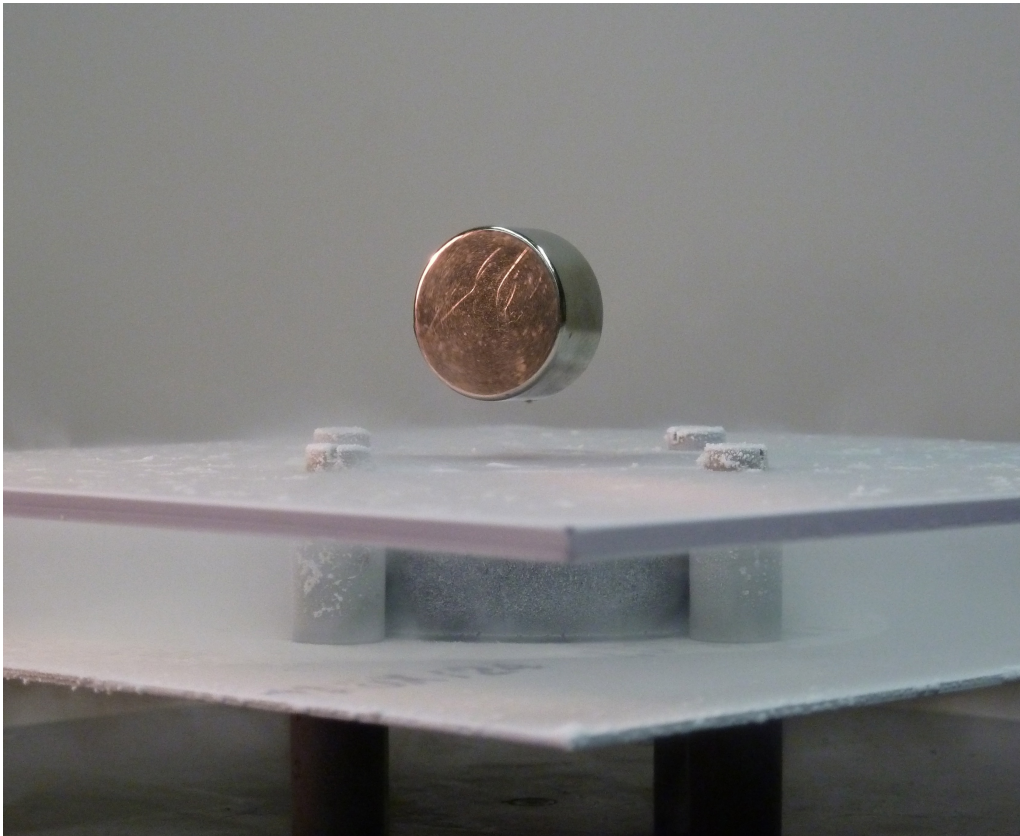


Cryogénie



Liquéfaction des gaz
Supraconductivité
Mesures de la température

Cryogénie

l'étude et la production des basses températures

$0 \text{ K} < \text{températures cryogéniques} < 120 \text{ K}$

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

gaz	$T_{\text{liq}} [\text{K}]$	$T_{\text{liq}} [^{\circ}\text{C}]$
O ₂	90.2	-183
N ₂	77.4	-195.8
H ₂	20.3	-252.9
He	4.2	-269

Cryogénie - applications

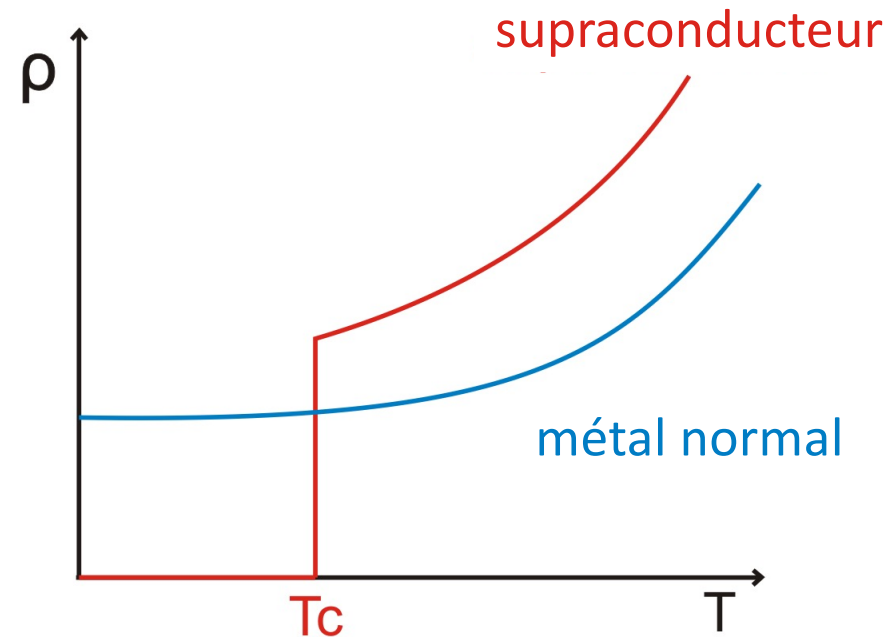
- Réduction de volume
stockage et transport de combustibles et fluides cryogéniques



- 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)

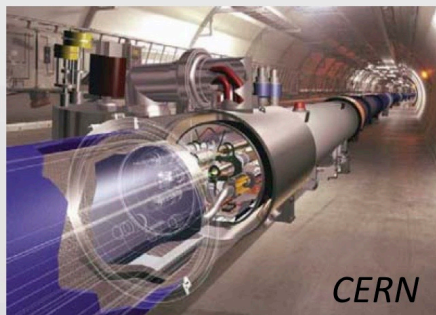
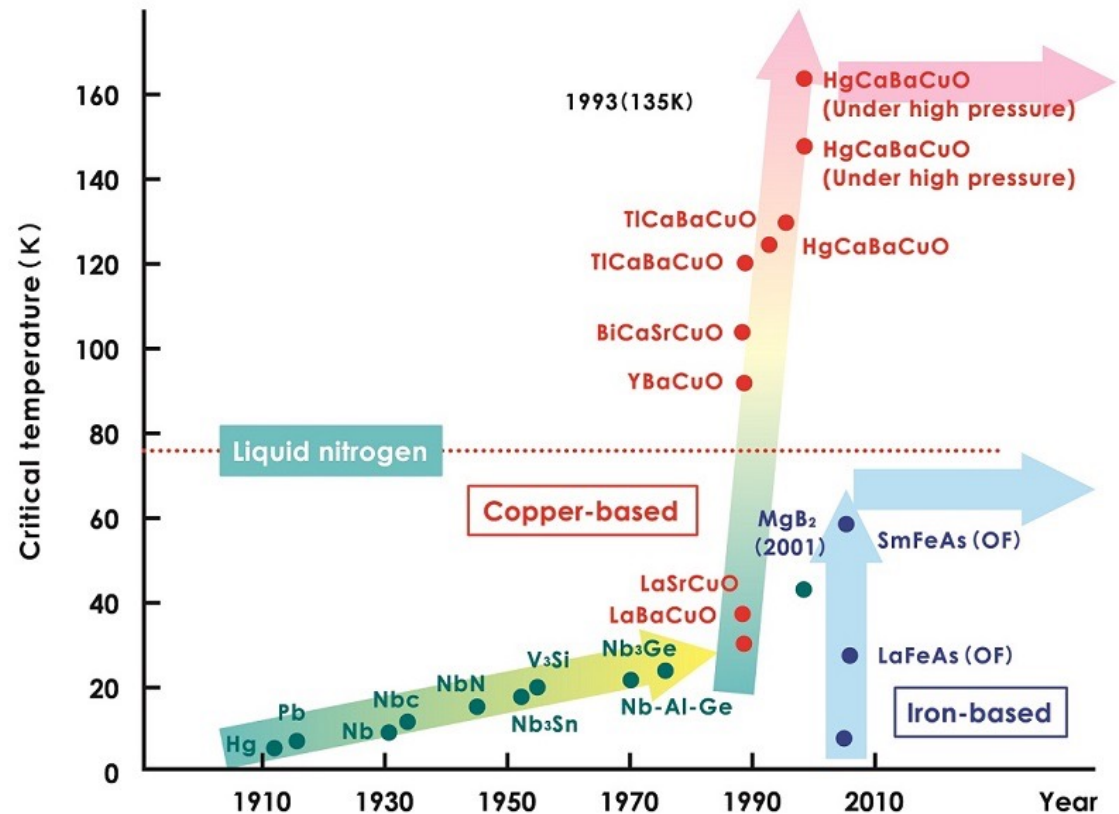


- Kamerlingh Onnes
- 1908: liquéfaction de l'hélium (4.2 K)
- 1911: découverte de la supraconductivité dans Hg ($T_c=4.2$ K), Pb (7.2 K) et Sn (3.7 K)
- 1913: Prix Nobel

Supraconductivité à haute température



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



CERN



IRM

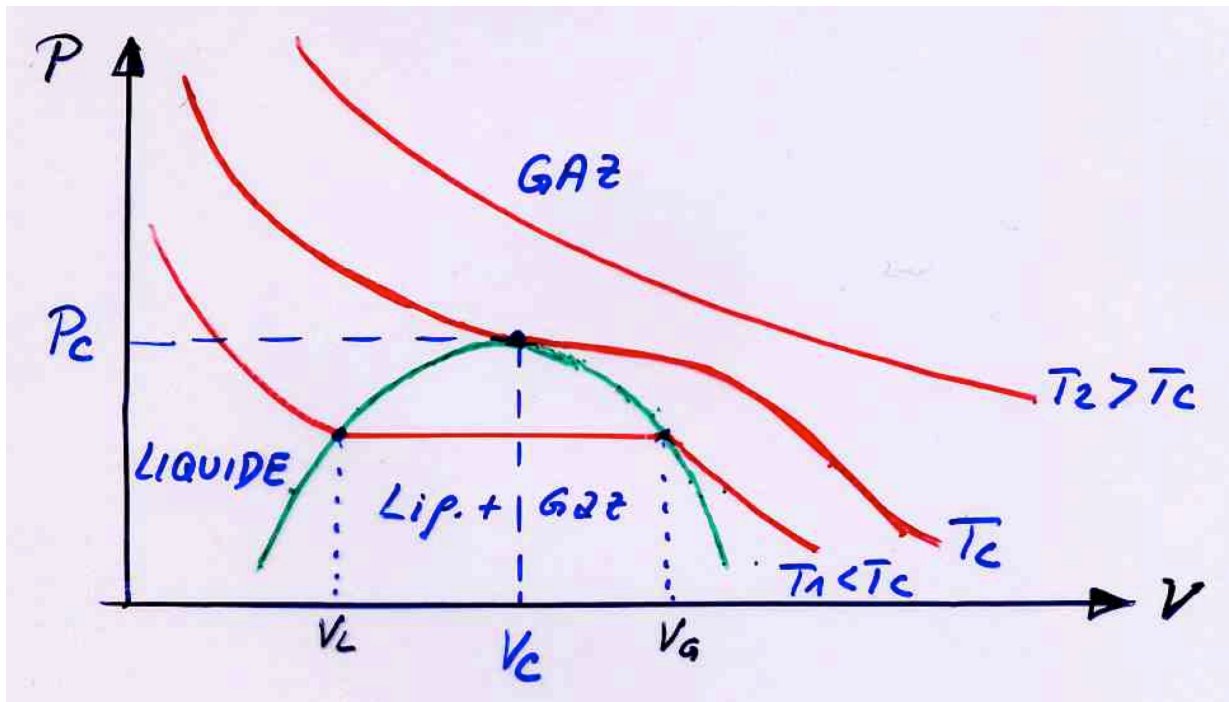


Train à lévitation magnétique (Maglev)

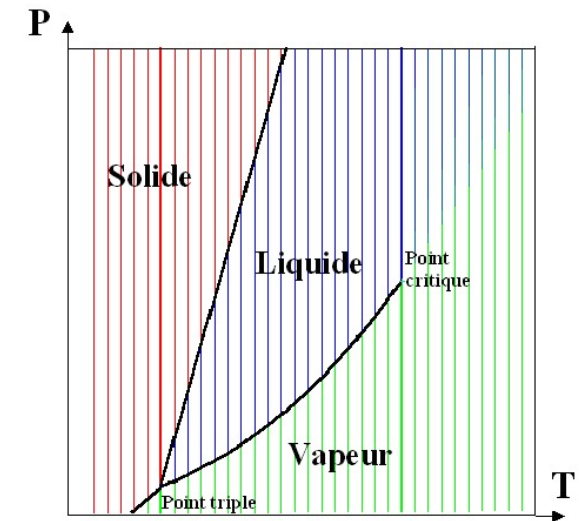
Produire du froid

extraire la chaleur d'un gaz

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



liquéfaction possible
si $T < T_c$



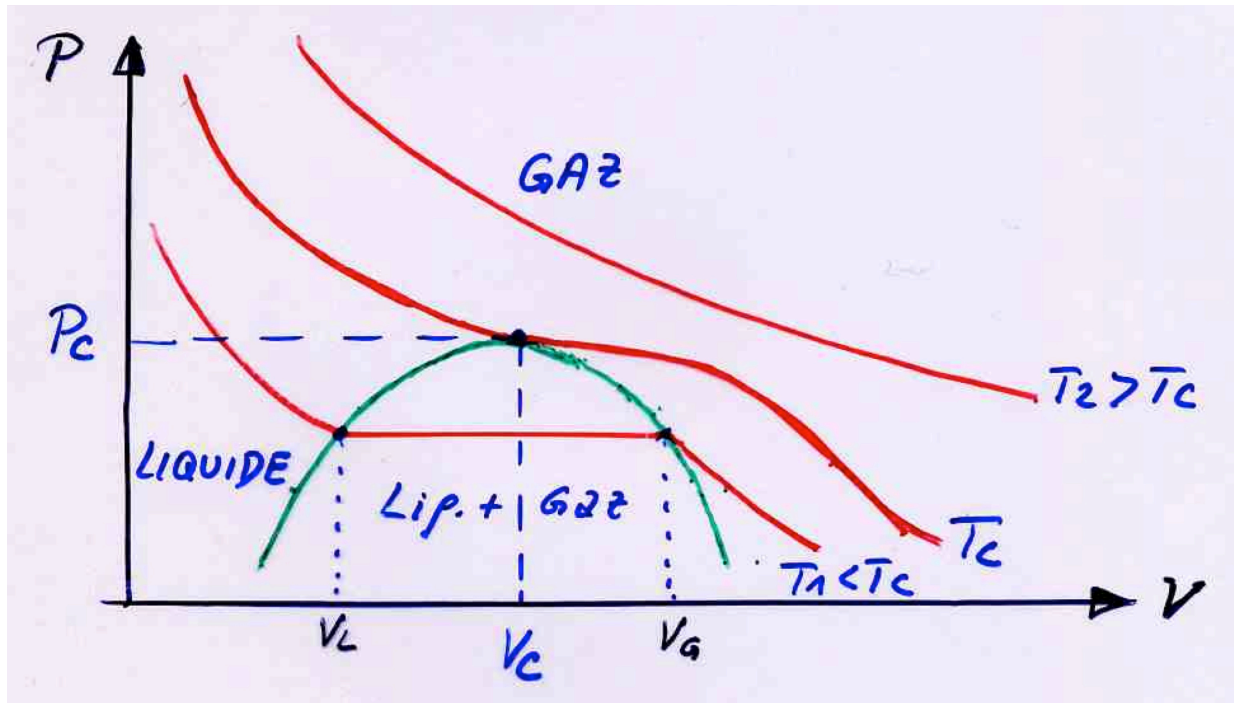
<http://alain.lerille.free.fr/>

- 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

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

variation d'énergie interne chaleur fournie travail fourni

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

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

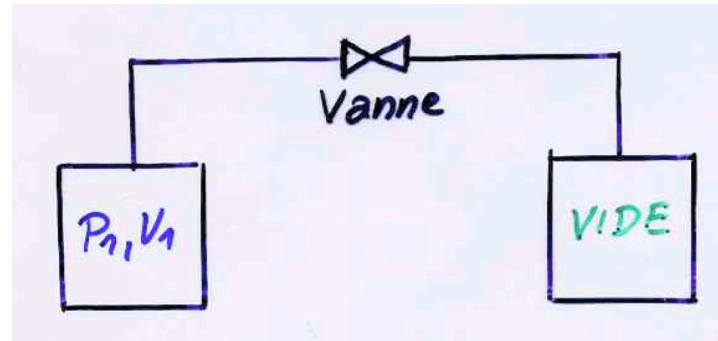
échauffement à volume const. V_1 compression du gaz dans le volume V_1

- 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 $V_2 > V_1 \Rightarrow \underline{T_1 > T_2}$
- 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

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

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

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

$$(C_V + R)T_1 + P_1 b - \frac{2a}{V_1} = (C_V + R)T_2 + P_2 b - \frac{2a}{V_2}$$

$$\uparrow \frac{1}{V_1} \sim \frac{P_1}{RT}$$

$$\uparrow \frac{1}{V_2} \sim \frac{P_2}{RT}$$

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

- comme $P_1 > P_2$ $\Rightarrow T_1 > T_2$ si $\frac{2a}{RT} - b > 0$
 $\Rightarrow T_1 < T_2$ si $\frac{2a}{RT} - b < 0$

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

- gaz de Van der Waals:

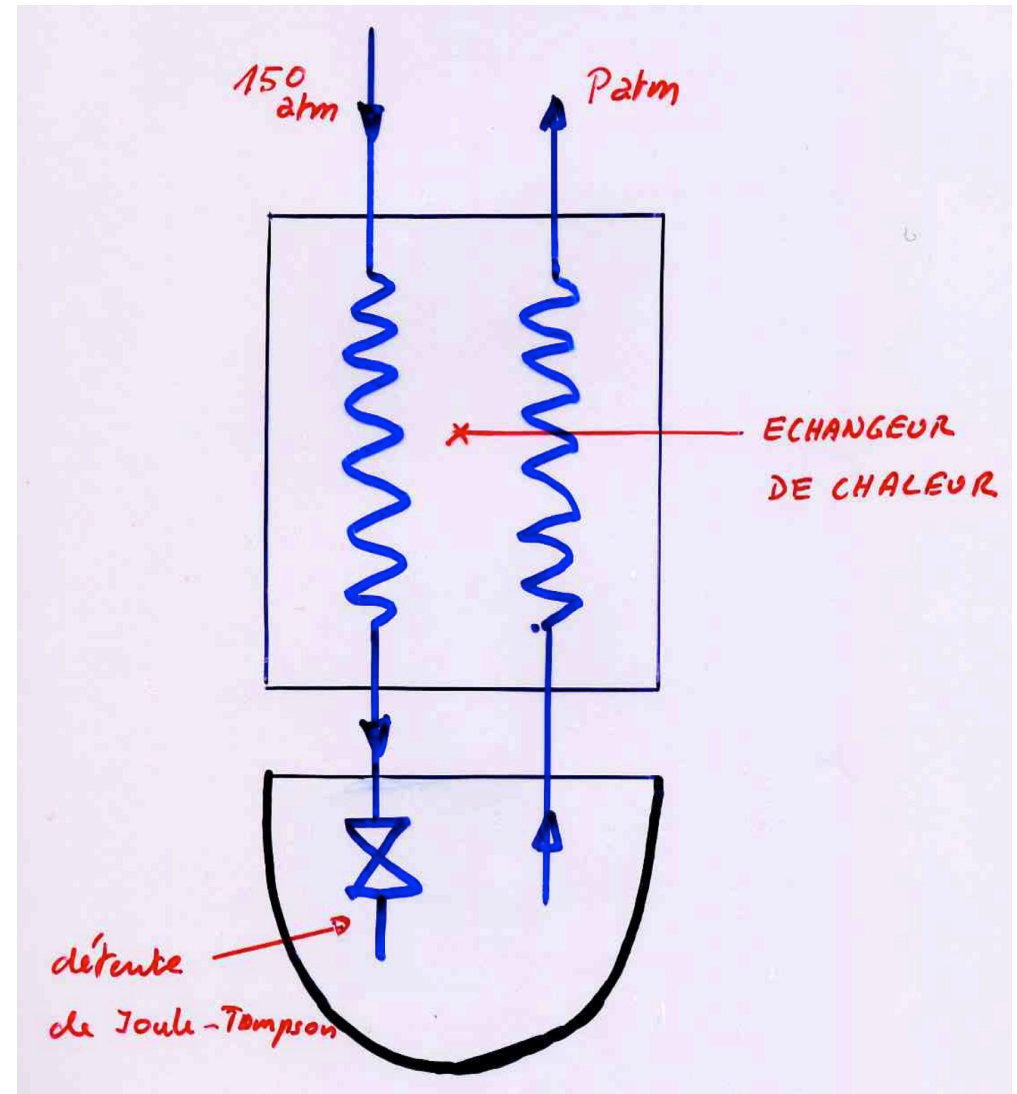
$$T_c = \frac{8a}{27Rb}$$



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

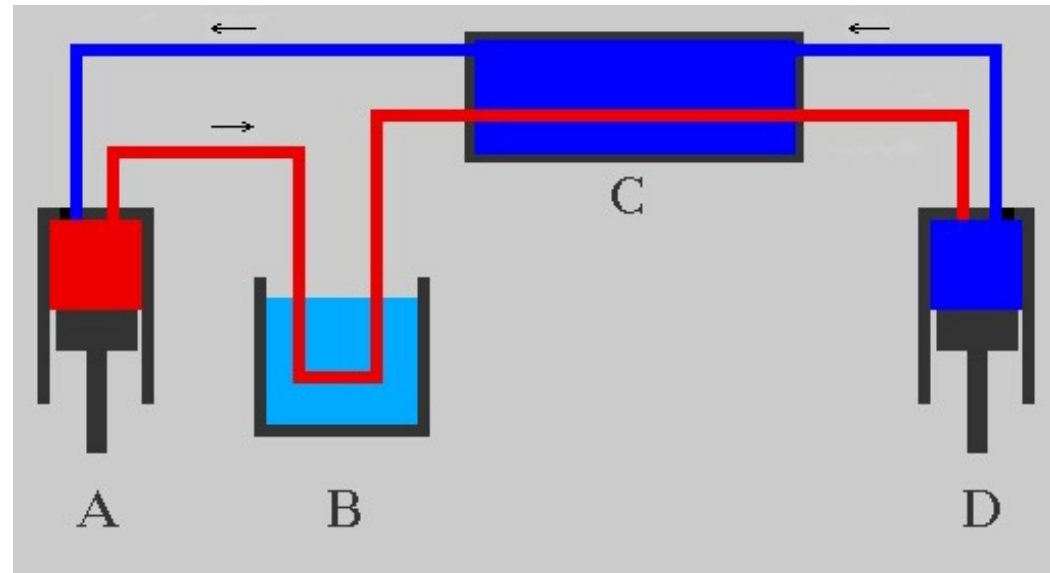
Liquéfacteur

- 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
- exemple: helium $T_C = 5.3\text{K} \Rightarrow T_{\text{inversion}} = 33\text{K}$

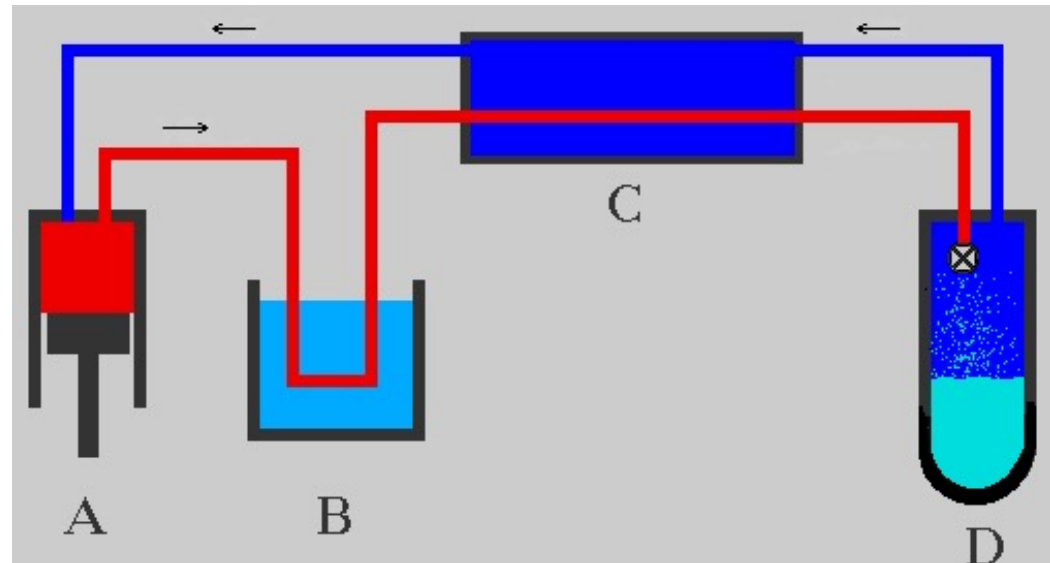


Liquéfacteur

- cycle de Siemens

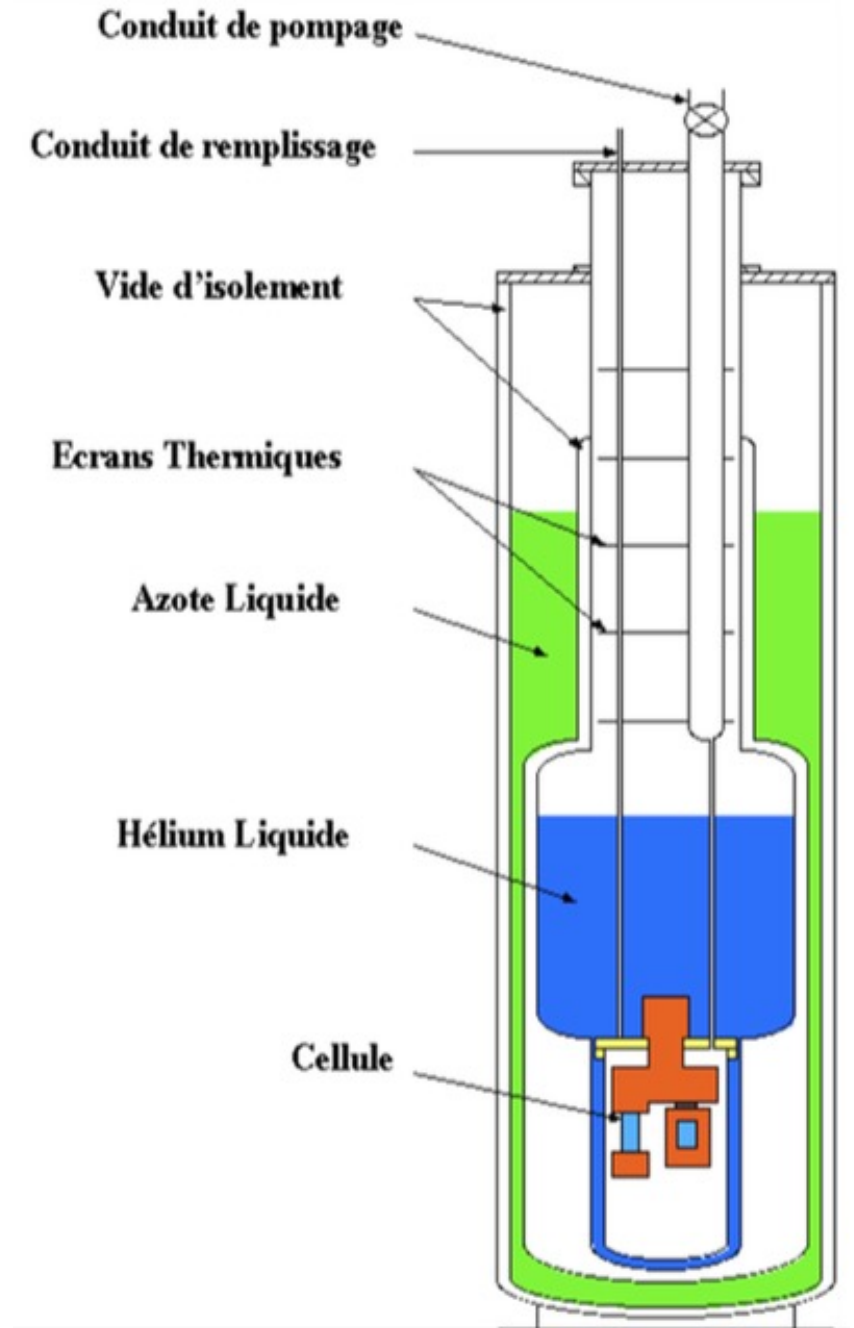


- cycle de Hampson-Linde



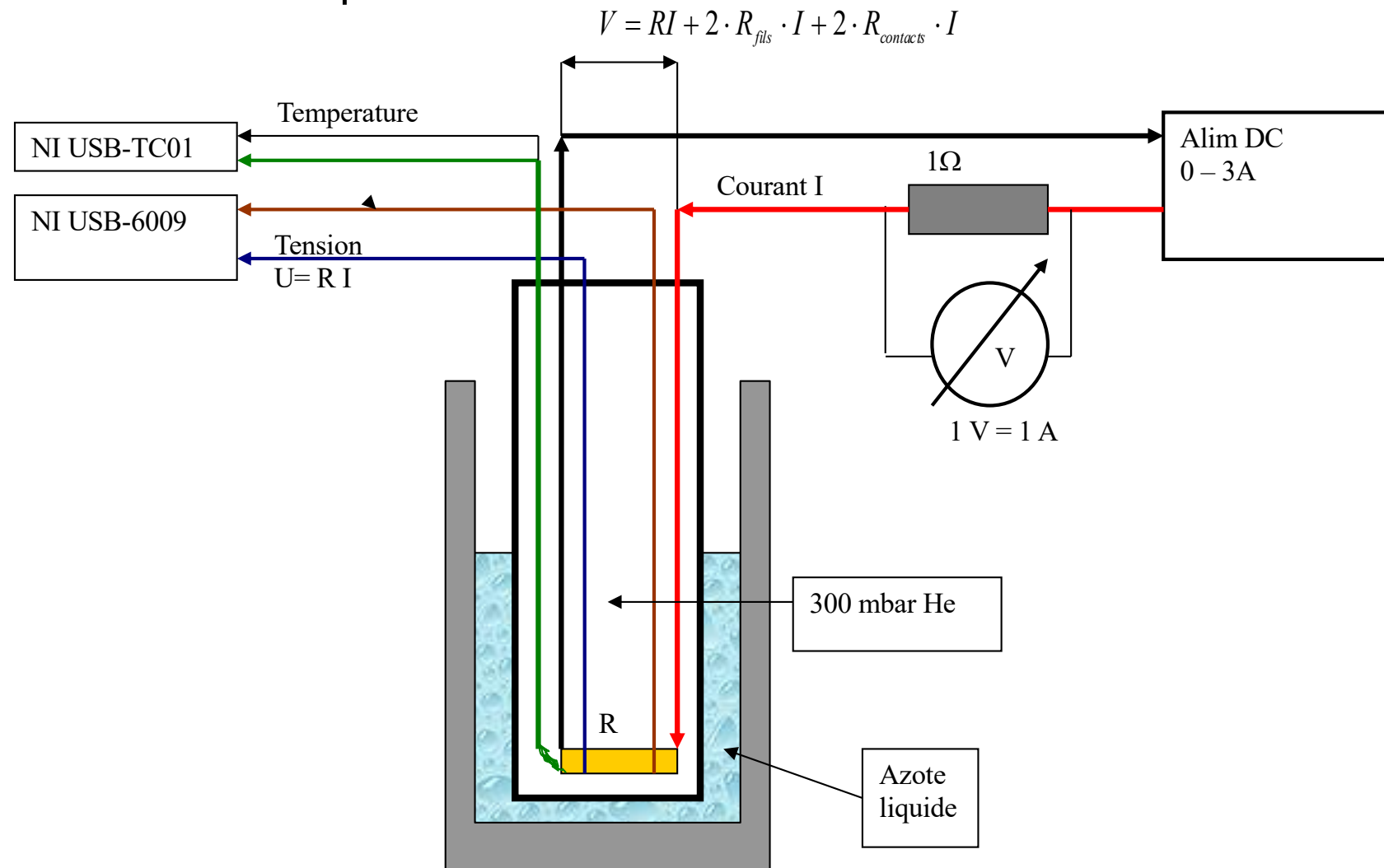
Structure typique d'un cryostat

- 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



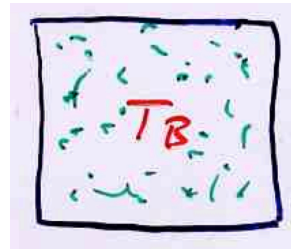
Mesures de la température

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

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

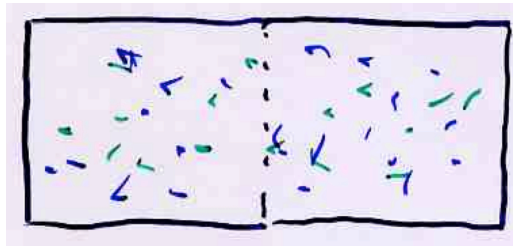
gaz A

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



gaz B

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



chocs entre molécules A et B

après un temps t

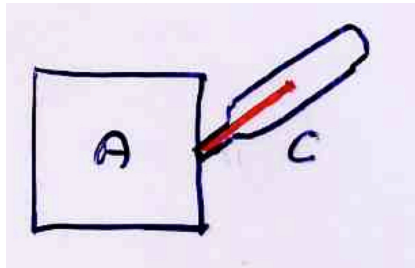
$$\frac{1}{2} m_A \langle v_A^2 \rangle = \frac{1}{2} m_B \langle v_B^2 \rangle$$

$T_A = T_B$ équilibre thermique

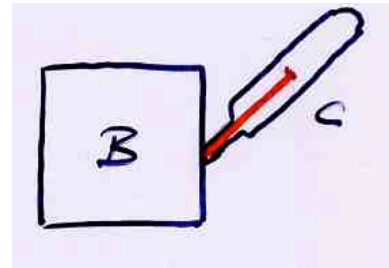
Principe zéro de la thermodynamique

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

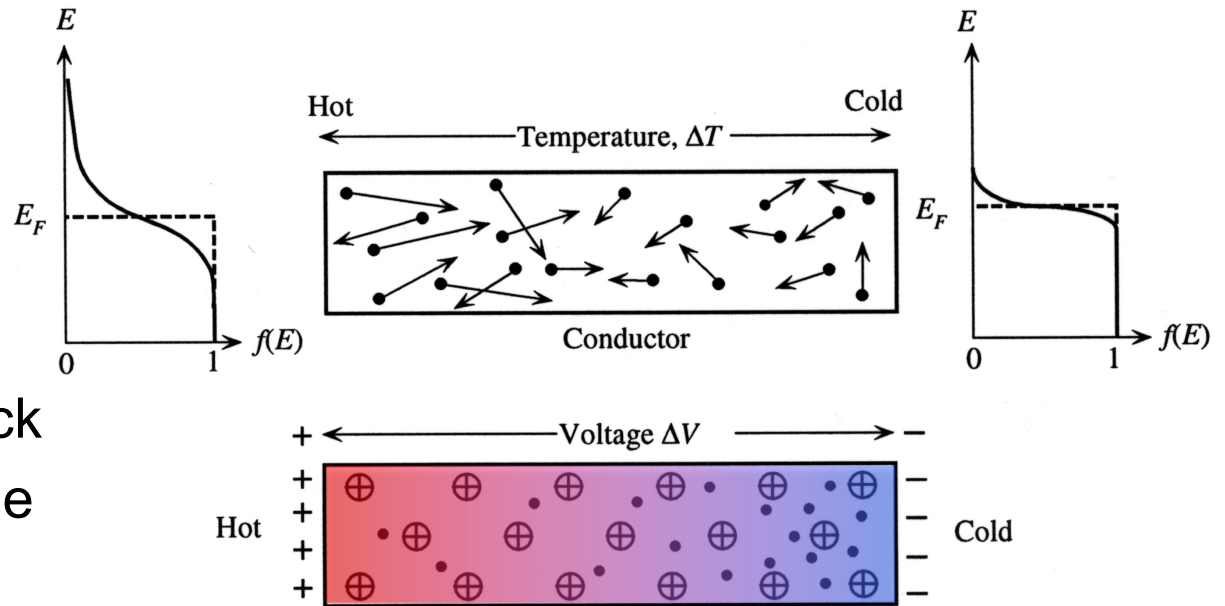
Substance	T °C
* Azote en ébullition	-195,8
* Acétone + CO ₂ solide	- 86
* Glace fondante	- 0,01
* Eau en ébullition à 720 torr	98,5
* Point de fusion de l'étain	213,9
* Point de fusion du plomb	327,5
* Point de fusion du zinc	419,6
* Point d'ébullition du soufre	444,7
* Point de fusion de l'aluminium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

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

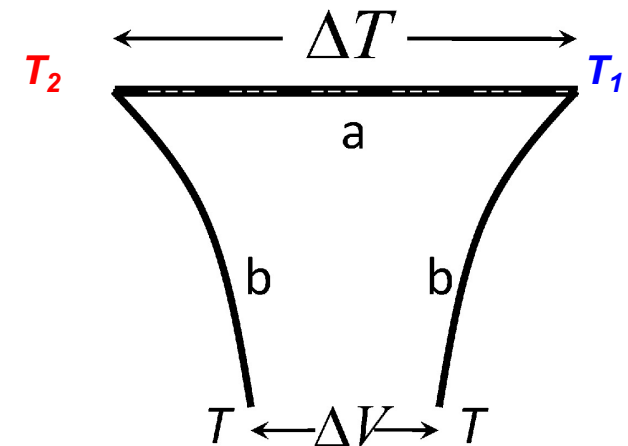
- $S(T)$: coefficient Seebeck
pouvoir thermoélectrique



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

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

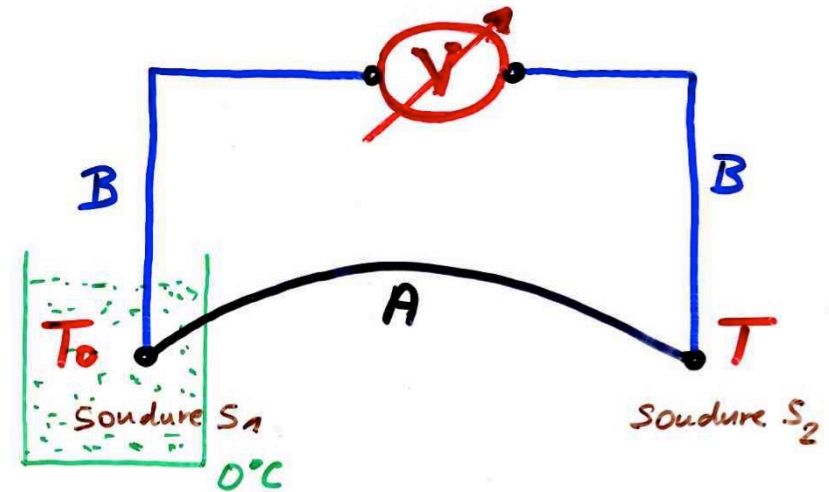
- ΔV ne dépend pas de la géométrie



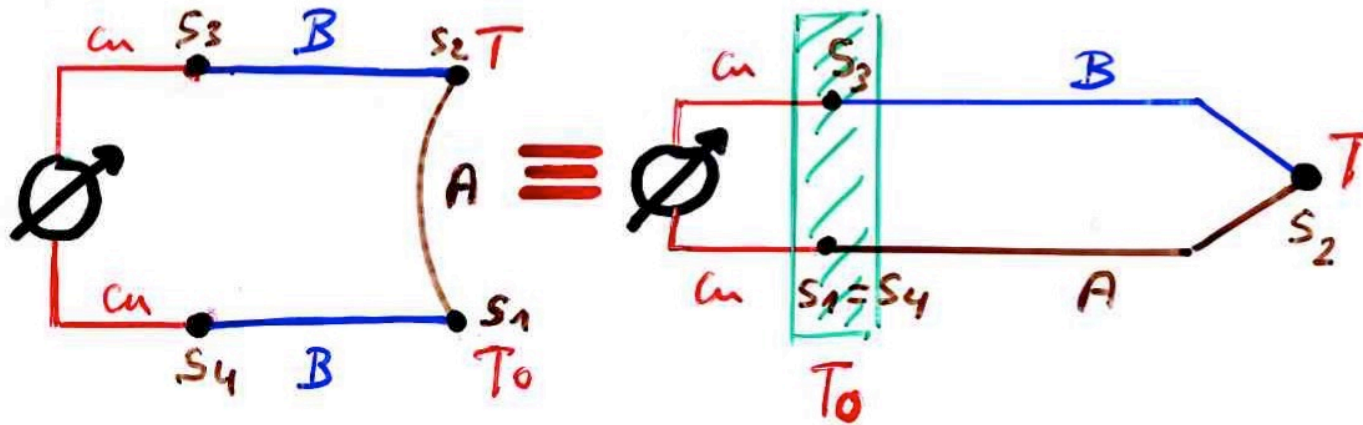
Thermocouple

- soudure froide T_0
référence
(eau – glace, N_2 liquide...)

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



- montage amélioré
compensation de soudure froide



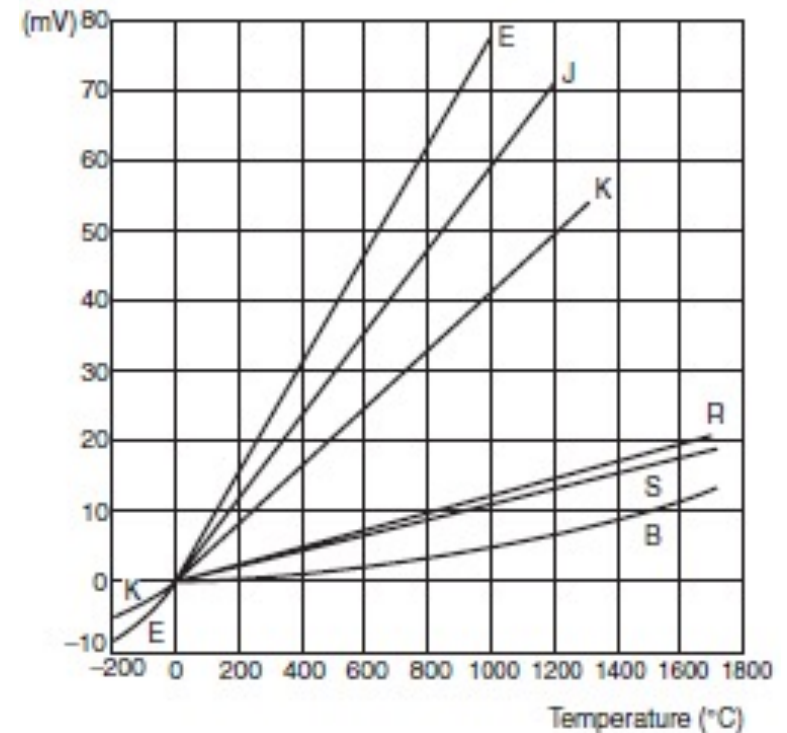
Thermocouple

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

Thermocouple

- examples:

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

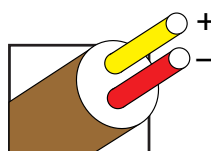
Special: 1.1°C or 0.4%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:

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

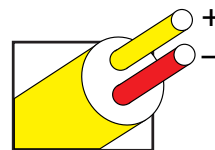
TEMPERATURE IN DEGREES °C

REFERENCE JUNCTION AT 0°C



Thermocouple Grade

Nickel-Chromium
vs.
Nickel-Aluminum



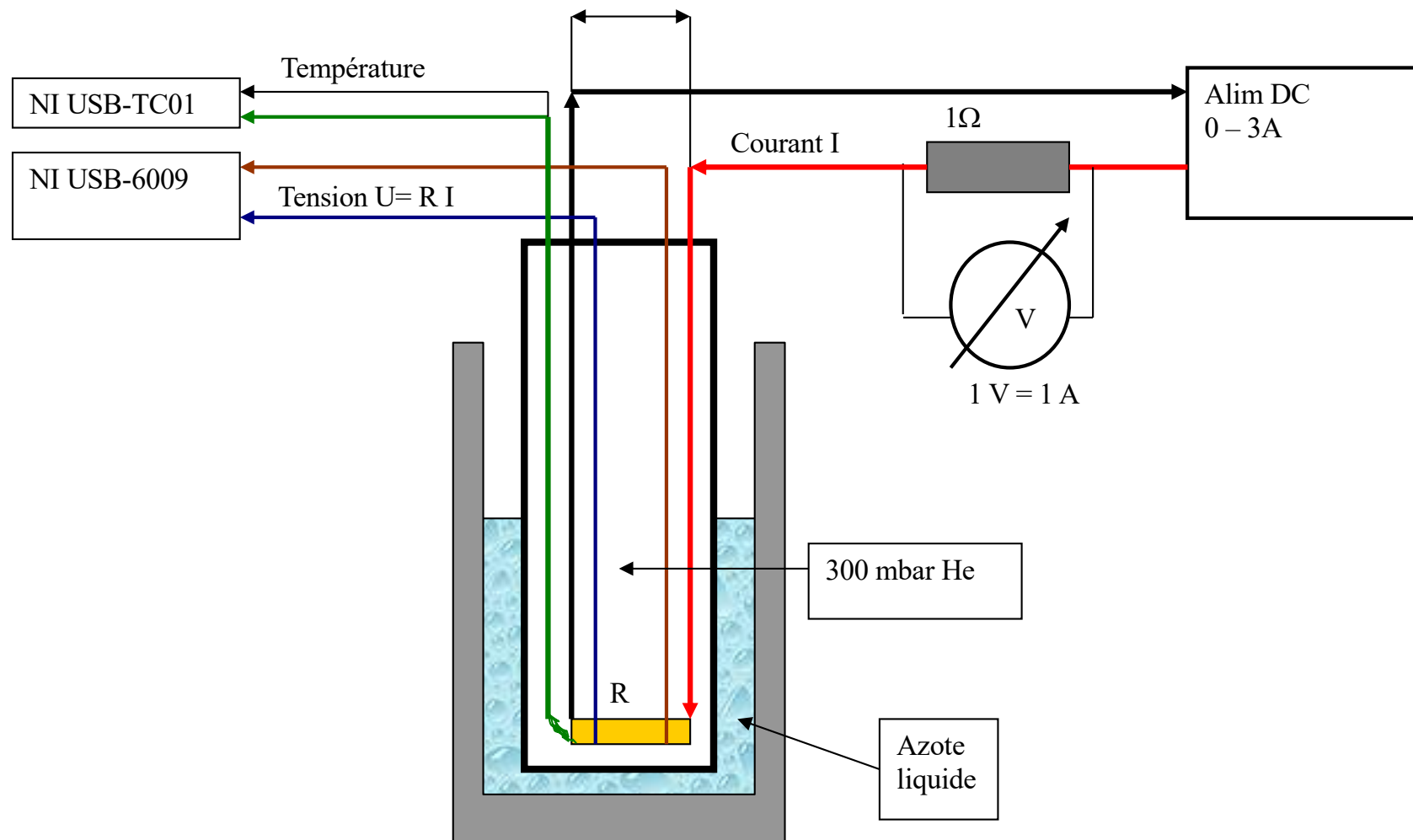
Extension Grade

Revised Thermocouple Reference Tables

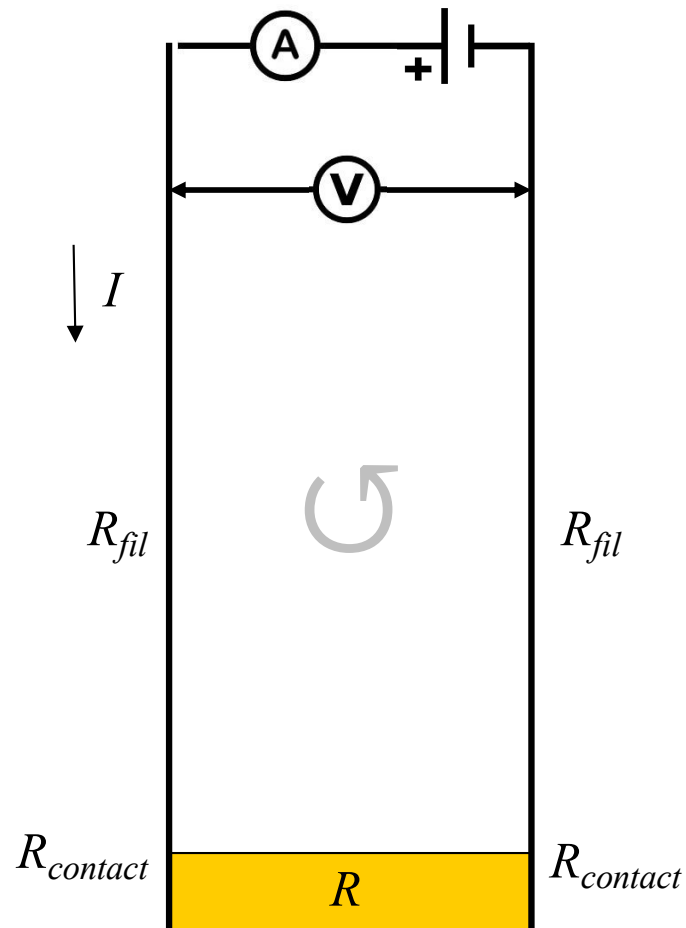
TYPE K
Reference
Tables
N.I.S.T.
Monograph 175
Revised to
ITS-90

- but:

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

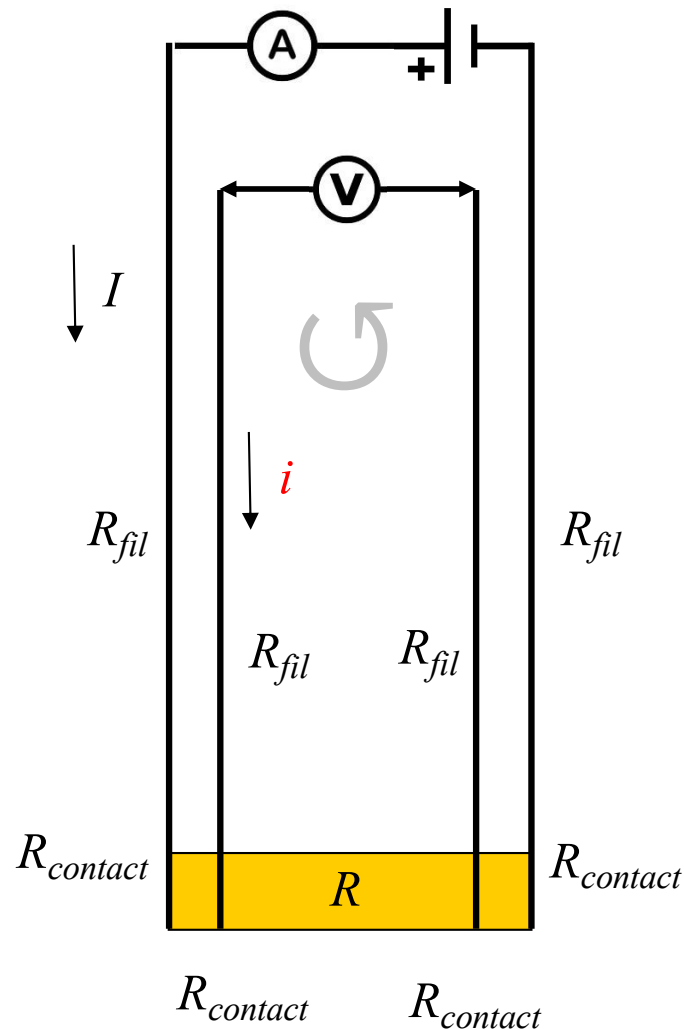


Mesure de la résistivité électrique par la méthode à 2 fils



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

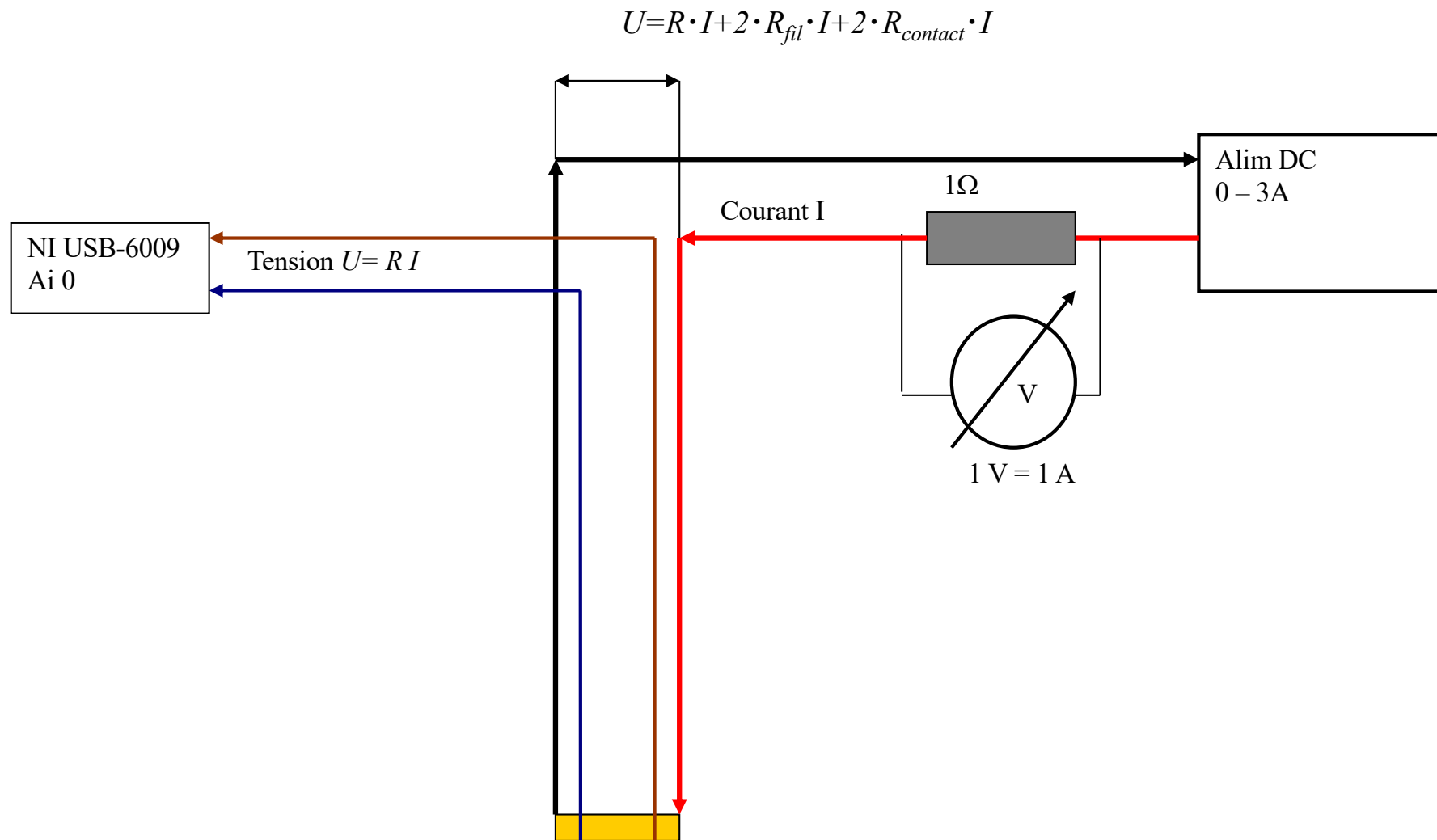
Mesure de la résistivité électrique par la méthode à 4 fils



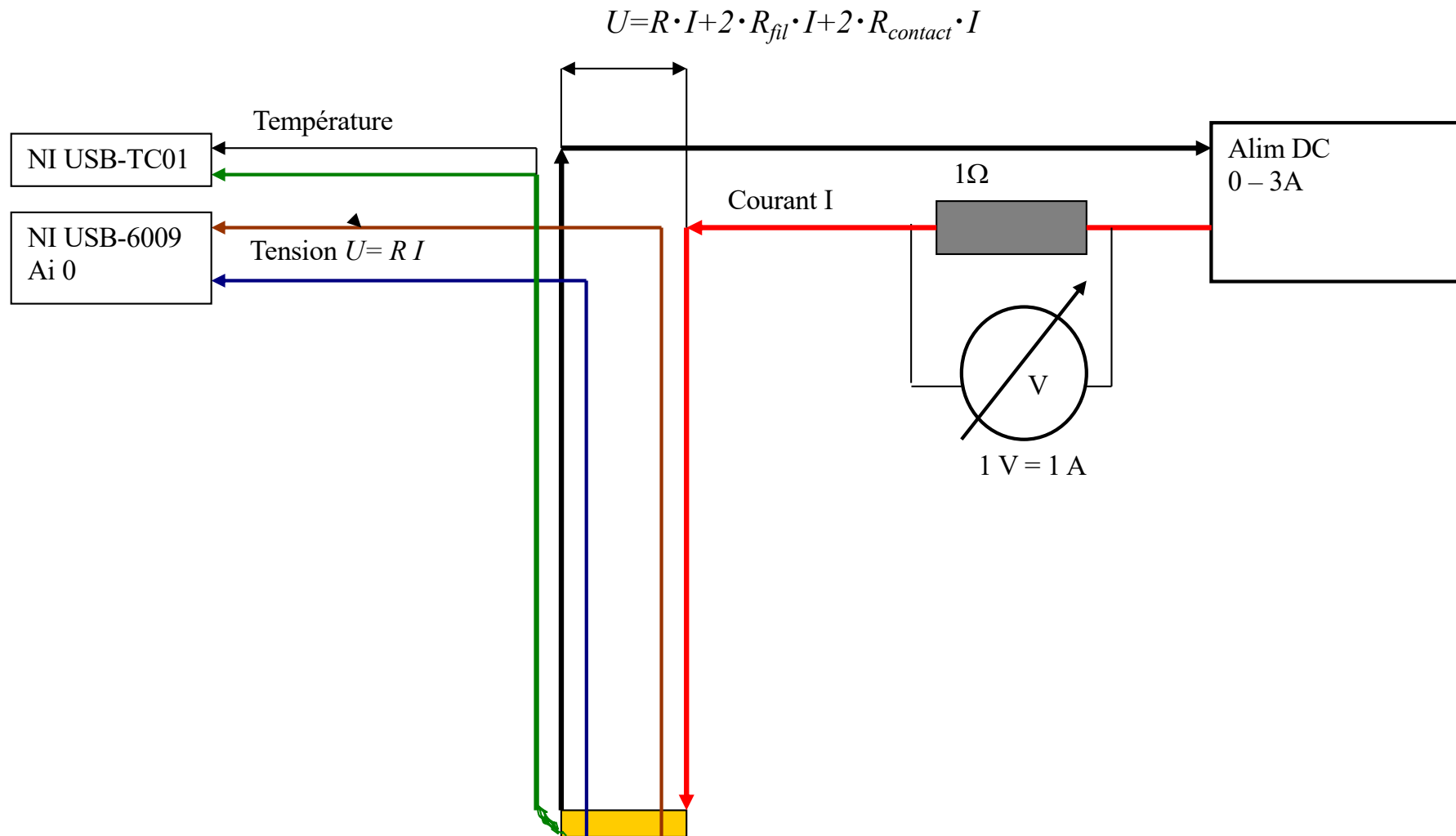
$$U_4 = R \cdot I + 2 \cdot \cancel{R_{fil}} \cdot \color{red}{i} + 2 \cdot \cancel{R_{contact}} \cdot \color{red}{i}$$

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

CABLAGE INSTALLATION DE MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE



CABLAGE INSTALLATION DE MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE



CABLAGE INSTALLATION DE MESURE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE A BASSE TEMPERATURE

