \quad \rightarrow \quad \underline{T_1 > T_2}$
- un gaz parfait ($a = 0$) ne changerait pas la température

Détente de Joule - Thompson

détente contre pression constante à travers un orifice

$$H_1 = H_2 = \text{const.}$$

$$C_V T_1 - \frac{a}{V_1} + P_1 V_1 = C_V T_2 - \frac{a}{V_2} + P_2 V_2$$

- eq. de Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

$$PV - Pb + \frac{a}{V} - \cancel{\frac{ab}{V^2}} = RT$$

$$PV = RT + Pb - \frac{a}{V}$$

$$(c_v + R)T_1 + Pb - \frac{2a}{V_1} = (c_v + R)T_2 + Pb - \frac{2a}{V_2}$$

$$\frac{T_1}{V_1} \sim \frac{P_1}{RT}$$

$$\frac{T_2}{V_2} \sim \frac{P_2}{RT}$$

$$T_1 - T_2 = (P_1 - P_2) \frac{\frac{2a}{RT} - b}{(C_v + R)}$$

- comme $P_1 > P_2$

$$\begin{aligned} &\rightarrow T_1 > T_2 \quad \text{si} \quad \frac{2a}{RT} - b > 0 \\ &\rightarrow T_1 < T_2 \quad \text{si} \quad \frac{2a}{RT} - b < 0 \end{aligned}$$

$$T_{inversion} = \frac{2a}{Rb}$$

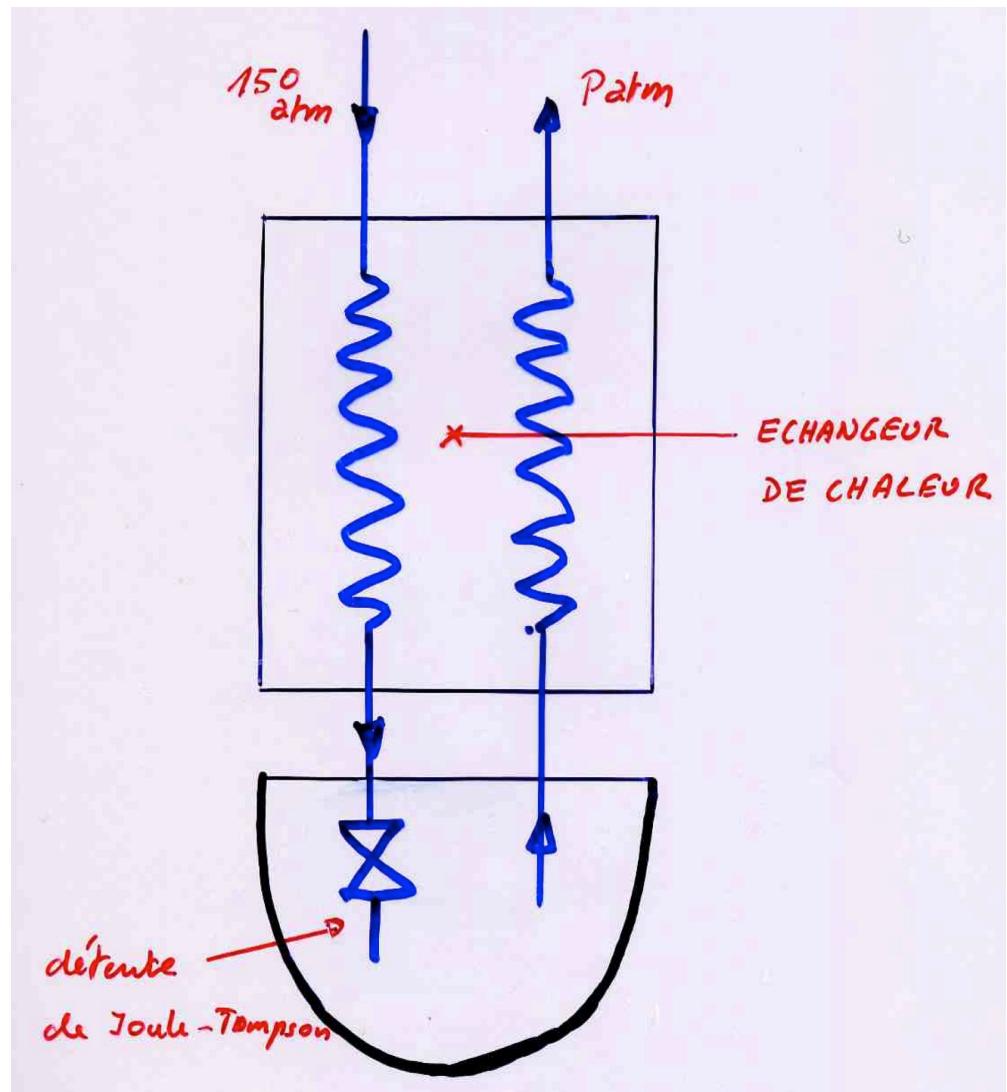
- gaz de Van der Waals:

$$T_c = \frac{8a}{27Rb}$$

$$\rightarrow T_{inversion} = 6.75 T_c$$

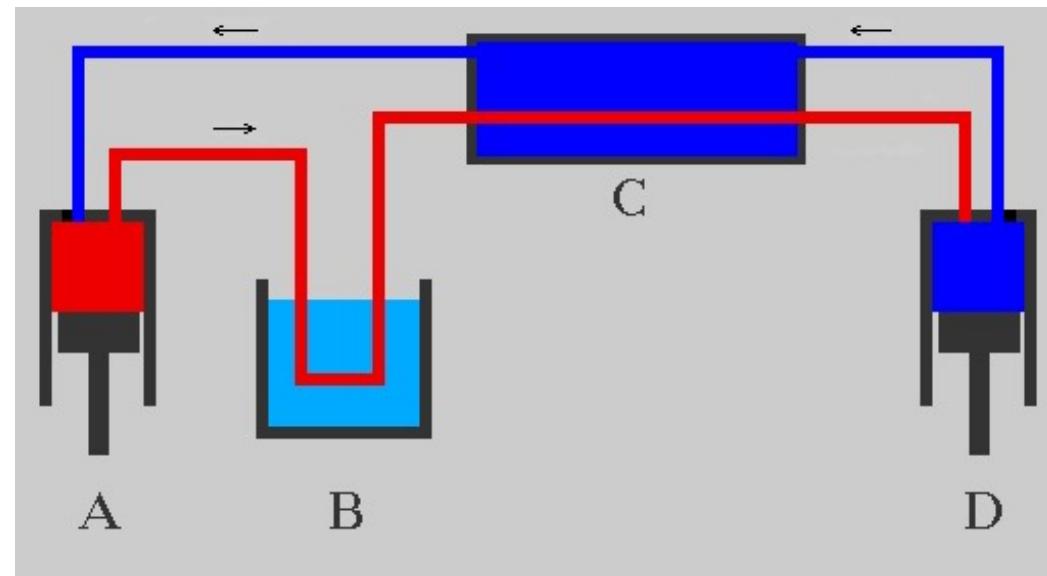
Liquéfacteur

- échangeur de chaleur:
le gaz qui s'échappe refroidit le gaz entrant qui est ainsi de plus en plus froid avant la détente de Joule-Thompson
- on observe la liquéfaction du gaz dans la partie inférieure du cryostat
- la détente de Joule-Thompson ne permet de refroidir le gaz que s'il se trouve en dessous de sa température d'inversion
- example: helium $T_C = 5.3\text{K}$ $\rightarrow T_{inversion} = 33\text{K}$

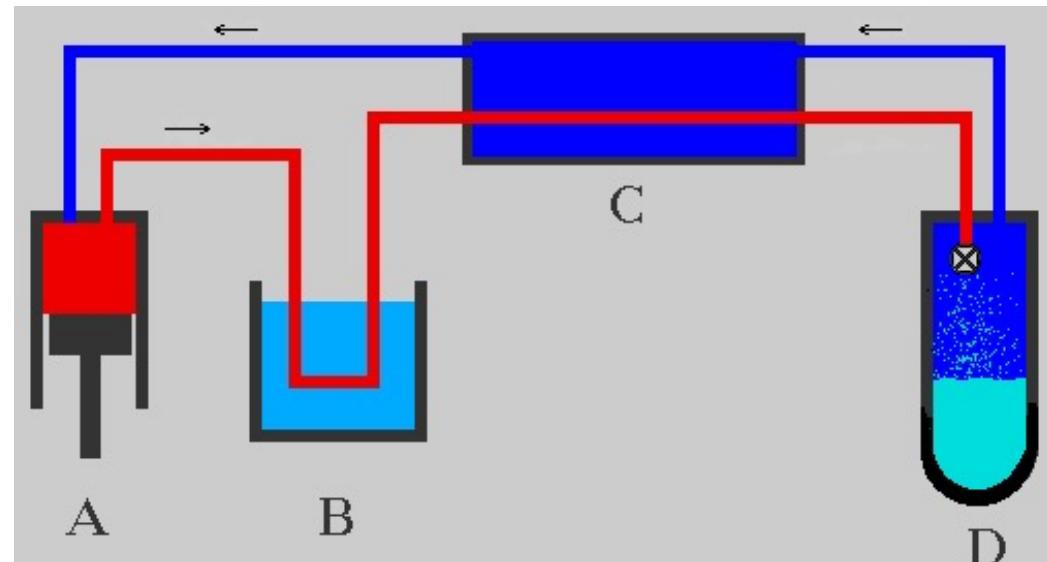


Liquéfacteur

- cycle de Siemens

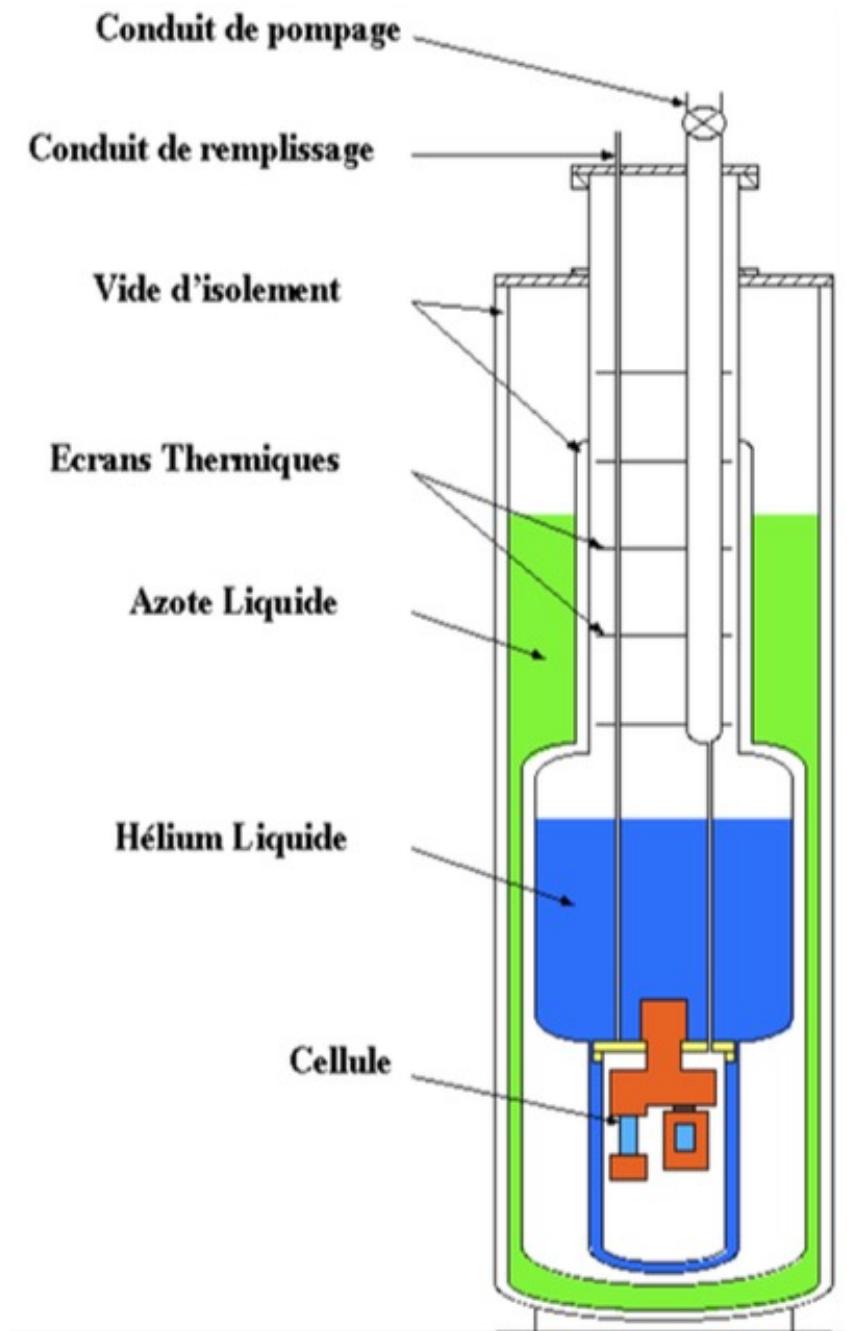


- cycle de Hampson-Linde



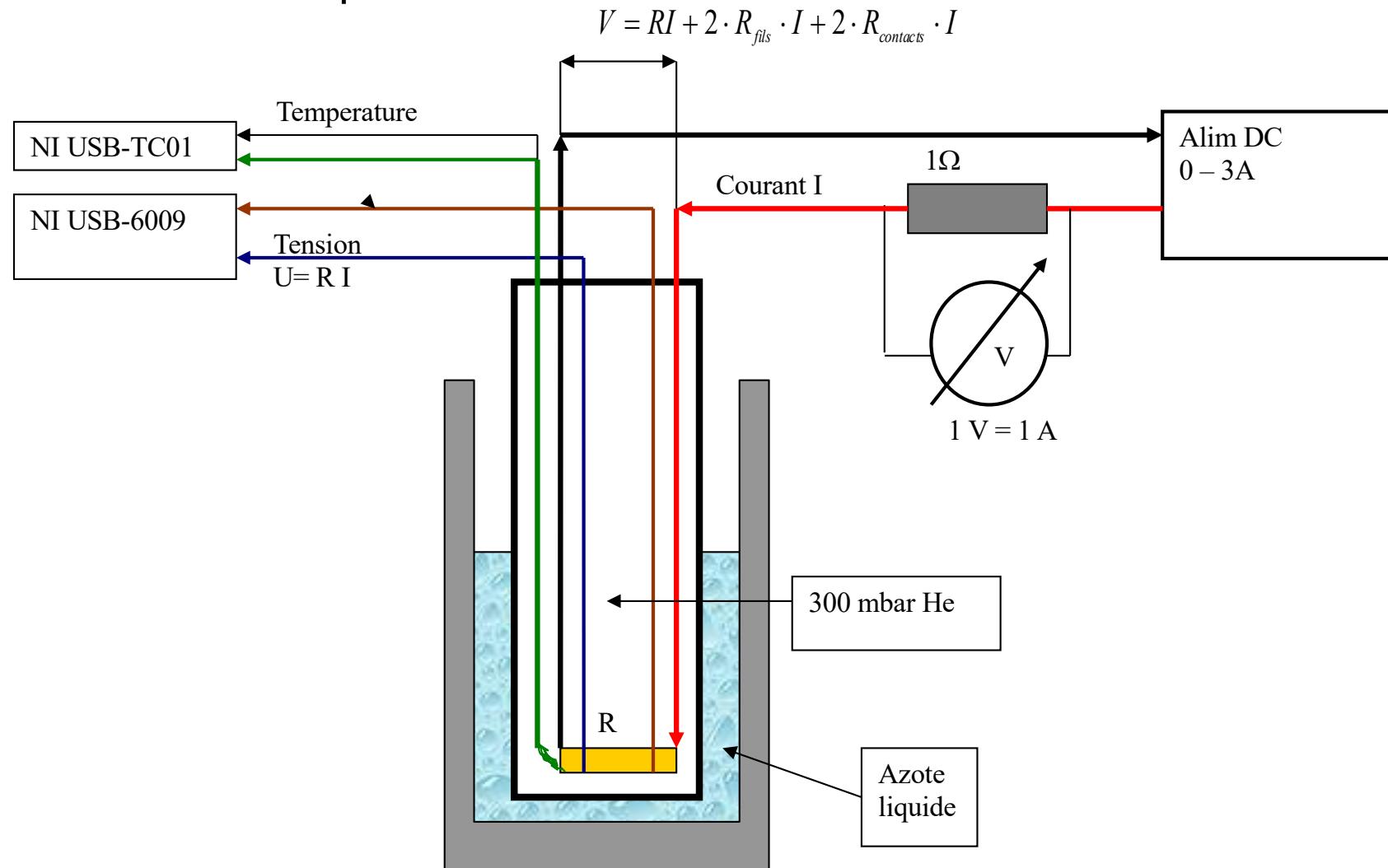
Structure typique d'un cryostat

- Minimiser les pertes par rayonnement, conduction, convection
 - emboîtement vases He + N₂
 - doubles parois avec vide d'isolement
 - série d'écrans métalliques
 - supports de faible conduction thermique



Travaux pratiques

- but:
 - mesurer l'évolution de la résistivité électrique de **BSCCO** à basse température



Mesures de la température

température

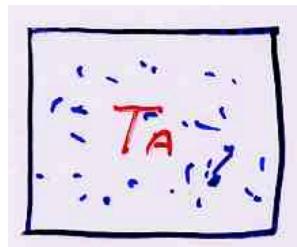
- variable intensive servant à décrire l'état d'un système
- mesure le degré d'agitation des molécules

• gaz parfait

$$\frac{1}{2}m\langle v^2 \rangle = \frac{3}{2}kT$$

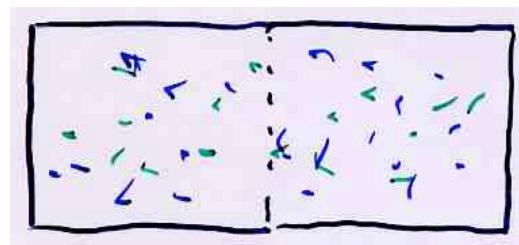
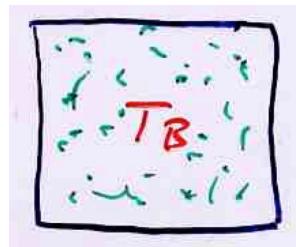
gaz A

$$\frac{1}{2}m_A\langle v_A^2 \rangle$$



gaz B

$$\frac{1}{2}m_B\langle v_B^2 \rangle$$



chocs entre molécules A et B
après un temps t

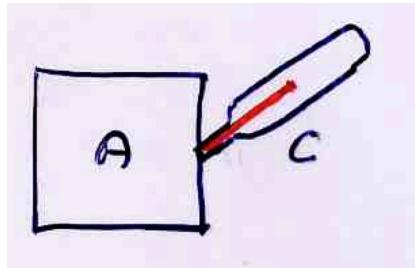
$$\frac{1}{2}m_A\langle v_A^2 \rangle = \frac{1}{2}m_B\langle v_B^2 \rangle$$

$T_A = T_B$ équilibre thermique

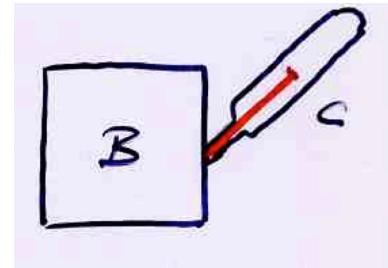
Principe zéro de la thermodynamique

Deux systèmes qui sont en équilibre thermique avec un troisième sont en équilibre thermique entre eux

→ usage du thermomètre



A en équilibre
avec C



B en équilibre
avec C

→ A en équilibre avec B

Thermomètre indique sa température!

- choisir un système qui est sensible à la température
(dilatation, résistance électrique,...)
- choisir des points fixes d'étalonnage
(mélange eau – glace, ébullition de l'eau, ébullition de l'azote,...)
- loi de variation de la grandeur ($R = R_0 (1 + \alpha T)$)

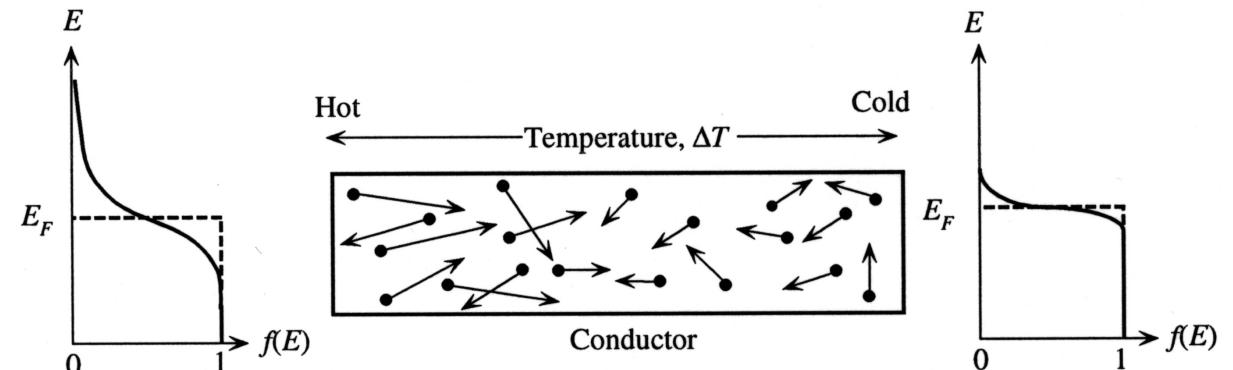
Points fixes permettant l'étalonnage des thermomètres

Substance	T °C
* Azote en ébullition	-195,8
* Acétone + CO ₂ solide	- 86
* Glace fondante	- 0,01
* Eau en ébullition à 720 torr	98,5
* Point de fusion de l'étain	213,9
* Point de fusion du plomb	327,5
* Point de fusion du zinc	419,6
* Point d'ébullition du soufre	444,7
* Point de fusion de l'aluminium	660,4
* Point de fusion de l'argent	961,9
* Point de fusion de l'or	1064,4
* Point de fusion du cuivre	1084,5
* Point de fusion du platine	1772

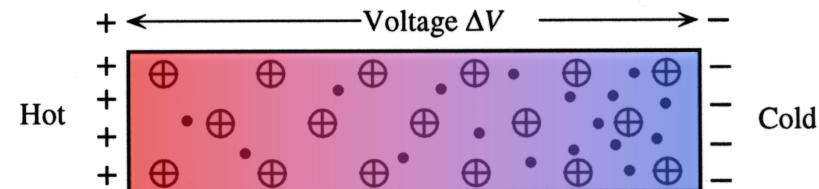
Thermocouple

- effet Seebeck

$$\Delta V = S \cdot \Delta T$$

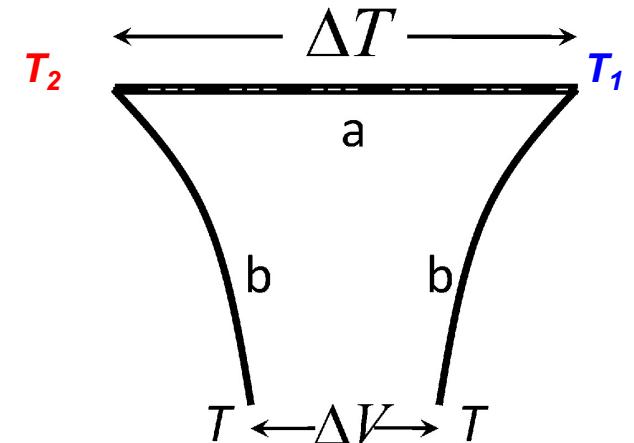


- $S(T)$: coefficient Seebeck
pouvoir thermoélectrique



- deux conducteurs différents (S_a, S_b)
& gradient de température (T_2, T_1)

$$\begin{aligned}\Delta V &= S_b (T - T_2) + S_a (T_2 - T_1) + S_b (T_1 - T) \\ &= (S_a - S_b) (T_2 - T_1)\end{aligned}$$

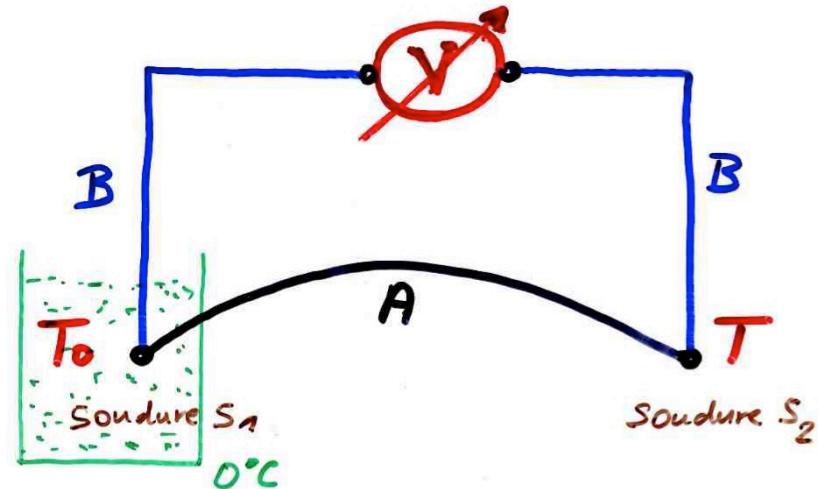


- ΔV ne dépend pas de la géométrie

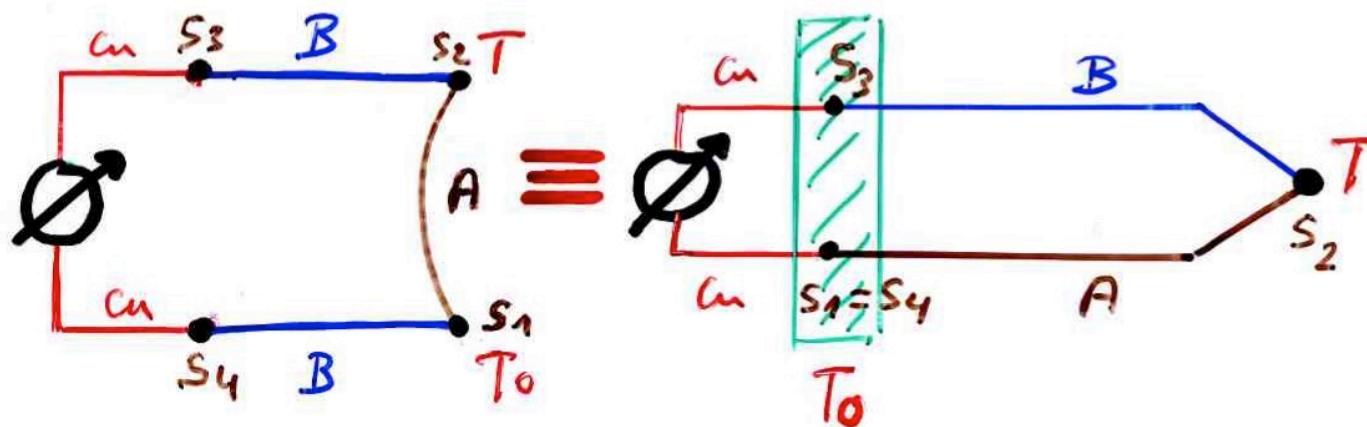
Thermocouple

- soudure froide T_0
référence
(eau – glace, N₂ liquide...)

$$\Delta V = (S_B - S_A)(T - T_0)$$



- montage amélioré
compensation de soudure froide



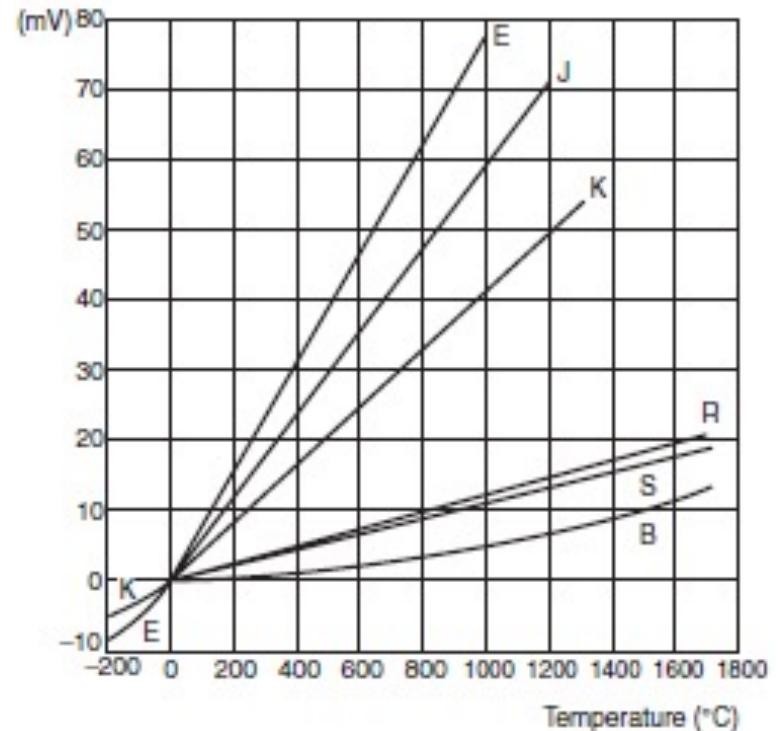
Thermocouple

- gamme des températures:
 - basses températures <= fable sensibilité
 - hautes températures <= point de fusion des métaux
- critères de choix:
 - soudure doit résister aux variations de température
 - tension thermoélectrique aussi élevée que possible
 - métaux pas trop couteux
- attention:
 - T_0 doit être constant
 - corrosion des métaux et de la soudure par certains gaz (enrober le thermocouple)
 - tensions parasites des connexions

Thermocouple

- exemples:

Type	Materials*	Typical Range °C
T ^{1,2}	Copper (Cu) vs Constantan	-270 to 400
J ^{1,3}	Iron (Fe) vs Constantan	-210 to 1200
K	Chromel vs Alumel	-270 to 1370
E	Chromel vs Constantan	-270 to 1000
S	(Pt-10%Rh) vs Pt	-50 to 1768
B	(Pt-13% Rh) vs (Pt-6% Rh)	0 to 1820
R	(Pt-13%Rh) vs Pt	-50 to 1768



$V(T)$ n'est pas linéaire!

MAXIMUM TEMPERATURE RANGE
Thermocouple Grade
– 328 to 2282°F
– 200 to 1250°C

Extension Grade
32 to 392°F
0 to 200°C

LIMITS OF ERROR
(whichever is greater)

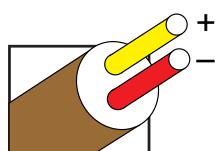
Standard: 2.2°C or 0.75% Above 0°C
2.2°C or 2.0% Below 0°C

Special: 1.1°C or 0.4%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:

Clean Oxidizing and Inert; Limited Use in Vacuum or Reducing; Wide Temperature Range; Most Popular Calibration

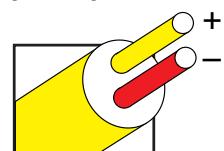
TEMPERATURE IN DEGREES °C
REFERENCE JUNCTION AT 0°C



Thermocouple Grade

Nickel-Chromium
vs.
Nickel-Aluminum

Extension Grade



Revised Thermocouple Reference Tables

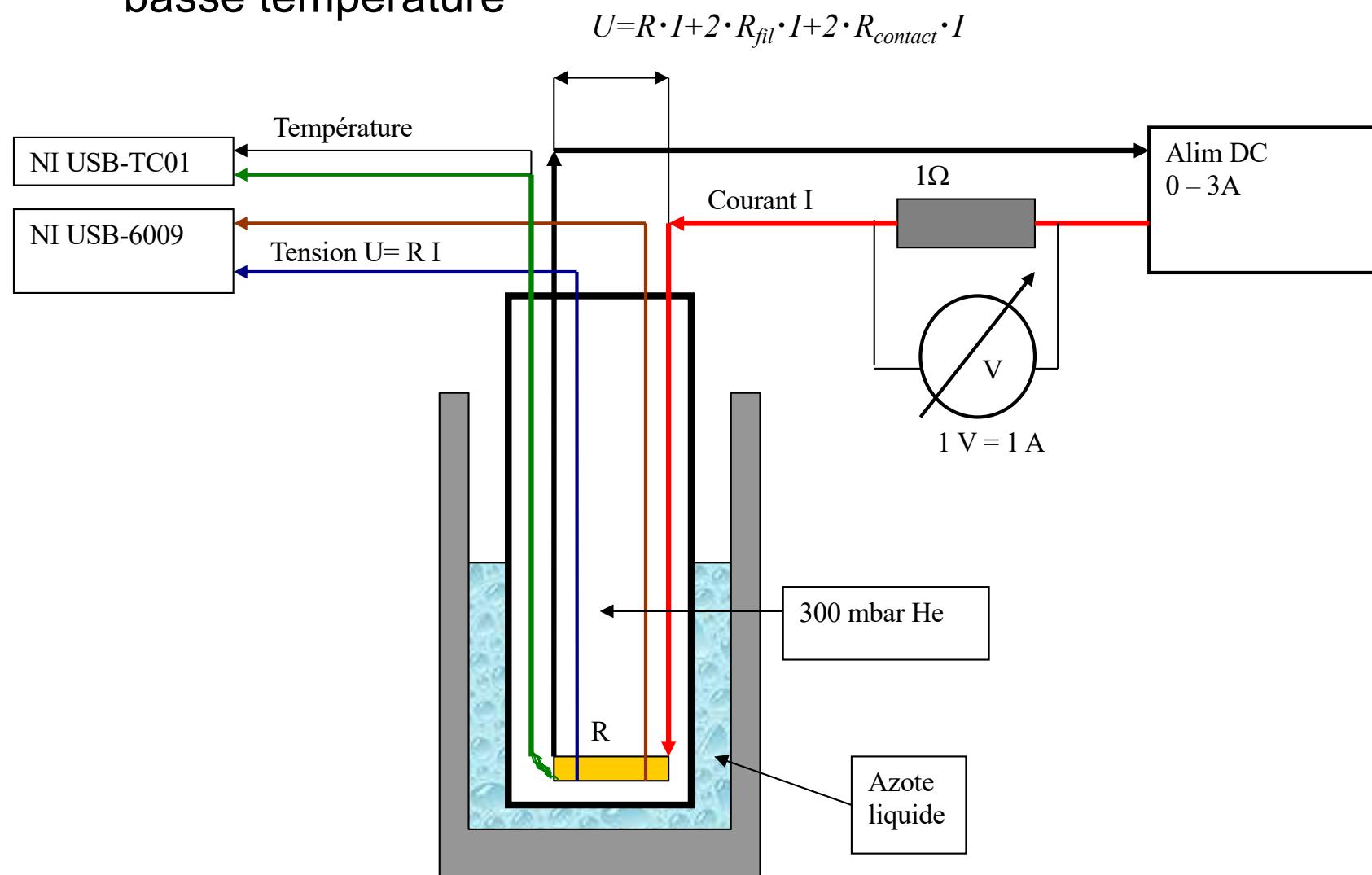
TYPE K
Reference Tables
N.I.S.T.
Monograph 175
Revised to
ITS-90

K

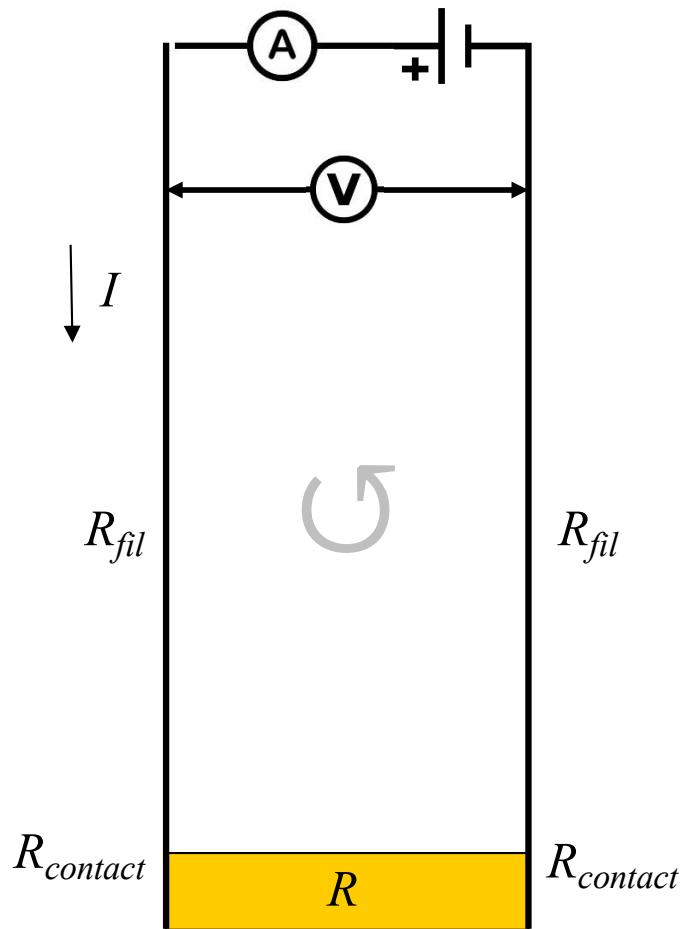
Z

Travaux pratiques

- but:
 - mesurer l'évolution de la résistivité électrique de **BSCCO** à basse température

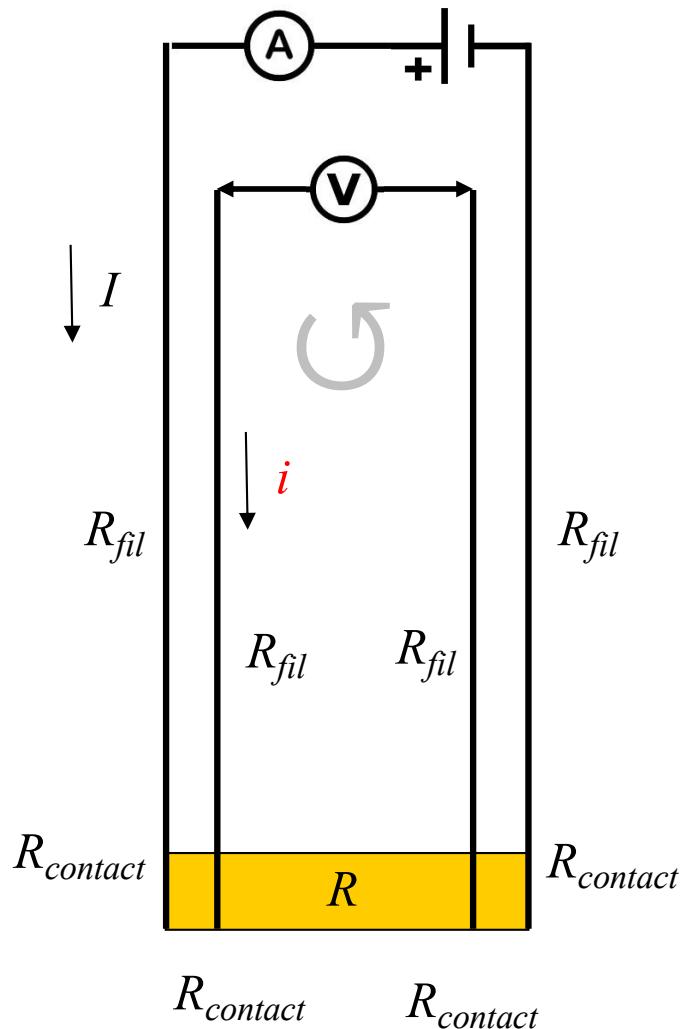


Mesure de la résistivité électrique par la méthode à 2 fils



$$U_2 = R \cdot I + 2 \cdot R_{fil} \cdot I + 2 \cdot R_{contact} \cdot I$$

Mesure de la résistivité électrique par la méthode à 4 fils

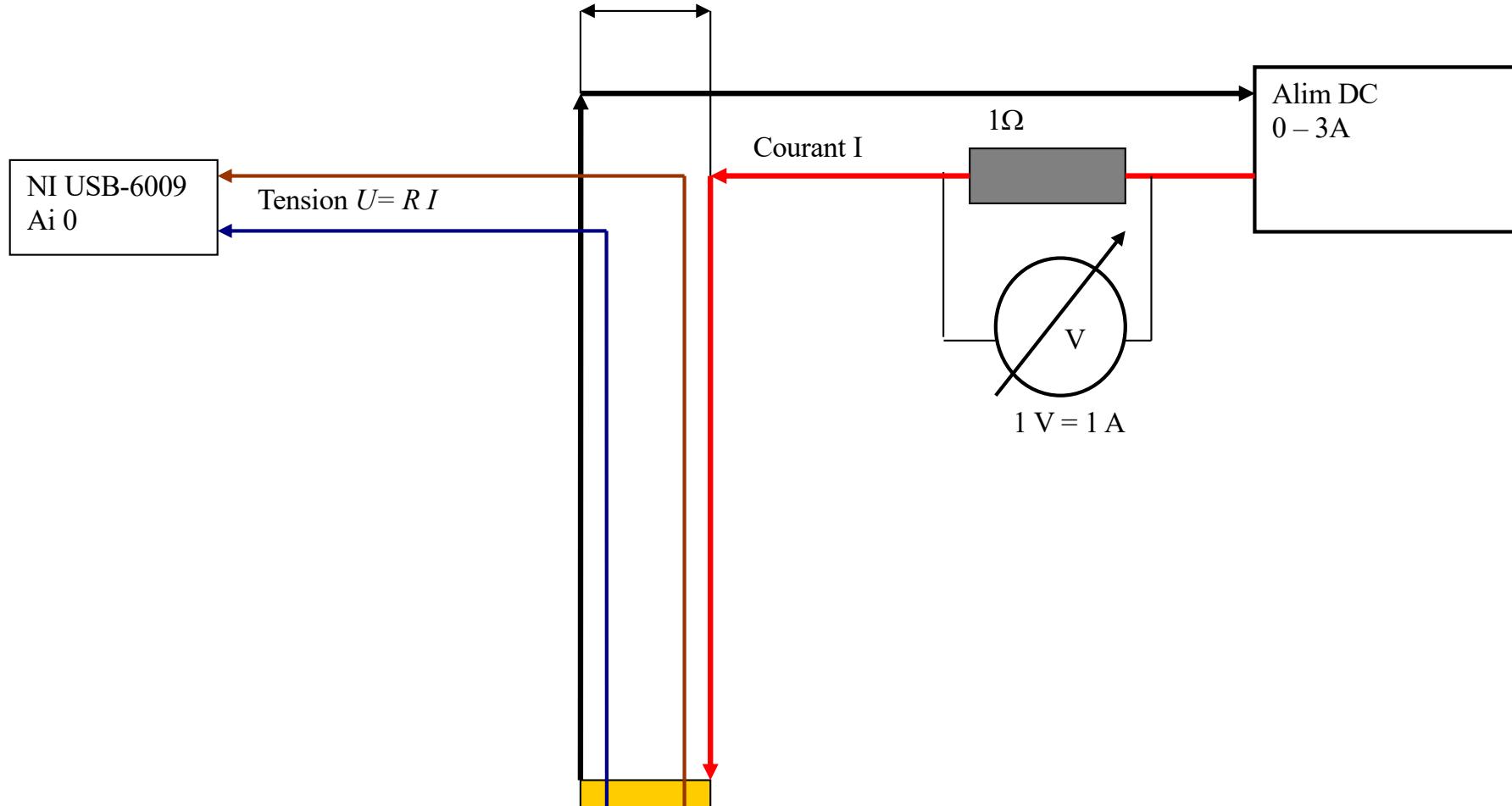


$$U_4 = R \cdot I + 2 \cdot R_{fil} \cdot i + 2 \cdot R_{contact} \cdot i$$

$$R_{voltmètre} \gg R \quad \Rightarrow \quad i \ll I$$

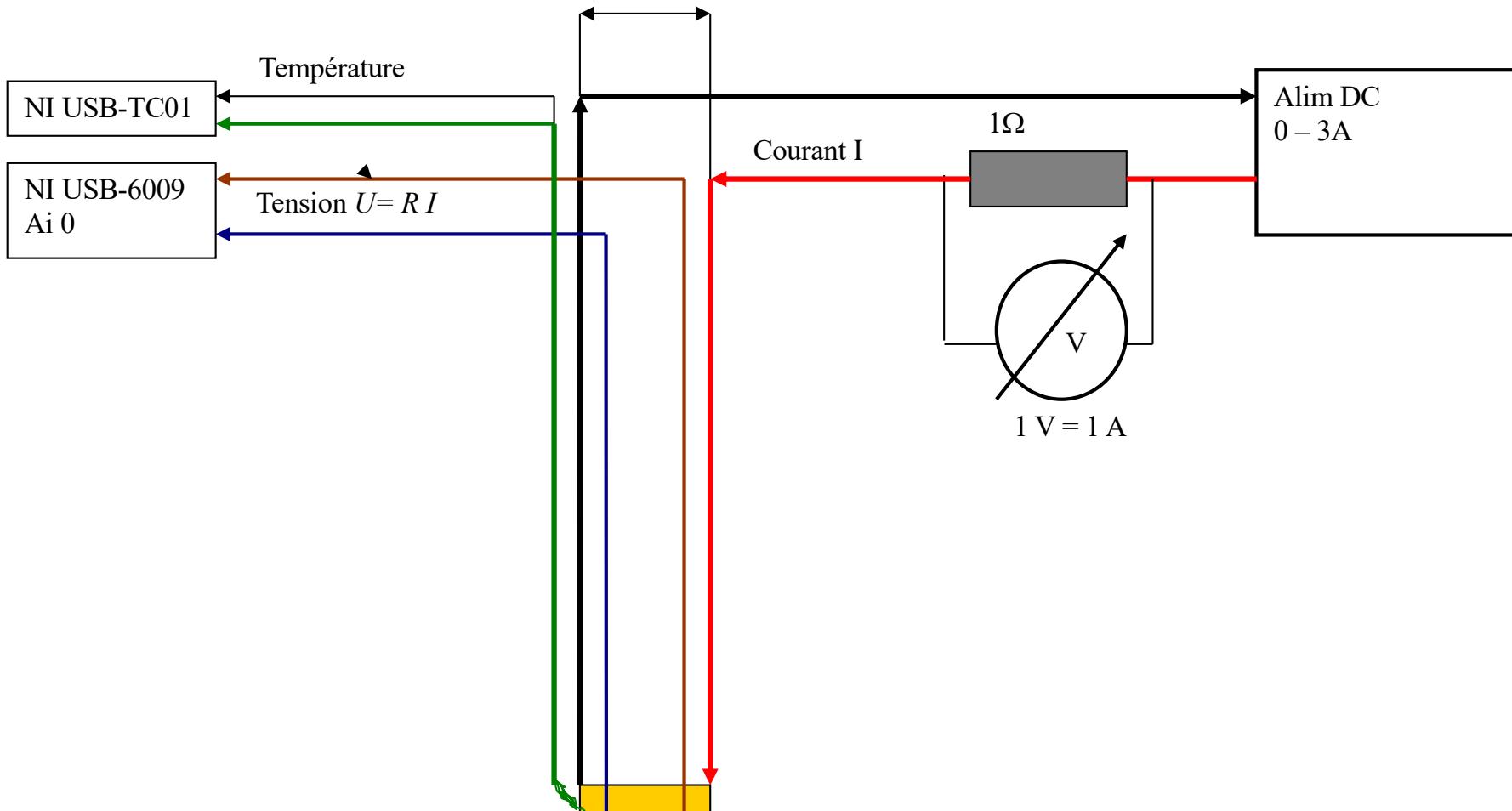
CABLAGE INSTALLATION DE MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE

$$U = R \cdot I + 2 \cdot R_{fil} \cdot I + 2 \cdot R_{contact} \cdot I$$



CABLAGE INSTALLATION DE MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE

$$U = R \cdot I + 2 \cdot R_{fil} \cdot I + 2 \cdot R_{contact} \cdot I$$



CABLAGE INSTALLATION DE MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE A BASSE TEMPERATURE

$$U = R \cdot I + 2 \cdot R_{fil} \cdot I + 2 \cdot R_{contact} \cdot I$$

